



Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



Радиофизический факультет

**11-я Международная
научно-практическая
конференция**

**Актуальные проблемы
радиофизики
АПР-2025**



16-18 сентября 2025 года
г. Томск

Организаторы конференции:

Национальный исследовательский Томский государственный университет
Радиофизический факультет ТГУ
ООО «Радиовидение»

Конференция проводится при поддержке:**Спонсоры**

ООО "Специальные Системы. Фотоника
ООО «ПЛАНАР»
ООО «УМИУМ»
ООО «Сибаналитприбор»
ООО «НПК «ТЕСАРТ»
ООО «Научные приборы и системы»

Основные научные направления конференции включают:

Физика взаимодействия радиоволн с неоднородными средами и объектами.
Радиотомография и сверхширокополосное зондирование.
Метаматериалы, магнитные материалы и нанотехнологии в радиофизике и электронике.
Наноэлектромагнетизм.
Методы и средства измерения электромагнитных характеристик материалов в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах.
Материалы и приборы микро-, опто- и наноэлектроники.
Полупроводниковые детекторы и сенсоры.
Лазерные и оптико-электронные системы в исследовании материалов и сред.
Компьютерная оптика, цифровая голография, обработка изображений.
Квантовая электроника, фотоника и нелинейная оптика.
Материалы и приборы нанофотоники и наноплазмоники.
Нелинейная динамика, синергетика и фрактальная геометрия в радиофизике и оптике.
Информационные технологии в исследовании сложных структур.
Физика магнитосферы, ионосферы, верхней атмосферы Земли.
Солнечно-земная физика и физическая экология.
Современные технологии преподавания радиофизических и радиотехнических дисциплин.

Председатель:

Демин В.В. – доцент, канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия)

Члены комитета:

Блаунштейн Н.Ш. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Беэр-Шева, Израиль).

Максименко С.В. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Минск, Беларусь).

Барышников Н.В. – профессор, д-р техн. наук (Москва, Россия).

Беляев Б.А. – профессор, д-р техн. наук (Красноярск, Россия).

Войцеховский А.В. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Дунаевский Г.Е. – профессор, д-р техн. наук (Томск, Россия).

Горлов Е.В. – доцент, канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Ивонин И.В. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Кистенёв Ю.В. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Колесник С.А. – доцент, канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Кошелев В.И. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Крутиков В.А. – д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Никифоров А.И. – д-р физ.-мат. наук (Новосибирск, Россия).

Лукин В.П. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Прудаев И.А. – канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Пташник И.В. – член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Пчеляков О.П. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Новосибирск, Россия).

Средин В.Г. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия).

Тарасенко В.Ф. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Тихомиров А.А. – профессор, д-р техн. наук (Томск, Россия).

Толбанов О.П. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Филимонов С.Н. – кандидат физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Щукин Г.Г. – профессор, д-р физ.-мат. наук (Санкт-Петербург, Россия).

Организационный комитет

Председатель:

Коротаев А.Г. – декан РФФ, канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия)

Сопредседатель:

Юрченко А.В. – профессор, доктор техн. наук (Томск, Россия)

Заместитель председателя:

Шипилов С.Э. – профессор, доктор физ.-мат. наук (Томск, Россия)

Ответственный секретарь:

Димов М.А. – инженер (Томск, Россия)

Члены комитета:

Беличенко В.П. – профессор, д-р физ.-мат. наук;

Коханенко А.П. – профессор, д-р физ.-мат. наук

Кочеткова Т.Д. – доцент, канд. физ.-мат. наук

Сатаров Р.Н. – научн. сотр, канд. физ.-мат. наук

Клоков А.В. – доцент, канд. физ.-мат. наук

Бадьин А.В. – доцент, канд. физ.-мат. наук

Брюханов И.Д. – доцент, канд. физ.-мат. наук

Росляков С.Н. – научн. сотр, канд. физ.-мат. наук

Харапудченко О.В. – доцент, канд.пед.наук.

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА РАДИОВОЛН: ИЗЛУЧЕНИЕ, ПРИЕМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ	8
Модификация комбинированной СШП антенны на основе теории характеристических мод	9
Поляризационные свойства фокусирующей системы на основе параболического рефлектора и СШП облучателя	10
Рассеяние электромагнитной волны на тонком идеально проводящем цилиндре, расположенном внутри диэлектрического эллипсоида	12
Разработка и исследование приемо-передающей системы для СШП скважинного радара.....	18
Минимизация коэффициентов передачи электромагнитных волн между излучающими объектами	21
Моделирование входного импеданса проволочной аperiодической антенны КВ-диапазона с различными конструкциями оконечных нагрузок	22
Эффективный подход к исследованию электрически малой сверхширокополосной полусферической спиральной антенны.....	26
Исследования ячейки для измерения диэлектрической проницаемости почв на базе разомкнутого отрезка симметричной полосковой линии	30
Метод повышения точности обработки емкостных измерений в диэлектрической спектроскопии материалов	33
Разработка системы магнитного позиционирования для реабилитации пациентов с нарушениями функций верхних конечностей	36
Формирование направленного воздушного потока с помощью сфокусированного широкополосного акустического поля.....	37
Сверхширокополосный двухполяризационный радар со сканированием объектов в среде	38
Оптимизация комбинированной антенны для работы в среде масляной изоляции	41
Влияние неровностей границ раздела слоистых структур льда и леса на параметры отражения сигналов навигационных спутников	43
Оптимизация измерений толщин ледовых покрытий с помощью методов ГНСС рефлектометрии	45
Система оперативного обеспечения пользователей КВ радиосвязи краткосрочными прогнозами состояния ионосферы и распространения радиоволн.....	48
Границы применения приближения физической оптики	49
Оценка воздействия высоковольтных монополярных импульсов напряжения на жизнеспособность микроорганизмов	51
Рассеяние света на атмосферных частицах сложных агрегатов для задач лазерного зондирования на основе метода физической оптики	53
Аналитическое решение дисперсионных уравнений для показателя особенности поля в многосекторных структурах с общим ребром	58
Генератор коротких импульсов поля магнитной индукции.....	61
Моделирование циклотронного взаимодействия солнечных протонов с МГД волнами во вспышечных и высоких корональных петлях	64
Характеристики поля разреженной ФАР скрещенной конфигурации в задаче фокусировки излучения	74
Сравнительный анализ КПД различных компоновок согласующей цепи антенного согласующего устройства КВ-диапазона при работе с укороченными антеннами электрического типа.....	75
О необходимости учета радиофизических измерений при моделировании работы радиосистемы	80
Импедансные характеристики грунта в приближении вертикально-неоднородного диэлектрика	84
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СВЧ, КВЧ И ГВЧ	88
Поляризационная терагерцовая дефектоскопия анизотропных материалов	89
Электрофизические характеристики композитов на основе акриловой краски и углеродных нанотрубок	90

Исследование диэлектрических свойств углеродного волокна квазиоптическим резонаторным методом в СВЧ диапазоне.....	92
Корреляционная связь хаотических и порождающих синхронных колебаний системы связанных автогенераторов.....	93
Разрушение когерентности колебаний в системе связанных автогенераторов	96
Проектирование и анализ параметров балансного смесителя частоты диапазона 75–110 ГГц	99
Электромагнитная герметизация с использованием аддитивно изготовленных композитных структур	100
Частотный фильтр КВЧ диапазона на основе фотонных структур	102
Генерация и детектирование импульсов терагерцового излучения в кристаллах GaSe и их применение во времяпролетной томографии.....	105
Электромагнитный отклик от композиционных материалов на основе эпоксидной смолы и стеклянных микросфер в суб-терагерцовом диапазоне.....	108
Ферритосодержащий термопластичный материал для электромагнитной герметизации с применением аддитивной технологии.....	109
Влияние дифракционного отражателя на параметры излучения в многоволновом черенковском генераторе в верхнем КВЧ-диапазоне	110
Применение отечественной компонентной базы для разработки наземной системы мониторинга.....	112
Электромагнитные свойства термопластичных композиционных эластомеров на основе карбонильного железа для применения в FDM 3D-печати	114
Некоторые факты истории и новые возможности активных антенных устройств в виде аппликаторов	118
ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА	119
Цифровое моделирование текстурированных кремниевых двухсторонне-чувствительных солнечных элементов	120
Приемный модуль для беспроводной УФ-связи	123
Экспериментальная проверка работоспособности макета бесконтактного энкодера на основе эффекта Доплера	125
Частотная зависимость напряжения переключения S–диода	129
Частотная зависимость напряжения переключения S–диода	130
Распространение волн пространственного заряда в полупроводниковых структурах с плавной продольной электрической неоднородностью	131
Приемо-передающий модуль для наносекундного импульсного дальномера на основе отечественной компонентной базы.....	134
Электромагнитные свойства ферритов, полученных экструзионной печатью	136
Динамика поляризации сенсоров на основе арсенида галлия, компенсированного хромом, при воздействии субнаносекундного импульсного инфракрасного излучения	138
Солнечно-слепые детекторы на основе тонких пленок Ga ₂ O ₃	141
Использование Allpix Squared для численного моделирования амплитудных спектров кремниевых PIN-сенсоров рентгеновского излучения	143
Структурно геометрические неоднородности в приборах с объемным взаимодействием.....	145
Магнитная жидкость как естественный элемент оптоэлектронных систем в радиоэлектронике.....	146
ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ: РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ	147
Оптическая система связи на основе вихревых лаггерр-гауссовых пучков	148
Теорема Ван-Циттерта – Цернике для лаггерр-гауссовых оптических пучков	151
Полевые исследования канала оптической связи вне прямой видимости с БПЛА через границу раздела «вода-атмосфера» на длине волны 450 нм.....	154
Обнаружение облачности на AllSky-изображениях методами машинного обучения	157

Прогнозирование вероятности формирования облаков верхнего яруса методами машинного обучения	160
Кристаллы GaSe для генерации ИК- и терагерцового излучений: получение нелинейно-оптических элементов большой апертуры, защитных и антиотражающих покрытий	161
Связь структурной неоднородности с оптическими свойствами в кристаллах дифосфида цинка-германия	164
Характеристики облаков верхнего яруса по данным поляризационного лидара, аэрологического зондирования и реанализа.....	166
Автоматическая оценка параметров астроклимата по панорамным изображениям ночного неба	167
КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА	168
Исследование темновых характеристик LWIR nB(SL)n-структур методом спектроскопии адмиттанса	169
Адмиттансные характеристики MWIR nBn-структур со сверхрешеткой в барьерной области	171
Экспериментальное исследование температурной зависимости концентрации изломов и размеров прямолинейных участков на ступенях поверхности Si(100).....	172
Влияние низкотемпературной плазменной обработки на порог оптического пробоя кристаллов ZnGeP ₂	174
Исследование кинетических процессов с участием электронно-возбужденного молекулярного азота на высотах средней атмосферы Земли и в разрядной камере.....	175
Особенности определения механизмов эпитаксиального роста Si и Ge на Si(001) методом дифракции быстрых электронов	176
Формирование Ми-резонаторов GeSi на окисленной поверхности Si(001).....	178
Германиевые фотодиоды для кремниевой фотоники	179
Синтез двумерного германия на пиролитическом графите методом молекулярно-лучевой эпитаксии	181
Дифракционные свойства мультиплексированных многослойных КПЖК дифракционных структур с изменяющимся периодом	182
Структурные и оптические свойства множественных квантовых ям GeSn/Si и GeSn/GeSi	185
Модификация свойств границ раздела поверхностный окисел-антимонид индия мягким рентгеновским излучением.....	186
Спектроскопические исследования фазового состава кристаллов твердых растворов полупроводников	188
Области “glow” и “beads” в красных столбчатых спрайтах	190
Структурные и оптические свойства гетероструктур на основе материалов IV группы (Ge, Si, Sn)....	191
Исследование эпитаксиальных структур Ge/Si методом рентгеновской дифрактометрии с построением карт обратного пространства.....	192
Генерация лазерного излучения в полимерных планарных волноводах.....	194
Эпитаксиальные структуры Ge/Si, сформированные методом МЛЭ для изготовления PIN фотодетекторов.....	195
Формирование Ми-резонаторов GeSi на окисленной поверхности Si(001).....	196
Формирование строительных единиц в изломах и динамика А и В ступеней на вицинальной поверхности Si(100)-2x1.....	197
СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА И ТЕХНОЛОГИИ.....	200
Разработка аппаратно-программного комплекса контроля технического состояния протяженных объектов при помощи распределенных волоконно-оптических датчиков	201
Настольная климатическая камера	203
Программно-аппаратный комплекс LabView-NI ELVIS II+ для измерения характеристик и параметров полевых транзисторов.....	204
Программно-аппаратный комплекс LabView-NI ELVIS для работы с регулируемыми источниками напряжения и тока	206

Метрологическое обеспечение единицы относительной влажности в Республики Казахстан	208
Гидрологический зонд для удаленного мониторинга электрофизических параметров водоемов	210
Разработка и обучение нейросетевой модели для семантической сегментации данных в терагерцовой дефектоскопии	211
Измерительная установка для определения скорости дрейфа электронов в плазменных слоях ионосферы.....	213
Анализ долговременных характеристик пассивных водородных стандартов частоты и времени	214
Наземная система мониторинга параметров почвы для дистанционного зондирования Земли	217
Влияние дефектов образцов на результаты расчётов комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости при измерениях в коаксиальной волноводной ячейке.....	219
Адаптивные алгоритмы цифровой обработки сигналов в волоконно-оптических системах связи с учётом изменяющихся параметров среды.....	220
Применение оптоволоконных сенсорных систем для теплоконтроля промышленного оборудования	222
Термический отжиг светодиодов на основе гетероструктур GaP подвергнутые воздействию быстрыми нейтронами.....	225
Стабилизация параметров светодиодов среднего инфракрасного диапазона для оптоэлектронных устройств.....	227
Исследование диэлектрической проницаемости горных пород в диапазоне частот 20 МГц – 2 ГГц	231
Автоматизированная система управления высокотемпературным нагревателем.....	235
Разработка технических требований к аппаратуре контроля и управления испытательным стендом аттестации отопительных котлов	236
Приборы и технологии экологического и метеорологического мониторинга.	238
Институт мониторинга климатических и экологических систем.....	238
Сибирского отделения Российской академии наук	238
Автоматизированная система для сбора и анализа данных клеточных и бактериальных исследований	244
Способ мониторингирования движения глюкозы	246
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ РАДИОФИЗИКИ, РАДИОТЕХНИКИ И ОПТИКИ	247
От генерации заданий до решения: опыт применения GPT-моделей в организации аудиторной и самостоятельной работы студентов.....	248
«Радиофизический класс ТГУ» как средство профессиональной пробы студентов и школьников	250
Опыт организации и проведения курса "Введение в специальность" для студентов-радиофизиков...	253
Приводит ли взаимная связь автоколебательных систем к синхронизму?	257
«неМузей радиофизики» как просветительский и образовательный проект	261
Опыт организации междисциплинарных проектов при изучении дисциплин "Датчики-преобразователи первичной информации" и "Виртуальные приборы LabView"	263
Интеграция ПЛК и CoDeSys в образовательный процесс: разработка прототипа КСБ локального объекта для формирования профессиональных компетенций студентов РФФ. НИ ТГУ	265
Белл-Ланкастерская система в программе “Радиофизический класс. Оптические технологии”	267
Программируемые логические контроллеры АО «ЭЛЕСИ» в учебном процессе радиофизического факультета.....	270
РФФ кафе как формат профориентации школьников и студентов младших курсов	273



ФИЗИКА РАДИОВОЛН: ИЗЛУЧЕНИЕ, ПРИЕМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

АПР 2025
16-18 сентября 2025
Томск, Россия

Модификация комбинированной СШП антенны на основе теории характеристических модАндреев Юрий Анатольевич

Беличенко Виктор Петрович

Плиско Вячеслав Владимирович

Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: andreev@lhfe.hcei.tsc.ru

Теория характеристических мод (ТХМ) [1] использована с целью улучшения параметров согласования 3D мощной СШП комбинированной антенны (КА). Такая антенна представляет собой специфическую комбинацию ТЕМ-рупора с одним активным и двумя пассивными магнитными диполями [2]. КА, выбранная в качестве объекта теоретического и экспериментального исследования, имела следующие размеры: длина $L = 16$ см, высота $H = 15$ см и ширина $W = 15$ см. В экспериментах антенна возбуждалась биполярными импульсами напряжения длительностью 1 нс.

Теоретическое исследование включало численный расчет в полосе частот 0.25-3.0 ГГц основных атрибутов ТХМ: характеристических углов, модальных значимостей, характеристических токов. Произведен учет значимых в указанном диапазоне восьми резонансных характеристических мод. Оценивался вклад мощности каждой моды в общую излучаемую мощность и производилась визуализация характеристических токов для того, чтобы за счет модификации конструкции КА обеспечить улучшение ее характеристик. Анализ модальной значимости мод показал, что только моды 2, 3, 6, 8 являются сильно возбужденными модами. А из анализа распределений поверхностных плотностей токов мод 2, 3 и 6 на их резонансных частотах была обнаружена достаточно малая область концентрации токов. Она располагалась на краях верхнего лепестка ТЕМ-рупора, вблизи коаксиального входа КА. Для обеспечения распределения токов в данной области по большей площади к верхнему лепестку ТЕМ-рупора, с двух сторон заподлицо, были присоединены идентичные полудиски из того же материала. Это привело к пространственно более распределенному возбуждению ТЕМ-рупора и, с общей точки зрения, должно было улучшить параметры согласования КА. Последующая оптимизация геометрических параметров полудисков позволила предложить конструктивное решение комбинированной антенны модифицированной (КАМ).

Результаты измерений КСВН КА и КАМ, а также результаты численных расчетов для этих антенн в CST Studio представлены на *рис. 1*. Как видно, экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими. Предложенная КАМ в диапазоне частот от 0.5 до 2.75 ГГц имеет уровень КСВН < 2 . У нее более высокий коэффициент усиления, чем у исходной КА, практически во всей рабочей полосе частот. Наибольшее его увеличение наблюдается в диапазоне частот от 1.9 до 2.8 ГГц. Исследования во временной области показали, что эффективный потенциал [2] излучения КАМ на 9% (в эксперименте) и 11% (при моделировании) выше соответствующего значения для исходной КА.

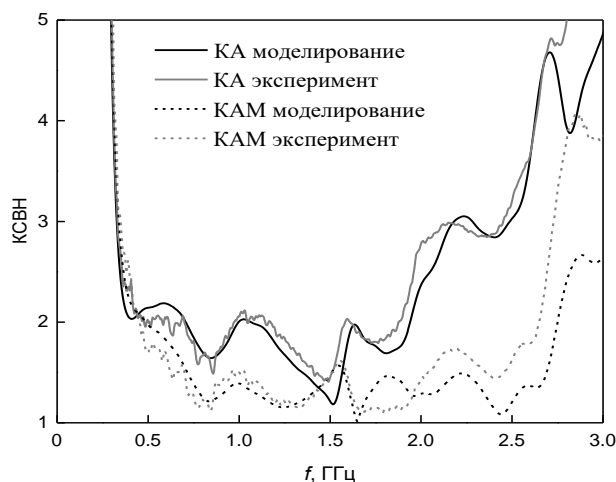


рис.1 Зависимость КСВН от частоты для КА и КАМ. Численное моделирование и эксперимент.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (тема № FWRM-2021-0002).

Список публикаций:

[1] Harrington R. F., Mautz J.R. // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1971. Vol. 19, No. 5, P. 628,

[2] Андреев Ю. А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. // *Радиотехника и электроника*. 2005. Т. 50. № 5. С. 1.

Поляризационные свойства фокусирующей системы на основе параболического рефлектора и СШП облучателя**Колоскова Мария Евгеньевна***Андреев Юрий Анатольевич**Балзовский Евгений Владимирович**Институт сильноточной электроники СО РАН**E-mail: andreev@lhfe.hcei.tsc.ru*

Аннотация: Целью работы является численное моделирование и экспериментальное исследование сверхширокополосных (СШП) рефлекторных фокусирующих систем для оценки уровня и минимизации кроссполяризованного излучения. СШП антенны широко применяются в беспроводной связи, радиолокации, геолокации и многих других областях. В мощных источниках излучения применяются *ТЕМ*-антенны [1], параболический рефлектор, возбуждаемый *ТЕМ*-антеннами [2], и комбинированные антенны [3]. Комбинированные антенны, представляющие собой комбинацию электрического и магнитных излучателей, активно используются благодаря компактности и широкому диапазону рабочих частот. Излучение комбинированных антенн линейно поляризовано, однако в горизонтальной плоскости присутствует существенный уровень кроссполяризации. Учет влияния кроссполяризованной компоненты важен при измерении электрофизических параметров материалов для получения достоверных данных.

В работе проведено экспериментальное измерение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) реальной комбинированной антенны и модели антенны в программном комплексе CST Studio. Исследование подтвердило соответствие модели физической антенне. Размеры исследуемой комбинированной антенны 65×60 мм. Антенна оптимизирована для возбуждения мощными биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 нс [4].

Чтобы оценить пространственные характеристики излучаемого комбинированной антенной электромагнитного поля, в рабочей области при моделировании были размещены датчики поля, ориентированные на регистрацию электрического поля на значительном удалении от источника в условиях дальней зоны, где волна практически плоская, а поле описывается главным образом через компоненты E_θ и E_ϕ – в вертикальной (меридиональной) и горизонтальной (азимутальной) плоскости соответственно. Моделирование проводилось во временной области. Датчиками поля регистрировались напряженности $E_\theta(t)$ и $E_\phi(t)$ для диапазона азимутальных углов $\varphi = \pm 90^\circ$ с шагом 10° . По полученным осциллограммам было определено амплитудное значение каждой компоненты – пиковое значение напряженности $E_{r\theta}$ и $E_{r\phi}$ соответственно.

Основной поляризацией данной антенны является вертикальная, кроссполяризация – горизонтальная. Было определено отношение пиковых напряженностей кроссполяризованной компоненты к основной (рис.1).

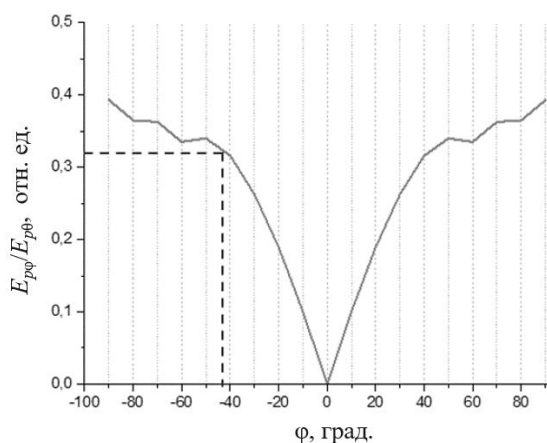


Рис.1 Зависимость отношения пиковых напряженностей $E_{r\phi}/E_{r\theta}$ от угла наблюдения

Для одиночной антенны в направлении соответствующем полуширине главного лепестка диаграммы направленности (ДН) основной компоненты поля по уровню 0.707 было зафиксировано соотношение пиковых значений напряженности компонент электрического поля равное 0.323, что не превышает 10% по мощности в пределах $\pm 43^\circ$.

Далее антенна-облучатель была размещена в фокусе круглого параболического рефлектора диаметром 1.2 м. Аналогично проведено моделирование в дальней зоне, в азимутальной плоскости расположены датчики поля с угловым разрешением 1 градус. Диапазон углов наблюдения составлял от -15 до 15 градусов. Определено отношение пиковых напряженностей кроссполяризованной компоненты к основной для каждого датчика поля (рис.2).

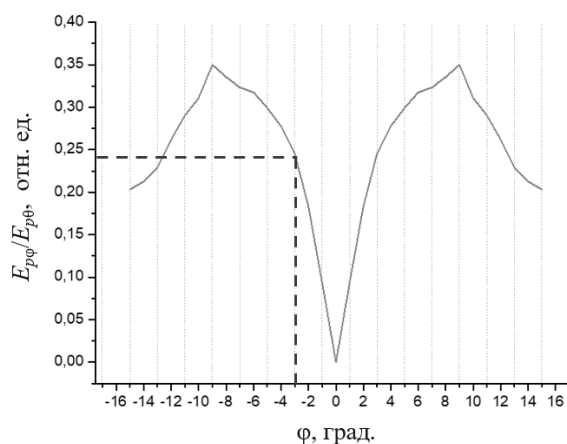


Рис.2 Зависимость отношения пиковых напряженностей $E_{pφ}/E_{pθ}$ системы с параболическим рефлектором от угла наблюдения

Для системы, состоящей из параболического рефлектора и СШП облучателя в направлении, соответствующем полуширине главного лепестка ДН, соотношение пиковых значений напряженности составило 0.24 в пределах $\pm 3^\circ$.

Проведено моделирование для трех вариантов геометрии профиля параболического рефлектора отличающихся глубиной – расстоянием от вершины параболоида до плоскости раскрыва. Глубина рефлектора влияет на направленные характеристики антенны. В качестве исследуемых вариантов были выбраны следующие значения глубины: $h_1=15$ см, $h_2=20$ см, $h_3=25$ см. В пространственных длительностях импульса значения глубины h/ct , где c – скорость электромагнитной волны, $\tau = 0.5$ нс – длительность входного импульса напряжения. Для каждого из профилей выбраны восемь диаметров раскрыва антенны в диапазоне от 0.9 до 3 метров (от 6ст до 20ст). Такой подход позволяет оценить влияние как глубины, так и диаметра рефлектора на формирование поляризационных свойств и других электродинамических характеристик системы.

В результате исследований в сравнении с одиночной комбинированной антенной внесение ее в фокус круглого параболического рефлектора позволяет снизить $E_{pφ}/E_{pθ}$ в 1.2–1.9 раз в пределах полуширины диаграммы направленности при диаметре рефлектора от 6 до 20ст. Для диаметров зеркала больше 10ст меньшим уровнем кроссполяризованного излучения обладало зеркало глубиной $h_1=15$ см. Снижение уровня кроссполяризованного излучения происходит из-за ограниченности телесного угла, под которым виден рефлектор из фокуса, следовательно значительная часть кроссполяризованного излучения не отражается рефлектором в точку наблюдения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (тема № FWRM-2021-0002).

Список литературы:

- [1] Delmote P. // *Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9* / eds.: F. Sabath, D. Giri, F. Rachidi, A. Kaelin. – New York, NY : Springer, 2010. – P. 315–322.
- [2] Smith I. D., Morton D. W., Giri D. V., et al. // *Tenth IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM, USA, July 10–13, 1995*. – Piscataway, NJ : IEEE, 1995. – Vol. 1. – P. 56–64.
- [3] Koshelev V. I., Buyanov Y. I., Andreev Y. A., et al. // *PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science Conf., Las Vegas, NV, USA, June 17–22, 2001*. – Piscataway, NJ : IEEE, 2001. – Vol. 2. – P. 1661–1664.
- [4] Balzovsky E., Buyanov Y., Koshelev V., Nekrasov E. // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2021. – Vol. 63, № 11. – P. 2866–2869.

**Рассеяние электромагнитной волны на тонком идеально проводящем цилиндре,
расположенном внутри диэлектрического эллипсоида*****Балашова Ольга Михайловна****Дмитренко Анатолий Григорьевич**Национальный исследовательский Томский государственный университет**E-mail: balashovajkz@mail.ru***Введение**

Значительный интерес для исследователей представляет изучение рассеяния электромагнитных волн на объектах различной формы и физической природы, размеры которых сравнимы с длиной волны (так называемая «резонансная частотная область»). Этот интерес обусловлен необходимостью решения очень широкого класса практически важных проблем, к которым, в частности, относятся проблема снижения радиолокационной заметности различных объектов, их идентификация, проблема электромагнитной совместимости и так далее.

Одним из наиболее популярных объектов обсуждаемых исследований является тонкий прямолинейный идеально проводящий цилиндр. Под тонким цилиндром обычно подразумевается цилиндр, поперечные размеры которого много меньше его длины и длины падающей волны. Такой цилиндр является хорошей моделью тонкой прямолинейной проволочной антенны. Различным аспектам рассеяния электромагнитных волн на таком цилиндре посвящено очень большое число работ, начиная с работы Поклингтона [1]. Хороший обзор этих работ содержится в [2,3].

Однако нередко встречаются ситуации, когда приёмная или передающая тонкая проволочная антенна в целях маскировки или защиты от внешних воздействий размещена под защитным колпаком, который может представлять собой однородное диэлектрическое тело. В связи с этим представляет интерес исследование характеристик рассеяния тонкого идеально проводящего цилиндра, который моделирует тонкую антенну, когда он размещён внутри диэлектрического тела. В доступной авторам литературе не найдены работы, посвящённые данному вопросу. Однако объединение основных идей предложенных ранее одним из авторов доклада вариантов метода вспомогательных источников для решения задач электромагнитного рассеяния на диэлектрических телах [4] и тонких идеальных проводниках [5] позволяет решить задачу рассеяния на тонком идеальном проводнике, когда последний расположен внутри диэлектрического тела. В данном докладе представлено решение этой задачи, приведены результаты исследования зависимости сечений обратного рассеяния от размеров полуосей эллипсоида.

Формулировка задачи

Геометрия задачи показана на рис. 1. В безграничной однородной изотропной среде D_e с диэлектрической и магнитной проницаемостями ϵ_e и μ_e в декартовой системе координат $Oxyz$ расположен диэлектрический эллипсоид D_i с проницаемостями ϵ_i, μ_i , ограниченный гладкой поверхностью S . Полуоси эллипсоида a, b, c ориентированы соответственно вдоль осей x, y, z системы координат. Внутри эллипсоида размещён идеально проводящий цилиндр длиной l и радиусом r , ограниченный поверхностью S_p . Предполагается, что поверхности S и S_p не пересекаются, а параметры цилиндра удовлетворяют условиям тонкого цилиндра: $2r \ll \lambda, 2r \ll l$, где λ — длина падающей на рассматриваемую структуру волны. Структура возбуждается стационарным электромагнитным полем \vec{E}_0, \vec{H}_0 , зависимость которого от времени t выбрана в виде $\exp(-i\omega t)$. Требуется найти рассеянное поле \vec{E}_e, \vec{H}_e в области D_e .

Кроме поля \vec{E}_e, \vec{H}_e в D_e , внутри диэлектрического тела существует поле \vec{E}_i, \vec{H}_i , которое также является неизвестным. Поля \vec{E}_e, \vec{H}_e и \vec{E}_i, \vec{H}_i должны удовлетворять уравнениям Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{E}_e = i\omega \mu_e \vec{H}_e, \operatorname{rot} \vec{H}_e = -i\omega \epsilon_e \vec{E}_e \quad (1)$$

в области D_e ,

$$\operatorname{rot} \vec{E}_i = i\omega \mu_i \vec{H}_i, \operatorname{rot} \vec{H}_i = -i\omega \epsilon_i \vec{E}_i \quad (2)$$

в области D_i и граничным условиям

$$[\vec{n}, \vec{E}_i - \vec{E}_e] = [\vec{n}, \vec{E}_0], [\vec{n}, \vec{H}_i - \vec{H}_e] = [\vec{n}, \vec{H}_0] \quad (3)$$

на поверхности S ,

$$[\vec{n}_p, \vec{E}_i] = 0 \quad (4)$$

на поверхности идеально проводящего цилиндра. Кроме того, поле \vec{E}_e, \vec{H}_e в области D_e должно удовлетворять условиям излучения

$$\left[\left[\sqrt{\varepsilon_e} \vec{E}_e, \vec{R} / R \right] + \sqrt{\mu_e} \vec{H}_e \right] = O(R^{-1}), \left[\left[\sqrt{\mu_e} \vec{H}_e, \vec{R} / R \right] - \sqrt{\varepsilon_e} \vec{E}_e \right] = O(R^{-1}), R \rightarrow \infty. \quad (5)$$

В выражениях (1)-(5) \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности диэлектрического тела S ; \vec{n}_p – единичный вектор нормали к поверхности идеально проводящего цилиндра S_p ; $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$; $[\vec{a}, \vec{b}]$ – векторное произведение.

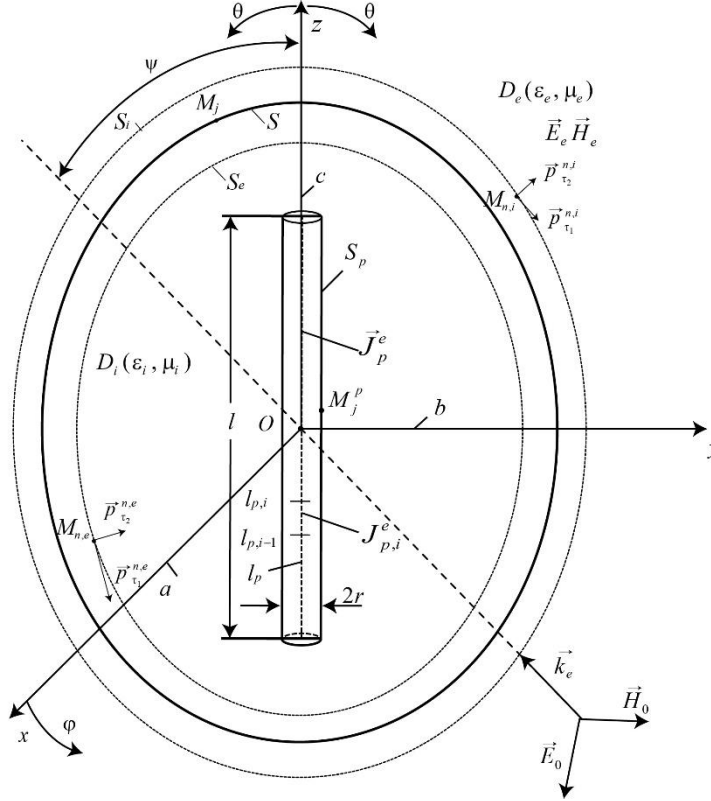


рис.1. Геометрия задачи

Решение задачи

Введем (см. рис. 1) внутри диэлектрического эллипсоида вспомогательный эллипсоид S_e с полуосями $a_e = K_e a$, $b_e = K_e b$, $c_e = K_e c$, где параметр K_e (коэффициент подобия) характеризует удаление вспомогательного эллипсоида S_e от поверхности S , его значения лежат в интервале от 0 до 1.

Выберем на вспомогательном эллипсоиде S_e конечную совокупность точек $\{M_{n,e}\}_{n=1}^{N_e}$. В каждой точке $M_{n,e}$ разместим пару независимых вспомогательных элементарных электрических диполей с моментами $\vec{p}_{\tau_1}^{n,e} = p_{\tau_1}^{n,e} \vec{e}_{\tau_1}^{n,e}$ и $\vec{p}_{\tau_2}^{n,e} = p_{\tau_2}^{n,e} \vec{e}_{\tau_2}^{n,e}$, ориентированными вдоль направлений единичных векторов $\vec{e}_{\tau_1}^{n,e}$, $\vec{e}_{\tau_2}^{n,e}$, лежащих в плоскости, касательной к S_e в точке $M_{n,e}$, и излучающих в однородную среду с параметрами ε_e и μ_e .

Внутри тонкого проводника на его оси разместим непрерывно распределенный вспомогательный электрический ток \vec{J}_p^e .

Представим неизвестное рассеянное поле \vec{E}_e, \vec{H}_e во внешней среде D_e в виде суммы полей вспомогательных диполей, расположенных на вспомогательном эллипсоиде S_e , и тока \vec{J}_p^e :

$$\begin{aligned} \vec{E}_e(M) &= \frac{i}{\omega \varepsilon_e} \sum_{n=1}^{N_e} \text{rot} \text{rot} \vec{\Pi}_{n,e} + \frac{i}{\omega \varepsilon_e} \text{rot} \text{rot} \vec{\Pi}_e, \\ \vec{H}_e(M) &= \sum_{n=1}^{N_e} \text{rot} \vec{\Pi}_{n,e} + \text{rot} \vec{\Pi}_e, \\ \vec{\Pi}_{n,e} &= \Psi_e(M, M_{n,e}) \vec{p}_{\tau_1}^{n,e}, \Psi_e(M, M_{n,e}) = \exp(ik_e R_{MM_{n,e}}) / 4\pi R_{MM_{n,e}}, \vec{p}_{\tau_1}^{n,e} = p_{\tau_1}^{n,e} \vec{e}_{\tau_1}^{n,e} + p_{\tau_2}^{n,e} \vec{e}_{\tau_2}^{n,e}, \\ \vec{\Pi}_e &= \int_{l_p} \Psi_e(M, M') \vec{J}_p^e(M') dl_p, \Psi_e(M, M') = \exp(ik_e R_{MM'}) / 4\pi R_{MM'}, M \in D_e. \end{aligned} \quad (6)$$

В выражениях (6) $k_e = \omega\sqrt{\epsilon_e\mu_e}$ – волновое число в среде D_e ; $R_{MM_{n,e}}$ – расстояние от точки $M_{n,e}$ на вспомогательном эллипсоиде S_e до точки наблюдения M в D_e ; $R_{MM'}$ – расстояние от точки M' на оси идеально проводящего цилиндра до той же точки наблюдения M в D_e ; $p_{\tau_1}^{n,e}$, $p_{\tau_2}^{n,e}$ ($n=1,2,\dots,N_e$) – неизвестные дипольные моменты, N_e – число точек размещения диполей на S_e ; \vec{J}_p^e – неизвестный осевой вспомогательный ток; интегрирование в выражении для $\vec{\Pi}_e$ проводится вдоль оси проводника l_p .

Для представления электромагнитного поля \vec{E}_i, \vec{H}_i внутри диэлектрического эллипсоида введём вспомогательную поверхность S_i , охватывающую этот эллипсоид. Вспомогательная поверхность S_i также выбирается в форме эллипсоида, но с полуосями $a_i = K_i a$, $b_i = K_i b$, $c_i = K_i c$, где коэффициент подобия $K_i > 1$.

Выберем на вспомогательной поверхности S_i конечную совокупность точек $\{M_{n,i}\}_{n=1}^{N_i}$, в каждой из которых разместим пару независимых вспомогательных элементарных электрических диполей с моментами $\vec{p}_{\tau_1}^{n,i} = p_{\tau_1}^{n,i} \vec{e}_{\tau_1}^{n,i}$, $\vec{p}_{\tau_2}^{n,i} = p_{\tau_2}^{n,i} \vec{e}_{\tau_2}^{n,i}$. Единичные векторы $\vec{e}_{\tau_1}^{n,i}$ и $\vec{e}_{\tau_2}^{n,i}$ выбраны лежащими в плоскости, касательной к поверхности S_i в точке $M_{n,i}$. Предполагается, что диполи, размещённые на S_i , излучают в однородную среду с параметрами ϵ_i, μ_i . Представим неизвестное поле \vec{E}_i, \vec{H}_i внутри диэлектрического эллипсоида в виде суммы полей введённых вспомогательных диполей:

$$\vec{E}_i(M) = \frac{i}{\omega\epsilon_i} \sum_{n=1}^{N_i} \text{rot} \text{rot} \vec{\Pi}_{n,i}, \quad \vec{H}_i(M) = \sum_{n=1}^{N_i} \text{rot} \vec{\Pi}_{n,i},$$

$$\vec{\Pi}_{n,i} = \Psi_i(M, M_{n,i}) \vec{p}_{\tau}^{n,i}, \quad \Psi_i(M, M_{n,i}) = \exp(ik_i R_{MM_{n,i}}) / 4\pi R_{MM_{n,i}}, \quad \vec{p}_{\tau}^{n,i} = p_{\tau_1}^{n,i} \vec{e}_{\tau_1}^{n,i} + p_{\tau_2}^{n,i} \vec{e}_{\tau_2}^{n,i}, \quad M \in D_i. \quad (7)$$

В выражениях (7) $k_i = \omega\sqrt{\epsilon_i\mu_i}$ – волновое число в среде D_i ; $R_{MM_{n,i}}$ – расстояние от точки $M_{n,i}$ на вспомогательной поверхности S_i до точки M в D_i ; $p_{\tau_1}^{n,i}$, $p_{\tau_2}^{n,i}$ ($n=1,2,\dots,N_i$) – неизвестные дипольные моменты, N_i – число точек размещения диполей на S_i .

Представления для полей (6), (7) удовлетворяют уравнениям Максвелла (1), (2). Кроме того, поле (6) удовлетворяет условиям излучения (5). Чтобы удовлетворить граничным условиям (3), (4), необходимо соответствующим образом выбрать пока неизвестные значения дипольных моментов $p_{\tau_1}^{n,e}$, $p_{\tau_2}^{n,e}$ ($n=1,2,\dots,N_e$) и $p_{\tau_1}^{n,i}$, $p_{\tau_2}^{n,i}$ ($n=1,2,\dots,N_i$), а также распределение осевого тока \vec{J}_p^e .

Введём кусочно-постоянную аппроксимацию вспомогательного осевого тока \vec{J}_p^e . Разобьём осевую линию идеально проводящего цилиндра на малые участки, в пределах которых ток можно считать постоянным. Постоянные токи внутри таких участков будем называть элементами токов. Пусть N_p – число участков разбиения осевой линии. Тогда выражение для вектора $\vec{\Pi}_e$ в (6) приближённо можно записать в виде

$$\vec{\Pi}_e = \vec{e}_p \sum_{i=1}^{N_p} J_{p,i}^e \int_{l_{p,i-1}}^{l_{p,i}} \Psi_e(M, M') dl_p, \quad (8)$$

где $J_{p,i}^e$ – элемент тока на i -м участке осевой линии; \vec{e}_p – единичный вектор, направленный вдоль оси цилиндра; M' – точка, принадлежащая отрезку $[l_{p,i-1}, l_{p,i}]$ осевой линии. При таком подходе нахождение неизвестного распределения осевого тока сводится к нахождению значений N_p элементов тока.

Для определения значений дипольных моментов и элементов тока используем граничные условия (3), (4), удовлетворяя им в соответствии с методом коллокаций. Пусть M_j – точки коллокации на поверхности S диэлектрического эллипсоида, а число этих точек равно L ($j=1,\dots,L$); пусть M_j^p – точки коллокации на поверхности S_p идеально проводящего цилиндра, а число этих точек равно L_p ($j=1,\dots,L_p$). Тогда для нахождения неизвестных дипольных моментов $p_{\tau_1}^{n,e}$, $p_{\tau_2}^{n,e}$ ($n=1,2,\dots,N_e$), $p_{\tau_1}^{n,i}$, $p_{\tau_2}^{n,i}$ ($n=1,2,\dots,N_i$) и элементов токов $J_{p,i}^e$ ($i=1,\dots,N_p$) получим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$[\vec{n}^j, \vec{E}_i^j - \vec{E}_e^j] = [\vec{n}^j, \vec{E}_0^j], \quad [\vec{n}^j, \vec{H}_i^j - \vec{H}_e^j] = [\vec{n}^j, \vec{H}_0^j], \quad j = 1, \dots, L,$$

$$[\vec{n}_p^j, \vec{E}_i^{p,j}] = 0, j = 1, \dots, L_p, \quad (9)$$

где \vec{n}^j – единичный вектор нормали в точке коллокации M_j на поверхности S диэлектрического эллипсоида; \vec{n}_p^j – единичный вектор нормали в точке коллокации M_j^p на поверхности идеально проводящего цилиндра; \vec{E}_i^j, \vec{H}_i^j и \vec{E}_e^j, \vec{H}_e^j – компоненты внутреннего и внешнего полей в точке коллокации M_j ; $\vec{E}_i^{p,j}$ – вектор напряжённости внутреннего электрического поля в точке коллокации M_j^p на поверхности цилиндра; \vec{E}_0^j и \vec{H}_0^j – компоненты возбуждающего поля в точке M_j .

После решения системы (9) необходимые характеристики рассеянного поля определяются из выражений (6). В частности, для компонент рассеянного поля в дальней зоне получаем

$$E_{e,\theta}(M) = \sqrt{\frac{\mu_e}{\epsilon_e}} H_{e,\varphi}(M) = \frac{e^{ik_e R}}{k_e R} D_\theta(\theta, \varphi) + O(R^{-2}),$$

$$E_{e,\varphi}(M) = -\sqrt{\frac{\mu_e}{\epsilon_e}} H_{e,\theta}(M) = \frac{e^{ik_e R}}{k_e R} D_\varphi(\theta, \varphi) + O(R^{-2}), \quad (10)$$

где компоненты диаграммы рассеяния $D_\theta(\theta, \varphi)$ и $D_\varphi(\theta, \varphi)$ определяются выражениями

$$D_\theta(\theta, \varphi) = \frac{i\omega k_e \mu_e}{4\pi} \sum_{n=1}^{N_e} G_{n,e}(\theta, \varphi) \left\{ (\cos \theta \cos \varphi \cos \alpha_1^{n,e} + \cos \theta \sin \varphi \cos \beta_1^{n,e} - \sin \theta \cos \gamma_1^{n,e}) p_{\tau_1}^{n,e} + \right. \\ \left. + (\cos \theta \cos \varphi \cos \alpha_2^{n,e} + \cos \theta \sin \varphi \cos \beta_2^{n,e} - \sin \theta \cos \gamma_2^{n,e}) p_{\tau_2}^{n,e} \right\} + \\ + \frac{i\omega \mu_e}{4\pi} \left(\cos \theta \cos \varphi \cos \alpha_p + \cos \theta \sin \varphi \cos \beta_p - \sin \theta \cos \gamma_p \right) \times \\ \times \sum_{i=1}^{N_p} J_{p,i}^e \int_{l_{p,i-1}}^{l_{p,i}} \exp \left[-ik_e (x'_p \sin \theta \cos \varphi + y'_p \sin \theta \sin \varphi + z'_p \cos \theta) \right] dl_p, \\ D_\varphi(\theta, \varphi) = \frac{i\omega k_e \mu_e}{4\pi} \sum_{n=1}^{N_e} G_{n,e}(\theta, \varphi) \left\{ (-\sin \varphi \cos \alpha_1^{n,e} + \cos \varphi \cos \beta_1^{n,e}) p_{\tau_1}^{n,e} + (-\sin \varphi \cos \alpha_2^{n,e} + \cos \varphi \cos \beta_2^{n,e}) p_{\tau_2}^{n,e} \right\} + \\ + \frac{i\omega \mu_e}{4\pi} (-\sin \varphi \cos \alpha_p + \cos \varphi \cos \beta_p) \sum_{i=1}^{N_p} J_{p,i}^e \int_{l_{p,i-1}}^{l_{p,i}} \exp \left[-ik_e (x'_p \sin \theta \cos \varphi + y'_p \sin \theta \sin \varphi + z'_p \cos \theta) \right] dl_p, \\ G_{n,e}(\theta, \varphi) = \exp \left[-ik_e (x_{n,e} \sin \theta \cos \varphi + y_{n,e} \sin \theta \sin \varphi + z_{n,e} \cos \theta) \right]. \quad (11)$$

В выражениях (11) $\cos \alpha_1^{n,e}, \cos \beta_1^{n,e}, \cos \gamma_1^{n,e}$ и $\cos \alpha_2^{n,e}, \cos \beta_2^{n,e}, \cos \gamma_2^{n,e}$ – направляющие косинусы единичных векторов $\vec{e}_{\tau_1}^{n,e}$ и $\vec{e}_{\tau_2}^{n,e}$; $x_{n,e}, y_{n,e}, z_{n,e}$ – декартовы координаты точки $M_{n,e}$; $\cos \alpha_p, \cos \beta_p, \cos \gamma_p$ – направляющие косинусы осевой линии идеально проводящего цилиндра; x'_p, y'_p, z'_p – декартовы координаты текущей точки интегрирования внутри i -го участка идеально проводящего цилиндра; R, θ, φ – сферические координаты точки наблюдения M .

Контроль точности решения осуществляем путем вычисления относительной нормы невязки граничных условий (3), (4) на сетке точек, промежуточных по отношению к точкам коллокации:

$$\Delta = \sqrt{\Phi' / \Phi_0}, \Phi_0 = \sum_{j=1}^{L'} \left\{ \left[[\vec{n}^j, \vec{E}_0^j] \right]^2 + \frac{\mu_e}{\epsilon_e} \left[[\vec{n}^j, \vec{H}_0^j] \right]^2 \right\}, \quad (12)$$

где Φ' – значение нормы невязки граничных условий (3), (4) на указанной выше совокупности точек, Φ_0 – значение соответствующей нормы падающего поля на этой же совокупности точек; L' – число промежуточных точек.

Численные результаты

На основании изложенного выше подхода была создана программа для расчёта компонент рассеянного поля и контроля точности полученного решения. Предполагалось, что идеально проводящий цилиндр ориентирован вдоль оси z и центр его осевой линии совпадает с началом системы координат. Входными величинами программы являются значения полуосей эллипсоида в длинах волн возбуждающего поля, относительные значения $\epsilon'_i = \epsilon_i / \epsilon_e$ и $\mu'_i = \mu_i / \mu_e$ диэлектрической и магнитной проницаемостей эллипсоида, длина и радиус цилиндра в длинах волн, параметры подобия K_e и K_i , числа точек размещения диполей N_e, N_i и точек коллокации L и L_p для диэлектрического эллипсоида и цилиндра, а также число участков N_p разбиения осевой линии идеально проводящего цилиндра. Предполагается также, что возбуждающее структуру поле выбрано в виде линейно

поляризованной плоской волны, падающей на структуру таким образом, что векторы \vec{k}_e и \vec{E}_0 расположены в плоскости xOz , при этом вектор \vec{k}_e образует с осью z угол ψ , называемый углом падения плоской волны.

Разработанная программа была использована для расчёта характеристик рассеяния ряда конкретных структур. Под характеристиками рассеяния понимаются компоненты рассеянного поля (10), (11), бистатистические сечения рассеяния

$$\sigma(\theta, \varphi) = \lim_{R \rightarrow \infty} \left\{ 4\pi R^2 \left[|E_{e,\theta}(\theta, \varphi)|^2 + |E_{e,\varphi}(\theta, \varphi)|^2 \right] / |\vec{E}_0|^2 \right\}, \quad (13)$$

а также сечения обратного рассеяния.

На рисунках 2-3 представлены некоторые результаты, иллюстрирующие зависимость сечения обратного рассеяния от размеров полуосей эллипсоида при различных углах падения плоской волны ψ . Исходной формой выбрана форма шара, для которого $k_e a = k_e b = k_e c = 3$. Далее величина полуоси $k_e c$ предполагалась неизменной, а величины полуосей $k_e a$ и $k_e b$ менялись по правилу $k_e a = k_e b = k_e c - \Delta$, т.е. шар был превращен в сфероид, размеры полуосей которого $k_e a$ и $k_e b$ постепенно уменьшались. На рис. 2-3 по оси абсцисс отложено значение параметра Δ , по оси ординат – значение сечения обратного рассеяния, нормированное на квадрат длины волны и выраженное в децибелах. Рис. 2 относится к случаю, когда относительная диэлектрическая проницаемость ϵ'_i диэлектрического тела равна 4 и безразмерная длина $k_e l$ идеально проводящего цилиндра равна 4,712 ($l = 0,75\lambda$), а рис. 3 – к случаю, когда $\epsilon'_i = 10$, а $k_e l$, по-прежнему, равна 4,712. Кривые 1 на этих рисунках соответствуют углу падения ψ , равному 45° , кривые 2 – углу падения $\psi = 60^\circ$, кривая 3 – углу падения $\psi = 90^\circ$. При получении этих результатов параметры метода выбраны следующие: $K_e = 0,6$; $K_i = 4$, $N_e = N_i = 400$, $L = 800$.

Анализ результатов, представленных на рис. 2-3, позволяет сделать следующие выводы. Зависимость сечения обратного рассеяния от размеров полуосей эллипсоида зависит от угла ψ падения на рассматриваемую структуру плоской волны. Несмотря на это, при всех рассмотренных углах падения ψ плоской волны изменением полуосей эллипсоида можно существенно уменьшить сечение обратного рассеяния. Например, как показывает рис. 3, при относительной диэлектрической проницаемости ϵ'_i сфероида, равной 4, и длине идеально проводящего цилиндра $k_e l$, равной 4,712, выбирая полуоси сфероида $k_e a$ и $k_e b$, равными 2, можно уменьшить сечение обратного рассеяния более, чем на 10 дБ, по сравнению со случаем, когда диэлектрическое тело является шаром с параметрами $k_e a = k_e b = k_e c = 3$.

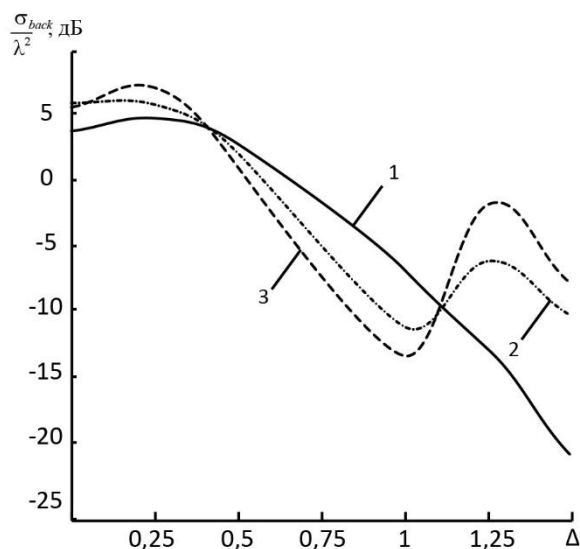


рис. 2. Зависимость сечения обратного рассеяния от размеров полуосей эллипсоида с проницаемостью $\epsilon'_i = 4$ при различных углах ψ падения плоской волны. Кривая 1 соответствует $\psi = 45^\circ$; кривая 2 – $\psi = 60^\circ$; кривая 3 –

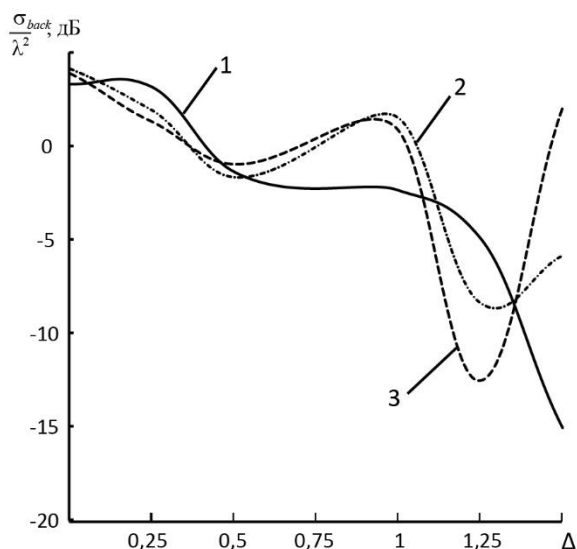


рис. 3. То же, что и на рис.2, но когда эллипсоид характеризуется проницаемостью $\epsilon'_i = 10$

$$\psi = 90^\circ$$

Список публикаций

- [1] Pocklington H.C. *Electrical oscillations in wires* // *Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1897. V. 9. P. 324-337.
- [2] Brill D., Gaunard G.C., Huang H. and Strifors H.C. // *Proc. SPIE's 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual Use Photonics, 1995, Orlando, FL, United States.* 1995. V. 2485. P. 187-196. <https://doi.org/10.1117/12.2113083>.
- [3] Tijhuis A.G., Zhongqui P., Bretones A.R. // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1992. V. 40. P. 1132-1145.
- [4] Дмитренко А.Г., Мукомолов А.И. // *Радиотехника и электроника.* 1995. Т. 40, №6. С. 875-880.
- [5] Дмитренко А.Г., Колчин В.А. // *Известия вузов. Радиофизика.* 2003. Т. 46, № 1. С. 31-40.

Разработка и исследование приемо-передающей системы для СШП скважинного радара

Балзовский Евгений Владимирович

Буянов Юрий Иннокентьевич, Кошелев Владимир Ильич, Некрасов Эдуард Сергеевич

Институт сильноточной электроники СО РАН

e-mail: bev@lhfe.hcei.tsc.ru

Аннотация: Разработан приемо-передающий модуль радара подповерхностной локации, предназначенного для зондирования пространства вокруг скважины диаметром от 120 мм. Модуль состоит из двух цилиндрических сверхширокополосных антенн, обслуживающих угловой сектор 120 градусов в азимутальной плоскости, размещенных в одном диэлектрическом корпусе с электронным блоком с автономным питанием, управляемым с поверхности по оптоволоконной линии. Представлены результаты измерений на стенде с модельной средой.

Скважинный радар является разновидностью радара подповерхностного зондирования, в котором пространственное разрешение вдоль скважины обеспечивается синтезированием апертуры в ходе продольного перемещения зонда, а расстояние до неоднородностей определяется по задержке СШП импульсного излучения. Разработанный радар отличается от существующих тем, что имеет угловое разрешение в азимутальной плоскости за счет применения СШП антенн с выраженной направленностью.

Схема разработанного приемо-передающего модуля представлена на *рис. 1*. Модуль состоит из двух цилиндрических антенн 1 и 2, измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения 3, управляемого по оптической линии связи через цифровой конвертер 4, и автономного источника питания с преобразователем питающих напряжений 5. Модуль выполнен в едином цилиндрическом корпусе и предназначен для опускания в скважину. На поверхности расположен второй оптический конвертер 6, подключаемый к ЭВМ 7 с установленным программным обеспечением для регистрации данных и управления радаром.

Внешний вид приемо-передающего модуля приведен на *рис. 2*. Антенны 1 и 2 выполнены на основе комбинации излучателей электрического и магнитного типов, размещенных в диэлектрической среде, и имеют выраженные направленные характеристики в диапазоне 0.25-1 ГГц. В азимутальной плоскости ширина диаграммы направленности на центральной частоте составляет 120 градусов. При диаметре антенны 120 мм и длине 260 мм в среде с $\epsilon \approx 4$ нижняя граница полосы согласования составляет 180 МГц по уровню КСВН = 2.2. Антенны смонтированы на торцах диэлектрического цилиндра 3, внутри которого расположен электронный блок 4. Оптическая линия 5 не имеет металлических частей и подключается к одному из торцов модуля.

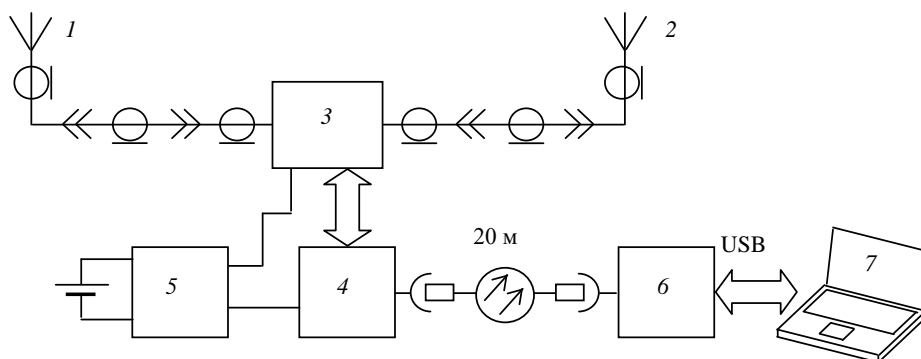


Рис. 1 Схема приемо-передающей системы для сверхширокополосного скважинного радара

Внешний вид электронного блока приведен на *рис. 3*. На алюминиевом теплоотводе закреплён измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения SX5090 «Планар» (1) с полосой сканирования до 9 ГГц и микросекундной скоростью перестройки между частотными точками. Питание осуществляется от литий-полимерной батареи (2) с использованием преобразователей напряжения питания (3). При проведении экспериментов время автономной работы от батареи из шести элементов типа 18650 номинальной емкостью 1.5 А·ч было оценено от 45 минут до 1 часа. Связь с ЭВМ осуществляется через оптический преобразователь (4) со стандартными соединителями SC/UPC. Длина оптической линии может достигать 500 м, в экспериментах использовался отрезок оптического кабеля длиной 20 м. Для автоматизации измерений была написана программа, управляющая измерителем комплексных коэффициентов передачи и отражения посредством стандартных команд, описанных производителем. Программа позволяет автоматически захватывать данные в формате Touchstone, содержащие список частотных точек, модуль и фазу или реальную и мнимую части измеряемых величин коэффициентов отражения и пропускания.

На каждой частоте в диапазоне 0.1-2 ГГц измеряется комплексный коэффициент передачи от антенны 1 к антенне 2. С помощью преобразования Фурье по всему набору частотных точек вычисляется импульс во временной области, содержащий разнесенные во времени области отражения от входов антенн, элементов конструкции и от зондируемых объектов. Перед измерением производится калибровка на однородном участке среды, заключающаяся в вычитании неизменных отражений от элементов корпуса. Изменяющиеся при движении радара в скважине позднейшие отражения соответствуют расстоянию до зондируемых неоднородностей и их отражающей способности. Пересчет во временную область примерно соответствует возбуждению антенн СШП импульсом длительностью 3.5 нс.

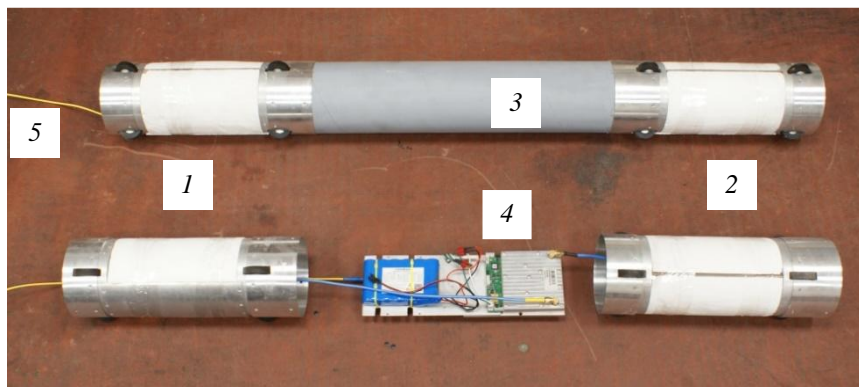


Рис.2 Внешний вид приемо-передающего модуля скважинного радара

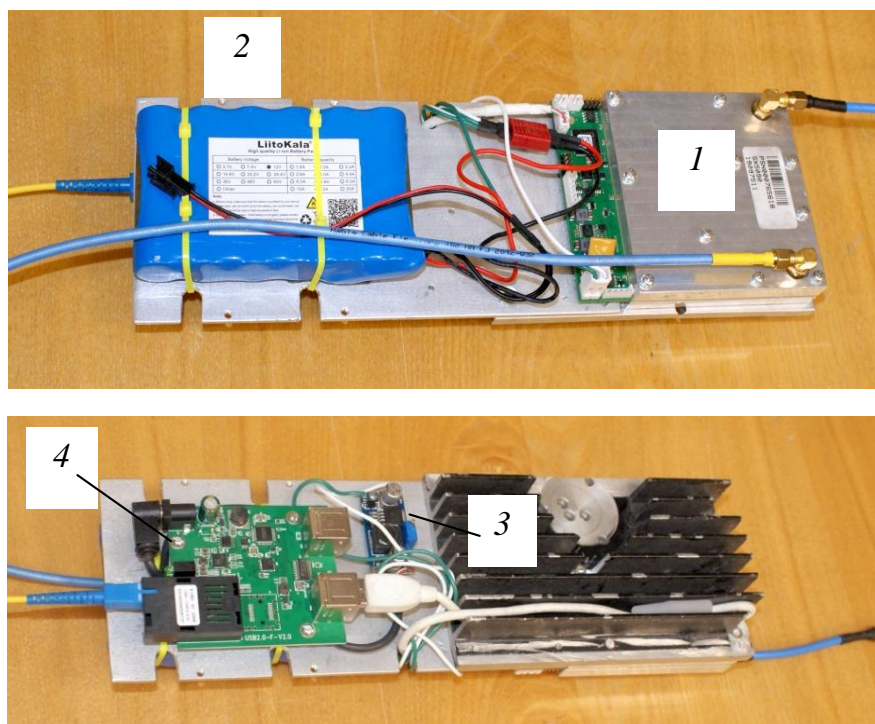


Рис.3 Расположение элементов электронного блока

Для определения параметров приемо-передающего модуля проведены измерения на стенде, состоящем из прямоугольной деревянной емкости 2х1.2х1.2 м, заполненной модельной средой – влажным песком (рис. 4), в которую вставлена тонкостенная пластмассовая труба, выполняющая роль скважины и позволяющая размещать антенны внутри. Расстояние от оси скважины до граней составляет 60 см. Фактическая диэлектрическая проницаемость заполняющей стенд среды определена по изменению времени распространения сигнала между приемной и передающей антеннами при наличии среды и в свободном пространстве при сохранении расстояния между антеннами и составила $\epsilon \approx 3.9$.



Рис. 4. Внешний вид испытательного стенда с модельной средой – увлажненным песком

Выполнены измерения комплексного коэффициента передачи от одной антенны ко второй при перемещении приемо-передающий модуль радара внутри стенда с шагом 5 см. Пересчитанные во временную область данные с помощью указанной выше методики, представляют собой набор импульсов как если бы передающая антенна возбуждалась короткими импульсами напряжения. На рис 5 приведена типичная радиолокационная развертка, где по горизонтальной оси отложено время распространения импульса в среде между антеннами с учетом неоднородностей пространства, а по вертикальной оси – смещение радара вдоль оси скважины. Темные участки на рисунке соответствуют положительным значениям импульса, светлые – отрицательным. Область от 0.5 до 1.7 м соответствует прохождению излучения в среде с $\epsilon \approx 3.9$. Наклонные области в диапазоне расстояний от 0 до 0.5 м и от 1.7 до 2.2 м соответствуют прохождению волны через пространство, часть которого заполнена модельной средой, а часть – воздухом, что вызывает изменение скорости волны и, соответственно, изменение времени распространения излучения от передающей антенны к приемной. Наклонные штрихоподобные линии в центре рисунка соответствуют отражению от границы раздела среда-воздух на торцах стенда.

Размещение на верхней поверхности стенда отражающего объекта – цилиндра диаметром 250 мм и длиной 600 мм – приводило к появлению отражений в интервале времени, соответствующему двойному пробегу волны в среде до объекта. Разрешающую способность радара в модельной среде на небольших расстояниях до объекта можно оценить как 0.4-0.6 м. Сканирование с повернутым на 180 градусов по оси скважины приемо-передающим модулем приводило к появлению отражения от бетонного пола под стендом, при этом отражений от металлического цилиндра, расположенного на верхней поверхности стенда, не наблюдалось из-за выраженной направленности антенн модуля.

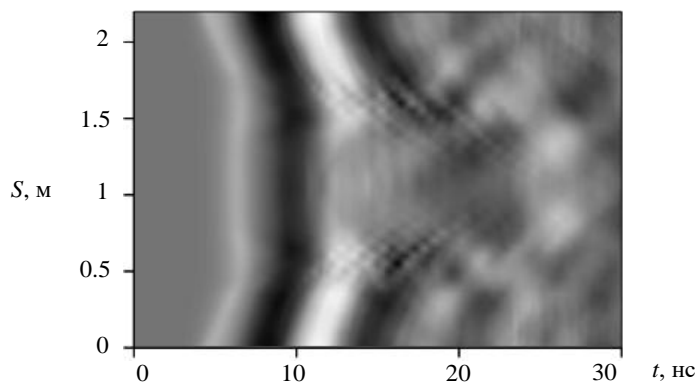


Рис. 5. Сканирование стенда с модельной средой

Разработан приемо-передающий модуль радара подповерхностной локации, предназначенного для зондирования пространства вокруг скважины диаметром от 120 мм. Модуль состоит из двух цилиндрических сверхширокополосных антенн, обслуживающих угловой сектор 120 градусов в азимутальной плоскости, размещенных в одном диэлектрическом корпусе с электронным блоком с автономным питанием, управляемым с поверхности по оптоволоконной линии

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWRM-2021-0002).

Минимизация коэффициентов передачи электромагнитных волн между излучающими объектами**^{1,2}Бузова Мария Александровна,**^{1,2}Кузнецов Яков Михайлович, ^{1,2}Нещерет Анатолий Михайлович¹АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем»,²ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

E-mail: bma@siprs.ru

В сложных излучающих и переизлучающих системах весьма часто возникают задачи минимизации взаимодействия между элементами данных систем [1]. Данные задачи особенно актуализируются в тех случаях, когда излучающие объекты расположены компактным образом, а также когда системы в целом располагаются над подстилающими поверхностями, в частности, идеально проводящими, которые, как правило, за счет переотражений лишь увеличивают взаимное влияние между элементами. Одним из наиболее распространенных и хорошо апробированных путей решения поставленных задач является применение методов оптимизации размещения излучающих объектов с использованием соответствующих целевых функций [2]. В частности, в качестве целевой функции для решения данных задач может быть выбрано наименьшее значение из коэффициентов передачи электромагнитных волн между излучающими объектами в системах.

Итак, рассмотрим сложную систему, состоящую из пяти излучающих объектов (A1 – A5) и расположенную над идеально проводящей поверхностью конечных размеров. Определим коэффициент передачи (в дБ) между излучающими объектами как отношение напряжения, наводимого в зазоре пассивного излучающего элемента, $U_{прм}$ к напряжению, подаваемому в зазор активного излучающего элемента, $U_{прд}$:

$$\gamma = 20 \lg \left| \frac{U_{прм}}{U_{прд}} \right|, \text{ дБ.} \quad (1)$$

Определим минимизируемую целевую функцию следующим образом:

$$F(\vec{X}) = \sum_{n=1}^5 \sum_{k=1}^5 \sqrt{\left| \gamma_{nk}(\vec{X}) - \gamma_{nk}^0(\vec{X}) \right|^2}, \quad (2)$$

где γ_{nk} – фактический уровень коэффициента передачи между n -м и k -м объектами; γ_{nk}^0 – целевой уровень коэффициента передачи.

Далее, рассмотрим некоторые результаты исследований. В таблице 1 показаны коэффициенты передачи между излучающими объектами до оптимизации, а в таблице 2 – после. При этом целевой уровень коэффициента передачи был выбран –20 дБ.

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	-	–26,5	–19,6	–23,1	–27,5 / –27,2
A2	–24,2	-	–18,2	–22,6	–29,4 / –29,7
A3	–20	–18,5	-	–21,7	–22,1 / –22,8
A4	–25	–20,5	–21,4	-	–21,9 / –21,8
A5	–27,4	–29,8	–22,6	–21,5	-

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	-	–28,5	–21,6	–26,4	–30,4 / –30,2
A2	–26,2	-	–20,2	–25,6	–33,4 / –33,7
A3	–22	–20,5	-	–25,7	–26,6 / –26,8
A4	–28	–23,5	–25,5	-	–22,9 / –22,8
A5	–30,4	–33,8	–26,6	–22,5	-

Из представленных результатов видно, что благодаря предложенному подходу удалось разместить излучающие объекты в системе таким образом, чтобы удовлетворить всем заданным требованиям.

Список публикаций:

[1] Бузова М.А., Филиппов Д.В., Юдин В.В. // Известия ВУЗов. Физика. 2012. № 9/2. С. 70.

[2] Бузова М.А. // Сборник докладов 79-й всероссийской конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». Москва, РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2024. С. 28.

Моделирование входного импеданса проволочной аperiodической антенны КВ-диапазона с различными конструкциями оконечных нагрузок**Бучельников Антон Викторович**

АО «ОНИИП»

ИРФЭ ОНЦ СО РАН

E-mail: tony-602@mail.ru

Широкое распространение при работе радиолиний в КВ-диапазоне на трассах различной протяженности получили аperiodические антенны, представляющие собой систему токонесущих проводников, размещенных на некоторой высоте над землей и нагруженных на сопротивление, равное волновому сопротивлению излучателя.

В известных автору данной работы источниках, моделирование (расчет) импеданса проволочных антенн производится по входу излучателя антенны, что приводит к несоответствию входного импеданса между моделью и изготовленной антенной, т.к. последняя может содержать элементы, трансформирующие ее импеданс – линии снижения (кабельные, двухпроводные, коаксиальные и т.д.), различные высокочастотные переходы и сочленения, а также устройства симметрирования и/или согласования. Кроме этого оконечная нагрузка, как правило, задается как резистивная нагрузка без потерь, что не соответствует действительности.

Целью данной работы является сравнительный анализ частотных характеристик входного импеданса антенны, с учетом влияния фидерной линии, устройства согласующего симметрирующего (УСС) и четырех вариантов исполнения оконечной нагрузки, полученные в результате моделирования.

В данной работе в качестве объекта исследования выступала антенна «Наклонная V-образная» [1] с длиной плеча 60 м, подвешенная на мачту высотой 12 м. Сопряжение симметричного выхода антенны с несимметричным входом передатчика обеспечивалось применением фидерной линии, которая представляла собой двухпроводную 600-Омную линию длиной 22 м, и УСС с коэффициентом трансформации 1:12. Плечи снизу были нагружены на оконечные нагрузки (рис.1).

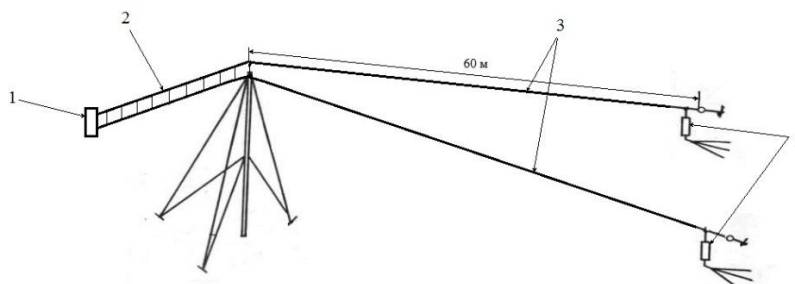


Рис. 1 Схематичный вид антенны, где 1 – устройство согласующее симметрирующее, 2 – фидерная линия, 3 – плечи, 4 – оконечные нагрузки

В рамках данной работы были рассмотрены четыре варианта исполнения оконечной нагрузки:

- нагрузки, выполненные из восьми последовательно включенных керамических резисторов номиналом 75 Ом, помещенных в корпус и залитых маслом. Применяются в передающих антеннах мощностью до 5 кВт;
- нагрузки, выполненные из восьми последовательно включенных керамических резисторов номиналом 75 Ом, помещенных в корпус с воздушным охлаждением. Применяются в передающих антеннах мощностью до 1 кВт;
- нагрузки, выполненные из одного резистора номиналом 600 Ом, помещенный в диэлектрический корпус. Применяются в приемных антеннах;
- нагрузки, заданные как резистивные нагрузки без потерь;

Для получения частотных характеристик активной и реактивной частей импеданса оконечных нагрузок были проведены измерения их импеданса. Для проведения измерений каждый вариант исполнения нагрузок разворачивали на открытой площадке. Измерение входных параметров, проводилось с использованием векторного анализатора цепей. Перед измерением анализатор цепей устанавливали в режим измерения активной и реактивной составляющих полного сопротивления R_e и Im в диапазоне частот от 1,0 до 31,0 МГц. Выполнялась калибровка прибора в соответствии с техническим описанием и инструкциями на прибор. Изначально проводилось измерение реактивной составляющей Im входного сопротивления. По показаниям прибора в диапазоне частот 1,5-30 МГц с шагом 0,5 МГц фиксировалось значение реактивной составляющей импеданса оконечной нагрузки. Затем проводилось измерение активной составляющей R импеданса оконечной нагрузки на тех же частотах. (рис.2).

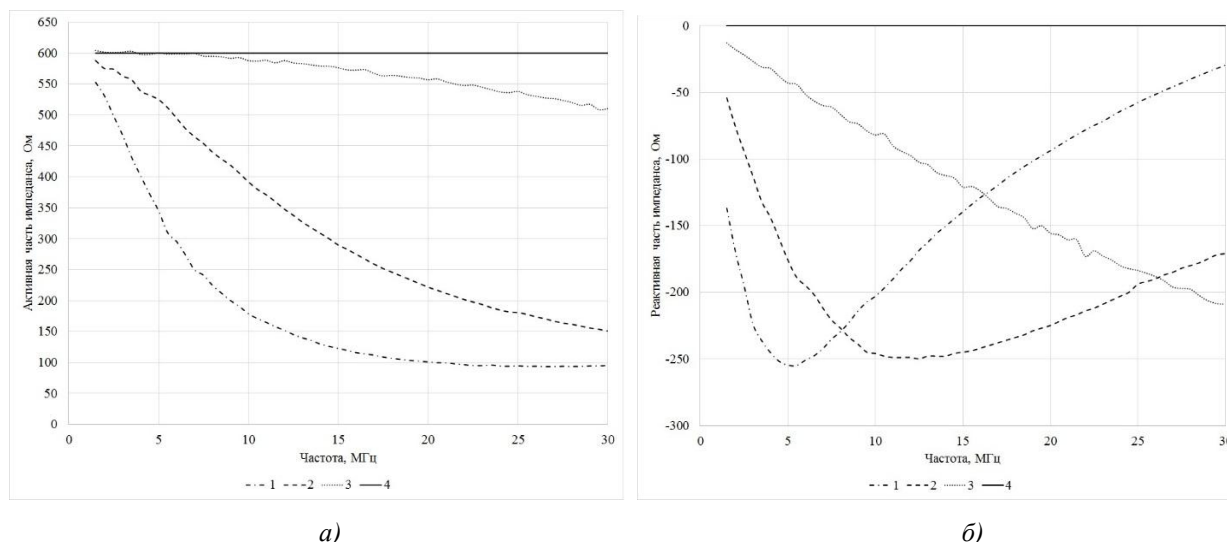


Рис.2 Частотная характеристика активной (а) и реактивной (б) частей импеданса нагрузок (1 – нагрузка 5 кВт, 2 – нагрузка 1 кВт, 3 – нагрузка приемная, 4 – резистивная нагрузка без потерь)

Далее было проведено поэтапное моделирование рассматриваемой системы по методике описанной в работах [2-4]. На первом этапе была рассмотрена упрощенная модель антенны, представленная в виде двух лучей длиной 60 метров с точкой питания, расположенной на высоте 12 метров. Луч представлял собой алюминиевый провод диаметром 4 мм. Снизу лучи подключались к комплексным нагрузкам, которые задавались согласно значениям, полученным при измерении импеданса оконечных нагрузок для соответствующей частоты.

На втором этапе, который в ряде случаев может быть объединен с первым, был проведен расчет и моделирование двухпроводной линии длиной 22 метра, выполненной из алюминиевого провода диаметром 4 мм. В верхней точке двухпроводная линия была подключена к комплексной нагрузке, значения которой соответствовали результатам, полученным на первом этапе для соответствующей частоты.

Моделирование антенны и двухпроводной линии проводилось в свободно распространяемом программном обеспечении NEC-2 for MMANA, использующим модель Зоммерфельда-Нортон для расчета антенн над реальной почвой. Для моделирования использовались параметры средней почвы (встречающейся на практике чаще всего) со значениями $\epsilon = 13$; $\sigma = 5$ мСм/м.

На третьем этапе проводился расчет импеданса на выходе согласующего симметрирующего трансформатора T_1 (рис. 3), с подключенной комплексной нагрузкой в виде двухполюсника, содержащего активную (R_1) и реактивную (C_1, L_1) часть импеданса антенны со второго этапа моделирования.

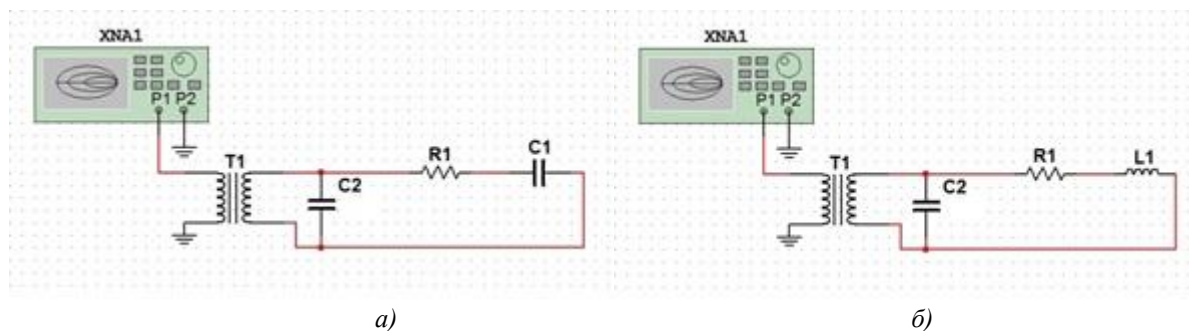


Рис.3 Схема расчета импеданса на выходе симметрирующего трансформатора антенны для случая импеданса с емкостной реактивной частью (а) и с индуктивной реактивной частью (б)

Значения реактивной составляющей входного импеданса, полученные на этапе моделирования фидерной линии, пересчитывались в эквивалентные значения индуктивности C_1 или емкости L_1 по следующим формулам [5]:

$$L_1 = \frac{X_A}{2\pi f}; \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f X_A} \quad (2)$$

Значения активной части импеданса антенны R_1 выбирались из результатов моделирования активной

составляющей входного импеданса, полученных на втором этапе для соответствующей частоты. Паразитная емкость C_2 , возникающая между обмотками трансформатора, на переходах и соединителях фидерной линии была принята на уровне 20 пФ исходя из проведенных авторами работы измерений макета устройства симметрирования и применяемых для подключения переходов. Расчет проводился в программном обеспечении для моделирования и анализа электрических схем.

В результате проведенного моделирования были получены частотные зависимости активной и реактивной составляющей входного импеданса антенны «Наклонная V-образная» с учетом влияния фидерной линии и УСС для четырех вариантов исполнения оконечной нагрузки (рис. 4-6).

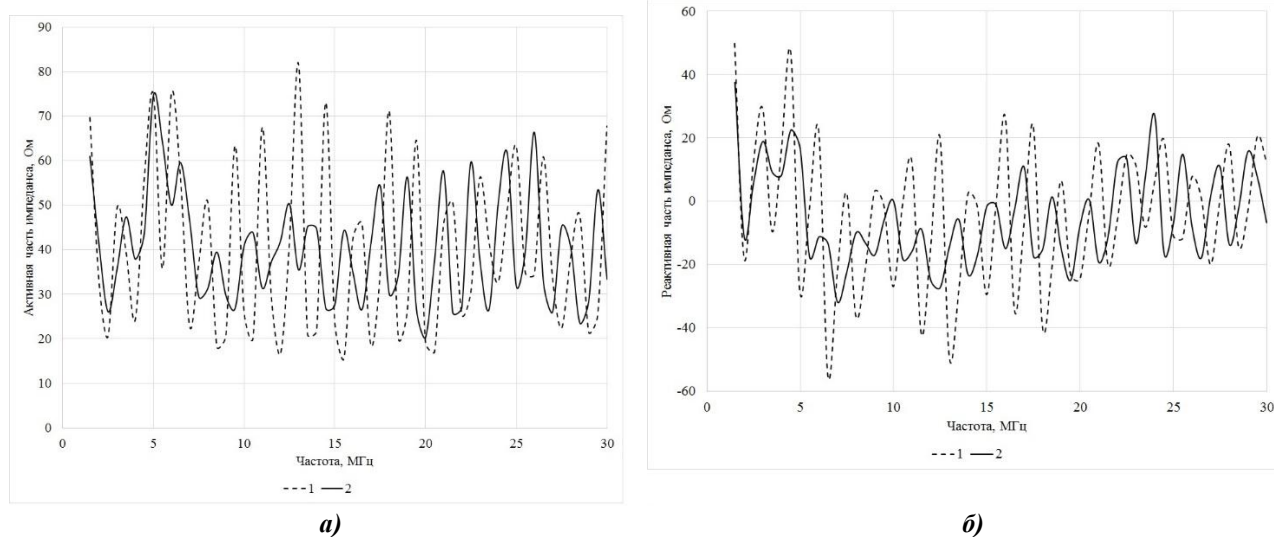


Рис.4 Частотная характеристика активной (а) и реактивной (б) частей импеданса антенны «Наклонная V-образная VH 60/12», полученные в результате моделирования для нагрузки 5 кВт (1) и резистивной нагрузки без потерь (2)

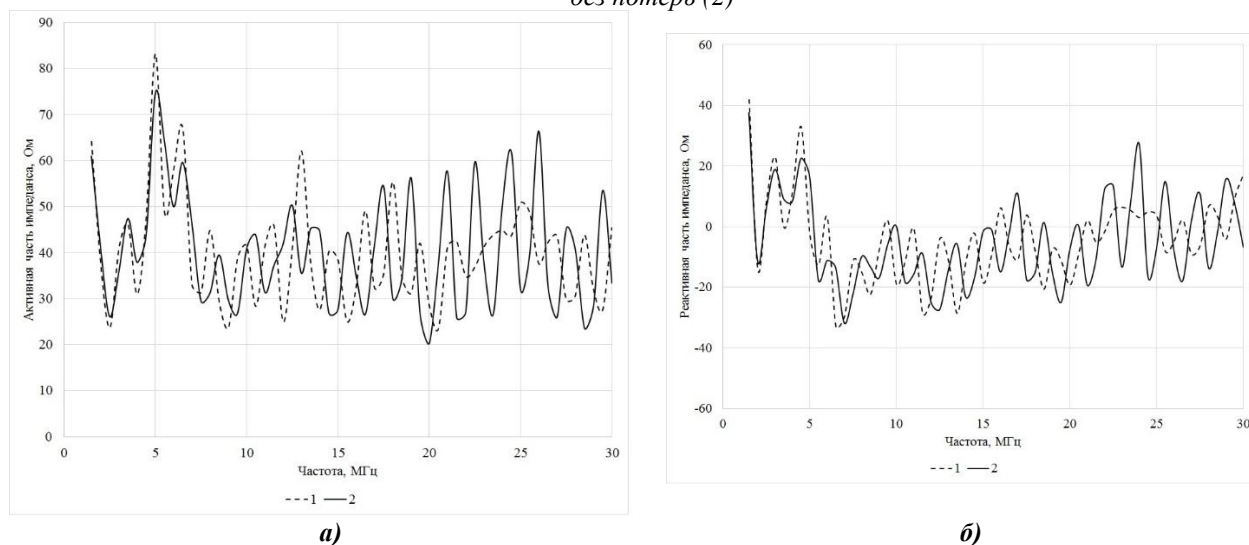


Рис.5 Частотная характеристика активной (а) и реактивной (б) частей импеданса антенны «Наклонная V-образная VH 60/12», полученные в результате моделирования для нагрузки 1 кВт (1) и резистивной нагрузки без потерь (2)

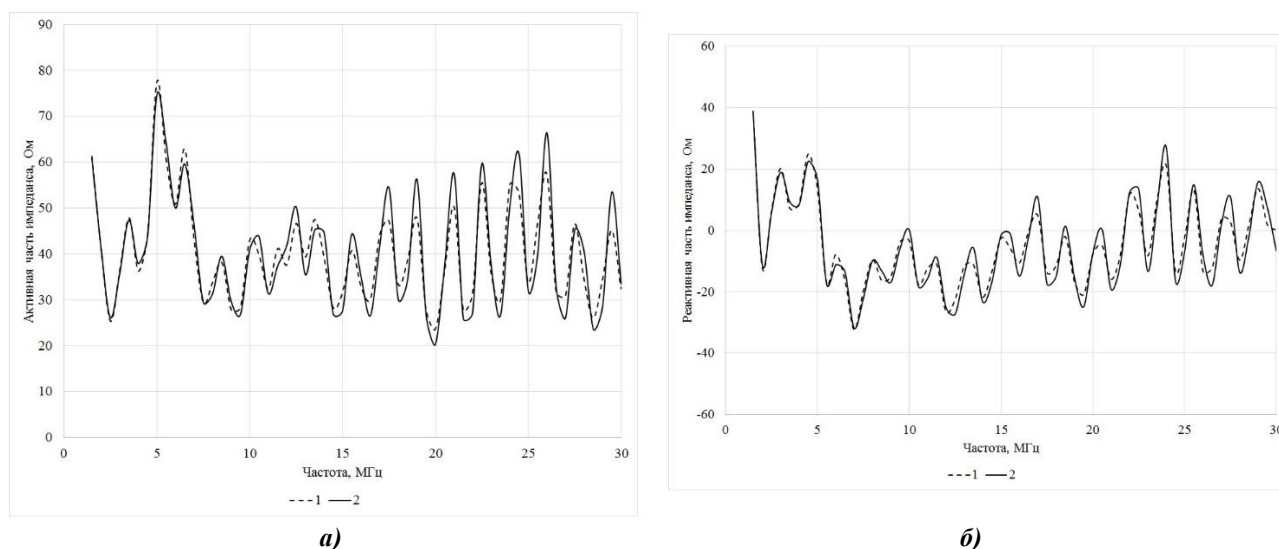


Рис.6 Частотная характеристика активной (а) и реактивной (б) частей импеданса антенны «Наклонная V-образная VH 60/12», полученные в результате моделирования для нагрузки приемной антенны (1) и резистивной нагрузки без потерь (2)

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Во-первых, как видно из рисунка 6, при моделировании антенн с оконечными нагрузками простой конструкции, например, приемной нагрузкой с одним резистором, можно применять резистивные нагрузки без потерь. Для более сложных конструкций оконечной нагрузки рекомендуется применять собственные измеренные значения импеданса применяемой нагрузки, либо типовые значения для такого типа конструкции. Расхождение амплитудных значений для активной и реактивной частей импеданса могут достигать десятков Ом.

Во-вторых, учет влияния фидерной линии и УСС, а также учет частотного изменения активной и реактивной составляющей оконечной нагрузки на этапе моделирования позволяет получить более точные частотные характеристики активной и реактивной части входного импеданса проектируемой антенны.

В-третьих, включение дополнительного конденсатора позволяет в некоторой степени имитировать паразитную емкость, возникающую между обмотками трансформатора, на переходах, соединителях фидерной линии и др., но ее значение может отличаться в зависимости от конструкции антенны и устройства трансформации.

Полученная с применением данной методики частотная зависимость импеданса модели антенны при грамотном учете паразитных параметров элементов трансформации будет в значительной мере приближена к частотной зависимости импеданса изготовленной антенны.

Работа выполнена в рамках государственного задания ОНЦ СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Список публикаций:

- [1] Гвоздев И.Н., Муравьев Ю.К., Серков В.П., Чернолес В.П. Характеристики антенн радиосистем связи. Ленинград: Изд. ВАС, 1978. 231 с.
- [2] Бучельников А. В., Агарков Н. Е., Жусупов Т. К. Моделирование входного импеданса проволочной антенны КВ-диапазона с учетом элементов трансформации // Техника радиосвязи. - 2024. - № 1. - С. 29-40.
- [3] Бучельников А. В. Моделирование входного импеданса проволочной аperiодической антенны КВ-диапазона с учетом элементов трансформации // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества (РФИВ-2024) : тезисы докладов III Российской научной конференции (Омск, 8-10 октября 2024 г.). - 2024. - С. 139-141.
- [4] Бучельников А. В., Жусупов Т. К. Метод учета влияния обмоток широкополосного трансформатора при моделировании входного импеданса проволочной антенны КВ-диапазона // Радиотехника, электроника и связь (РЭС-2023) : тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции, Омск, 4-6 октября 2023 г. - 2023. - С. 89-92.
- [5] Григоров И.Н. Антенны. Настройка и согласование. – М.: ИП РадиоСофт, 2003 – 272 с.

Эффективный подход к исследованию электрически малой сверхширокополосной полусферической спиральной антенны

Дымов Георгий Александрович

Беличенко Виктор Петрович

Запасной Андрей Сергеевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

e-mail: dymazhorov@gmail.com

Введение

Спиральные антенны уже давно используются на практике в качестве широкополосных антенн эллиптической поляризации, обладающих стабильными характеристиками в широком диапазоне частот [1-4]. В то же время, миниатюризация различных радиоэлектронных средств каналов связи постоянно выдвигает проблему создания малогабаритных антенн. Предпочтение, отдаваемое зачастую спиральным антеннам, обусловлено целым рядом обстоятельств: они могут быть выполнены в виде невыступающих или низкосилуэтных антенн, интегрированных с системой питания или усилителем принимаемого сигнала; их характеристики в меньшей степени, чем характеристики ряда других типов антенн, подвержены поляризационным вариациям принимаемого сигнала; использование спиральных антенн с ортогональными поляризациями в значительной степени может решить проблему электромагнитной совместимости близкорасположенных антенн независимых каналов связи. Немаловажным является и то, что при изготовлении антенны может эффективно применяться печатная технология, обеспечивающая высокие точность изготовления и воспроизводимость электрических характеристик.

Среди электрически малых спиральных антенн особое место занимают сферические и полусферические спиральные антенны [5-9]. Интерес к ним в свое время объяснялся тем, что они имеют очень широкую диаграмму направленности по уровню половинной мощности, и круговую поляризацию поля излучения в некоторой полосе частот. Затем, было обращено пристальное внимание на то, что они характеризуются также наиболее полным использованием предоставленного вмещающего объема. Это с общей точки зрения влекло за собой снижение добротности излучения антенны и, следовательно, расширение полосы рабочих частот, что все более и более становится актуальным в последнее время.

Так, например, в работе [9] проводится сравнение электродинамических характеристик нескольких электрически малых саморезонансных проволочных спиральных антенн. Сравнивались резонансные частоты, сопротивления излучения и добротности излучения в зависимости от полной длины проволочного элемента, геометрии антенны и занимаемого ею эффективного объема. Как оказалось, резонансные свойства антенн напрямую зависят от эффективной высоты и эффективного объема антенны, которые определяются как полной длиной проволочного элемента, так и геометрией. Причем, когда полная длина проволочных элементов и геометрия антенн сконфигурированы так, что антенны имеют одинаковую эффективную высоту и объем, то их резонансные свойства, по существу, идентичные, независимо от каких-либо различий в полной длине проволочных элементов и геометрии.

1. Геометрия антенны и основные результаты оптимизации ее параметров на основе традиционного подхода

В [10, 11] проведено систематическое исследование уникальной по достигнутым характеристикам антенны, содержащей шестизаходную электрически малую полусферическую спиральную структуру с помещенным внутри нее коническим монополем (рис. 1). При пояснении примененной стратегии приближения антенны к фундаментальным пределам по размерам, полосе рабочих частот и коэффициенту усиления указывается на то, что предыдущие исследования были сосредоточены на электрически малых резонансных антеннах. Причем использовалась концепция идеальной антенны по Чу, а частотная характеристика антенны исследовалась на основе предложенной Чу эквивалентной схемы для сферических мод. В [10, 11] показано, что передаточная функция идеальной антенны, отражающая ее сверхширокополосные свойства, просто представляет собой сочетание целой функции и функции с двумя комплексными полюсами.

И теоретически и экспериментально продемонстрировано, что по параметру КСВН антенна обладает прекрасными характеристиками: в полосе частот от 2 до 9,7 ГГц значение этого параметра не превосходит 2, а далее – вплоть до 20 ГГц – 2,5. При этом ее высота составляет 0,125 длины волны на нижней частоте при реализуемой полосе частот 10:1. Высота структуры – 15,9 мм, диаметр сечения проволочных элементов – 0,5 мм, высота конического монополя с закругленным основанием – 12 мм.

В данной работе теория характеристических мод (ТХМ) [12-14] используется для того, чтобы, во-первых, с иных позиций, чем в [10, 11], пояснить широкополосные свойства изученной в этих работах антенны. Во-вторых, подчеркнуть плодотворность стратегии ТХМ при выявлении физических особенностей процесса излучения сложных проволочных спиральных структур. Дело в том, что ТХМ применяется, главным образом,

для анализа плоских антенн. Имеется только несколько примеров применения этой теории для 3D антенн, в частности сверхширокополосных. Отчасти это вызвано значительно возрастающими трудностями при их анализе.

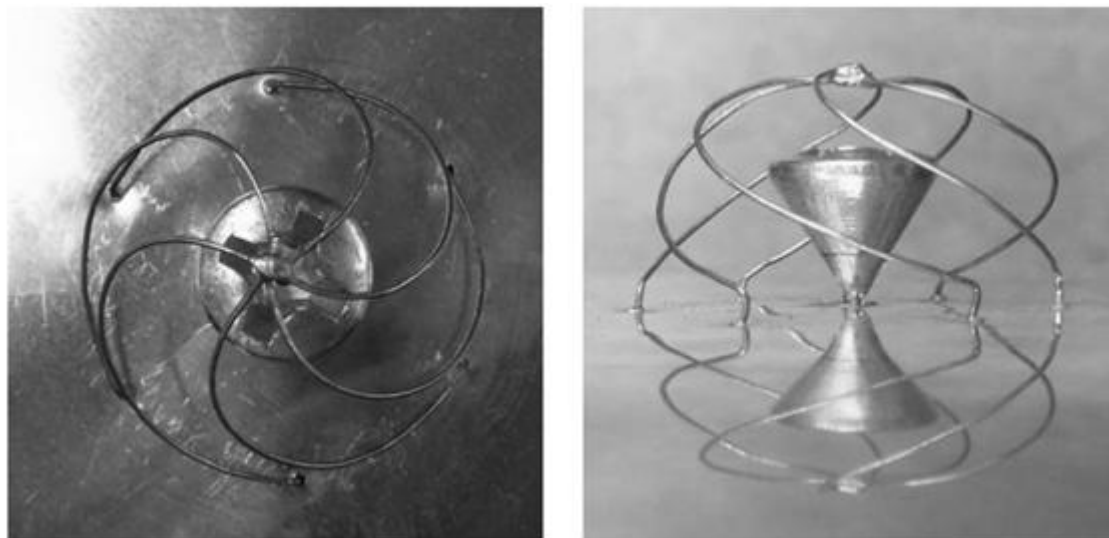


Рис. 1. Экспериментальный макет электрически малой сверхширокополосной полусферической спиральной антенны [10, 11]: вид сверху (слева), вид сбоку (справа)

2. Процедура исследования на основе теории характеристических мод

Геометрия компьютерной модели антенны схематически изображена на рис. 2.

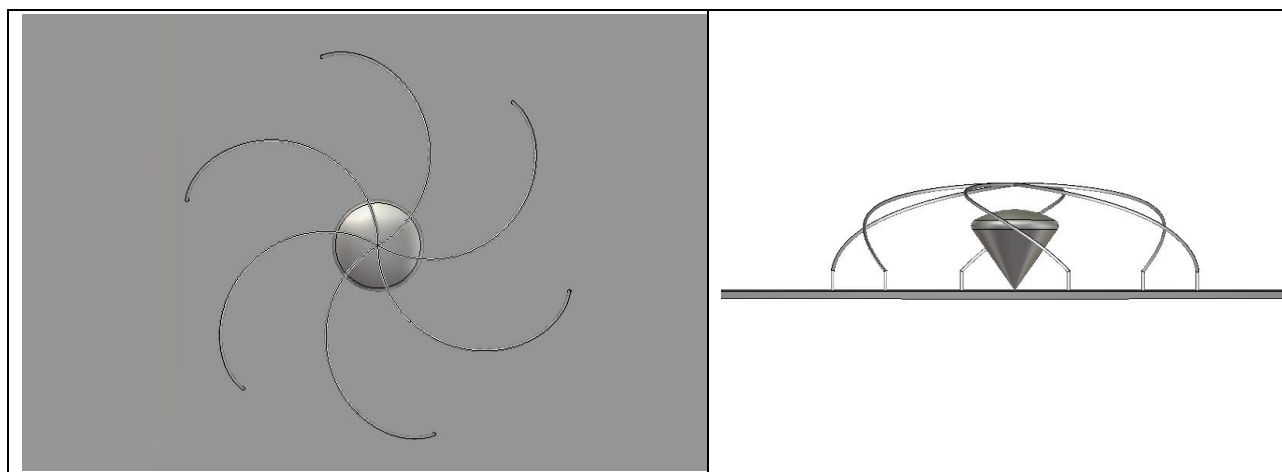


Рис. 2. Компьютерная модель электрически малой сверхширокополосной полусферической спиральной антенны, исследованной в [10, 11]: вид сверху (слева), вид сбоку (справа)

Частотные зависимости характеристических углов мод 1, 2, 4 для шестизаходной спиральной структуры представлены на рис. 3. Отметим, что она обладает поворотной осью симметрии шестого порядка, и наличие в ней замкнутых траекторий движения токов означает возможность существования вырожденных мод. В частности, из рис. 3 видно, что моды 1 и 2 являются вырожденными. До частоты 3,274 ГГц своего резонанса они имеют емкостной характер, а затем становятся индуктивными. Расхождение после 9 ГГц кривых, изображающих частотные зависимости характеристических углов этих мод, вызвано погрешностями задания геометрии спиральных проводников. Мода 4 является невырожденной. До частоты своего резонанса 2,235 ГГц и после нее она ведет себя подобно модам 1 и 2.

Рис. 3 показывает, что осцилляции в частотных зависимостях модальных значимостей мод 1 и 2 в интервале 2-8 ГГц «выравниваются» осцилляциями противоположного характера в частотной зависимости модальной значимости моды 4. За счет этого обеспечивается, с одной стороны, хорошее качество согласования в широкой полосе частот, а с другой стороны – также и стабильность диаграммы направленности антенны.

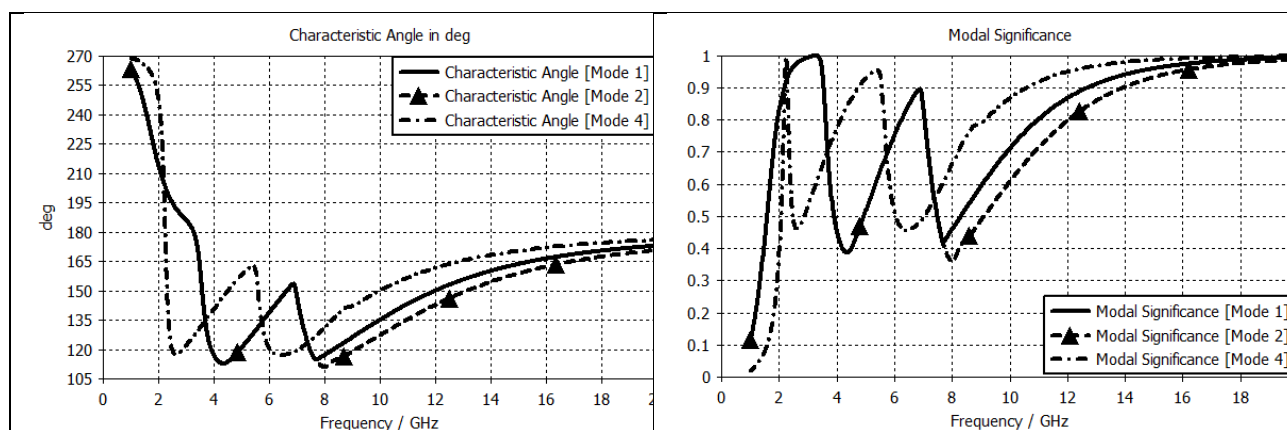


Рис. 3 Частотные зависимости характеристических углов (слева) и модальных значимостей (справа)

Проведенный нами расчет распределений плотностей токов мод 1 и 2 на частоте 3,274 ГГц их резонанса отчетливо продемонстрировал вырожденность этих мод. Они представляют одинаковые распределения токов, но сдвинутые по фазе на 60° . Большие значения на спиральных заходах плотности токов принимают в достаточно широкой приполярной области полусферы и в окрестности контакта с земляной плоскостью. Отмеченные особенности в распределении плотностей токов подчеркивают рациональность выбора авторами [10, 11] в качестве линии возбуждения конического монополя. Им удалось оптимальным образом подобрать угловой раскрыв конического монополя и промежуток между его сферическим сегментом на основании монополя и полюсом спиральной структуры. В результате оказалась обеспеченной эффективная емкостная связь между основанием монополя и приполярной областью спиральной структуры, с большими значениями плотностей токов мод 1 и 2. Следы не идентичности распределений токов этих мод по заходам структуры должны были найти отражение и в их диаграммах направленности.

Характер распределения плотности тока невырожденной моды 4 на частоте 2,235 ГГц ее резонанса существенно отличается от такового для мод 1 и 2. В данном случае распределение имеет минимум в полюсе спиральной структуры и максимальное значение в «приэкваториальной» области. Более того, распределения токов идентичны на всех шести заходах структуры. Следовательно, от диаграммы направленности данной моды можно было ожидать очень хорошей симметрии в азимутальной плоскости.

Расчеты показали, что специфика распределений плотностей токов отдельных мод действительно находит отражение в их диаграммах направленности. Несмотря на отсутствие у диаграмм направленности мод 1 и 2 выраженной азимутальной симметрии, их суммарная диаграмма направленности демонстрирует лучшую симметричность. В целом же, как показывают представленные в [10, 11] результаты теоретических расчетов и проведенных экспериментальных исследований, диаграмма направленности антенны характеризуется стабильностью в полосе частот 2-20 ГГц; имеет место хорошая равномерность излучения в азимутальной плоскости; в зенитном направлении ($z > 0$) излучение несколько снижается по мере роста частоты.

Заключение

Из результатов данной статьи видно, что успех авторов работ [10, 11] был связан во многом с тем, что в рамках предложенного ими конструктивного выполнения антенны и питающей ее линии, было обеспечено возбуждение требуемых характеристических мод. Проведенный в данной работе анализ на основе теории характеристических мод позволил определить значимые моды, свойства которых в сочетании обеспечивают достижение широкополосного согласования и стабильности диаграммы направленности антенны. Отметим, что нами были использованы только основные, наиболее информативные, атрибуты ТХМ. Попытки расширения возможностей применения характеристических мод предпринимаются постоянно, особенно в последнее время. О чем свидетельствует, в частности, содержание [15] и [16-20], опубликованных в специальном номере журнала *IEEE Antennas and Propagation Magazine*.

Список публикаций:

- [1] Рамзей В. Частотно независимые антенны / под. ред. А.Ф. Чаплина. – М.: Мир, 1968. – 176 с.
- [2] Сверхширокополосные антенны: Сб. перев. под ред. канд. техн. наук Л.С. Бененсона. – М.: Мир, 1964. – 416 с.
- [3] Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. – М.: Сов.радио, 1974. – 223 с.
- [4] Nakano H. Helical and spiral antennas. – A numerical approach. – New York: Wiley, 1987. – 261 p.
- [5] Cardoso J.C., Safaai-Jazi A. Spherical helical antenna with a circular polarization and a broad beam. // *Electronics Letters*. – 1993. – Vol. 29, No. 4. – pp. 325-326.
- [6] Safaai-Jazi A., Cardoso J.C. Radiation characteristics of a spherical helical antenna. // *IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propag.* [IEE Proc. H]. – 1996. – Vol. 143, No. 1. – pp. 7-12.
- [7] Alsawaha H.W., Safaai-Jazi A. Ultrawideband hemispherical helical antennas // *IEEE Trans. on Antennas and Propag.* – 2010. –

Vol. 58, No. 10. – pp. 3175-3181.

[8] Best S.R. *The radiation properties of electrically small folded spherical helix antennas* // *IEEE Trans. on Antennas and Propag.* – 2004. – Vol. 52, No. 4. – pp. 953-960.

[9] Best S.R. *A discussion on the properties of electrically small self-resonant wire antennas* // *IEEE Antennas and Propag. Magazine.* – 2004. – Vol. 46, No. 6. – pp. 9-22.

[10] Yang T., Davis W. A., Stutzman W. L. *Fundamental-limit perspectives on ultrawideband antennas* // *Radio Science.* – 2009. – Vol. 44, No. 1. – pp. 1-8.

[11] Yang T.-Y. *Fundamental limits on antenna size for frequency and time domain applications* / *Dissertation...Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University.* – 2012. – 255 p.

[12] Cabedo-Fabres M., Antonino-Daviu E., Valero-Nogueira A., Bataller M. *The theory of characteristic modes revised: a contribution to the design of antennas for modern applications* // *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol.49, no. 5, pp. 52-68, 2007.

[13] Chen Y., Wang C.-F. *Characteristic Modes: Theory and Applications in Antenna Engineering.* Wiley, Hoboken, New Jersey, 2015.

[14] Vogel M., Gampala D., Ludick D., Jakobus U., Reddy C. J. *Characteristic mode analysis: putting physics back into simulation* // *IEEE Antennas Propag. Mag.* – 2015. – Vol. 57, No. 2. – pp. 307-317.

[15] Tayli D., Capek M., Akrou L., Losenicky V., Jelinek L., Gustafsson M. *Accurate and Efficient Evaluation of Characteristic Modes* // *IEEE Trans. on Antennas and Propag.* – 2018. – Vol. 66, No. 12. – pp. 7066-7075.

[16] Lau B.K., Capek M., Hassan A.M. *Characteristic modes: Progress, overview, and emerging topics* // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – 2022. – Vol. 64, no. 2. – pp. 14-22.

[17] Capek M., Schab K. *Computational aspects of characteristic mode decomposition: An overview* // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – 2022. – Vol. 64, no. 2. – pp. 23-31.

[18] Adams J.J., Genovesi S., Yang B., Antonino-Daviu E. *Antenna element design using characteristic mode analysis: Insights and research directions* // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – 2022. – Vol. 64, no. 2. – pp. 32-40.

[19] Li H., Chen Y., Jakobus U. *Synthesis, control, and excitation of characteristic modes for platform-integrated antenna designs: A design philosophy* // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – 2022. – Vol. 64, no. 2. – pp. 41-48.

[20] Manteuffel D., Lin F.H., Li T., Peitzmeier N., Chen Z.N. *Characteristic mode-inspired advanced multiple antennas: Intuitive insight into element-, interelement-, and array levels of compact large arrays and metantennas* // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – 2022. – Vol. 64, no. 2. – pp. 41-48.

Исследования ячейки для измерения диэлектрической проницаемости почв на базе разомкнутого отрезка симметричной полосковой линии

Костычев Юрий Александрович¹

Бобров Павел Петрович^{1,2}

Родионова Ольга Васильевна²

¹Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

²Омский государственный педагогический университет

E-mail: fatnblan@mail.ru

При дистанционном исследовании почв микроволновыми методами необходима информация о диэлектрических свойствах почв в поверхностном слое. Согласно исследованиям [1,2], глубина зондирования на частоте 1,4 ГГц (рабочая частота спутниковых радиометров SMOS и SMAP) составляет от 1 см для влажных почв до 5-7 см для сухих почв. Недавно было отмечено наличие систематической ошибки в результатах измерения влажности радиометром SMAP [3]. Для проведения более масштабных измерений влажности в слое толщиной, соответствующей глубине микроволнового зондирования, необходимо было создать простые в изготовлении датчики.

Нами были разработаны две ячейки для измерения спектров комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почв в полевых условиях на базе разомкнутых отрезков симметричной полосковой линии (СПЛ) с расстоянием между внешними электродами 60 и 28,5 мм. Большие размеры поперечного сечения были выбраны для возможности внедрения в почву с крупными размерами почвенных агрегатов. Ячейки содержат переходную область, соединяющую коаксиальный высокочастотный разъем с областью измерений, заполняемую исследуемым веществом. Конструкция ячеек выполнена согласно принципам, изложенным в [4], и содержит (см. рис. 1) высокочастотный разъем, заземленные внешние электроды (выполнены из латуни толщиной 1 мм), диэлектрический каркас переходной области (выполнен из пластика PLA с $\varepsilon' = 2.44 - 2.51$) и центральную полосу толщиной 1 мм. Ширина центральной полосы в переходной области изменяется таким образом, чтобы обеспечить волновое сопротивление $Z_n = 50$ Ом по всей длине этой области. Область измерений содержит отрезок центральной полосы длиной 13,7 мм и симметрично отстоящие от него, заземленные электроды длиной 40 мм в малой ячейке и 90 мм – в большой. Волновое сопротивление области измерений при воздушном заполнении $Z = 79$ Ом ($50 \cdot \sqrt{\varepsilon'}$). Конструкция переходной области измерительной ячейки выбрана для обеспечения наилучшего согласования коаксиально-полоскового перехода и выравнивания фронта электромагнитной волны, распространяющейся в области измерений. Кроме того, такая конструкция позволяет уменьшить ширину центральной полосы в области измерений и повысить частоту возникновения высших типов волн.

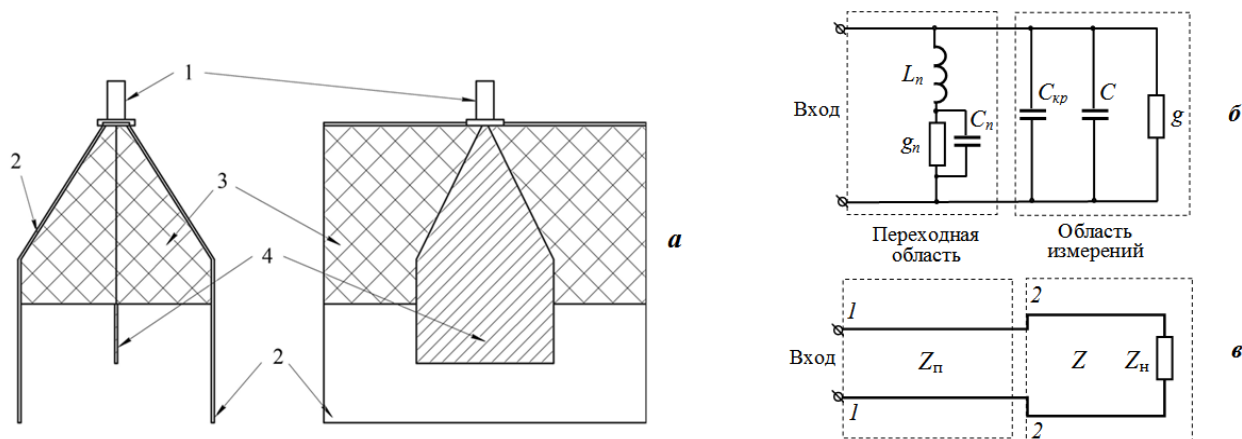


рис. 1 Виды сечений измерительной ячейки на базе разомкнутого отрезка симметричной полосковой линии (а):

1 – высокочастотный разъем, 2 – заземленные внешние электроды, 3 – диэлектрический каркас, 4 – центральная полоска; и эквивалентные схемы ячейки на сосредоточенных (б) и распределенных (в) элементах

Процедура измерений заключается в определении комплексного коэффициента отражения S_{11} от входа ячейки. Для этого использовался векторный анализатор параметров цепей Rohde & Schwarz ZNB20. Расчет комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) вещества в области измерений производился двумя способами: с использованием эквивалентной схемы ячейки на сосредоточенных элементах (рис. 1б) и с использованием схемы на распределенных элементах (рис. 1в).

При использовании схемы на распределенных элементах коэффициент S_{11} определяется следующим

образом: $S_{11} = \frac{Z_{11} - Z_0}{Z_{11} + Z_0}$, где $Z_{11} = Z_0 \frac{Z_{22} + iZ_0 \operatorname{tg}(k_0 l_n)}{Z_0 + iZ_{22} \operatorname{tg}(k_0 l_n)}$ – входной импеданс ячейки в плоскости 11 (см. рис. 1б),

$Z_{22} = Z_u \frac{Z_u + Z_u \operatorname{th}(i k_u l_u)}{Z_u + Z_u \operatorname{th}(i k_u l_u)}$ – импеданс измерительной части ячейки в плоскости 22, $Z_0 = 50$ Ом, k_0 – волновое число

в вакууме, l_n – электрическая длина переходной области, $Z_u = Z/\sqrt{\epsilon^*}$ – комплексное волновое сопротивление измерительной части ячейки, заполненной веществом с КДП ϵ^* , Z_u – импеданс нагрузки, включающий краевую емкость и сопротивление потерь на излучение, $k_u = k_0 \sqrt{\epsilon^*}$ и l_u – соответственно комплексное волновое число и физическая длина измерительной части ячейки, $i^2 = -1$. Гиперболический тангенс определяется по формуле

$\operatorname{th} x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$. Для определения электрической длины переходной области была изготовлена калибровочная

ячейка, содержащая только переходную короткозамкнутую область.

Особенностью полосковой линии с конечными размерами боковых электродов является излучение части электромагнитной энергии при отражении от разомкнутого конца линии. Для определения импеданса нагрузки мы провели измерение коэффициента отражения при заполнении измерительной части калибровочными жидкостями, затем на нескольких частотах нашли регрессионные уравнения, связывающие комплексную проводимость нагрузки $Y_u = 1/Z_u$ с действительной и мнимой частями КДП измеряемого вещества.

Таким образом, расчетное значение параметра S_{11} удастся определить через КДП исследуемого вещества. Результаты измерения КДП трех жидкостей в ячейке меньших размеров при температуре 22 °С представлены на рис. 2. Метод позволяет определять КДП в диапазоне частот от 5–10 до 250–300 МГц. На более высоких частотах появляются высшие типы волн, искажающие результаты измерений. Расчетная критическая частота при заполнении дистиллированной водой составляет около 400 МГц. Это не позволяет провести полноценную калибровку.

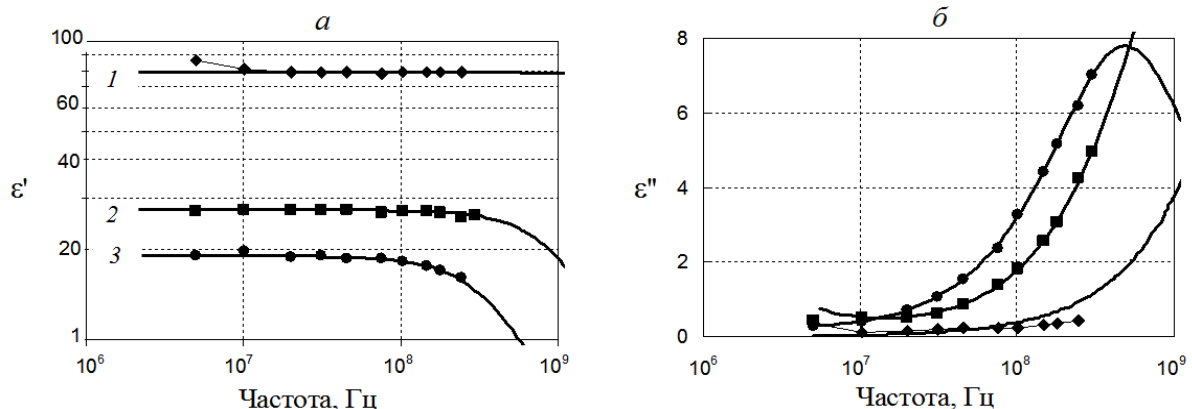


рис. 2 Результаты измерений КДП жидкостей (а – действительной, б – мнимой частей). Расчет с использованием схемы на распределенных элементах. 1 – дистиллированная вода, 2 – этиловый спирт 95%, 3 – изопропиловый спирт 99%. Сплошные линии – расчеты по моделям

При использовании схемы на сосредоточенных элементах (рис. 1б) расчет производился по методике, изложенной в [5]. Значения элементов определялись для ячейки воздушного заполнения через измеренные частотные положения f_s и f_p первых последовательного и параллельного резонансов соответственно и значение суммарной емкости C_Σ :

$$C_\Sigma = C_n + C_{кр} + C,$$

$$C_n / (C_{кр} + C) = (f_p / f_s)^2 - 1,$$

где C_n – емкость переходной области, $C_{кр}$ – краевая емкость в области измерений, C – емкость отрезка СПЛ в области измерений. Емкость C_Σ определяется в низкочастотном приближении (для частоты $f \ll f_s$) как отношение суммарной реактивной проводимости B_Σ измерительной ячейки к циклической частоте ω : $C_\Sigma = B_\Sigma / \omega$. Величина емкости C вычисляется теоретически через значение погонной емкости (для отрезка линии волновым сопротивлением Z), умноженное на длину отрезка линии l_u в области измерений.

$$C = l_u / (cZ),$$

где c – скорость света в вакууме.

Собственная индуктивность ячейки L_n определяется по формуле Томпсона через значение частоты первого последовательного резонанса f_s . Величины активных проводимостей g , g_n для ячейки воздушного заполнения были установлены оптимизационными методами при анализе с помощью эквивалентной схемы (с уже

установленными остальными величинами элементов) измеренной проводимости ячейки и оказались настолько малы, что не учитывались при измерении КДП почв. Значения элементов эквивалентной схемы для измерительной ячейки воздушного заполнения с расстоянием между внешними электродами 28,5 мм составили: $C_n=5,958$ пФ; $C_k=1,115$ пФ; $C=0,867$ пФ; $L_n=10,91$ нГн.

При заполнении области измерений исследуемым веществом все элементы эквивалентной схемы считались неизменными, кроме значений C и g . По их восстановленным значениям с помощью известных выражений восстанавливали действительную ($\epsilon' = C/C_0$, C_0 – емкость для воздушного заполнения) и мнимую ($\epsilon'' = g/(\omega C_0)$) части КДП вещества.

Результаты расчетов с использованием этого метода приведены на рис. 3. При расчете мнимой части КДП жидкостей использовались следующие значения ионной проводимости: дистиллированная вода – 0,265 мСм/м, этиловый спирт – 0,17 мСм/м, изопропиловый спирт – 0,55 мСм/м. Диапазон частот восстановления значений КДП от 0,4–0,6 до 70–80 МГц немного ниже, чем при использовании эквивалентной схемы на распределенных элементах. С использованием обоих методов расчета перекрывается диапазон частот от 0,4–0,6 до 250 – 300 МГц. Небольшого повышения верхней граничной частоты можно добиться, если вместо дистиллированной воды использовать калибровочные жидкости с меньшей диэлектрической проницаемостью. Например, при использовании диметилсульфоксида с $\epsilon' = 46,5$ критическая частота составляет около 540 МГц, а при использовании ацетона с $\epsilon' = 20,7$ критическая частота около 800 МГц.

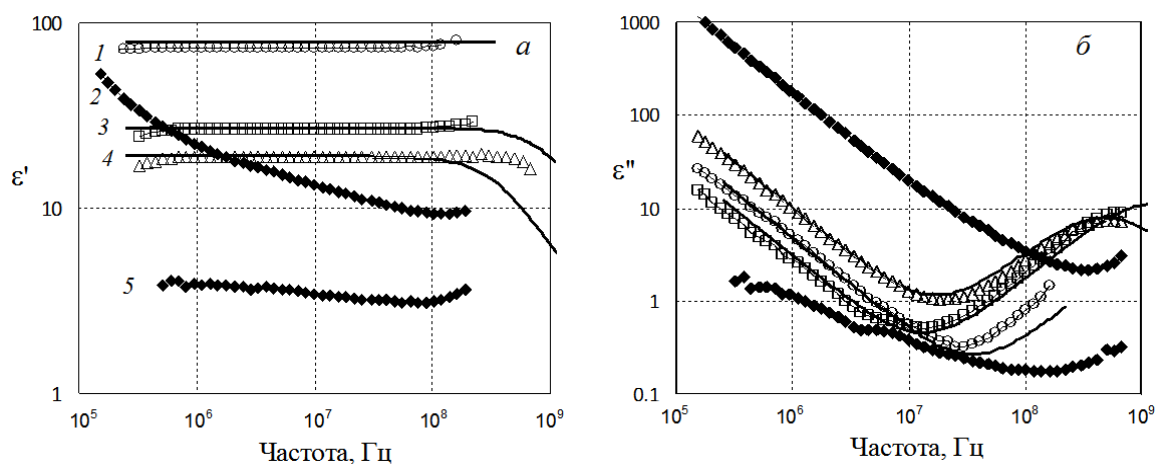


рис.3 Результаты измерений КДП (а – действительной, б – мнимой частей). Расчет с использованием схемы на сосредоточенных элементах. 1 – дистиллированная вода, 2 – влажная почва, 3 – этиловый спирт 95%, 4 – изопропиловый спирт 99% 5 – сухой песок.

Сплошные линии - расчеты по моделям

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Список публикаций

- [1] Njoku E.G., Kong J.-A. // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. P. 3108. <https://doi.org/10.1029/JB082i020p03108>
- [2] Kerr Y. et al. // *Proc. IEEE*. 2010. V. 98. No. 5. P. 666–687. doi:10.1109/JPROC.2010.2043032
- [3] Бобров П.П., Беляева Т.А., Костычев Ю.А., Крошка Е.С., Родионова О.В., Яценко А.С. / *Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г. С. 165. doi 10.21046/22DZZconf-2024a
- [4] Bobrov P. P., Kostychov Yu. A., Krivaltsevich C.V., Rodionova O. V. // *Russian Physics Journal*. 2024. V. 67. No. 8. P. 1213-1222. doi 10.1007/s11182-024-03243-9
- [5] Костычев Ю.А., Кривальцевич С.В. *Статья в настоящем сборнике*.

Метод повышения точности обработки емкостных измерений в диэлектрической спектроскопии материалов**Костычев Юрий Александрович¹**
Кривальцевич Сергей Викторович^{1,2}¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук Институт радиофизики и физической электроники,²Акционерное общество «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»

E-mail: fatnblan@mail.ru

Известные способы емкостных измерений спектров комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) материалов состоят в определении ее действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей через величины емкости C и активной проводимости g эквивалентной схемы области емкостной измерительной ячейки (ИЯ), заполненной материалом. Эту область называют рабочей, она представляет собой пространство между электродами конденсатора ИЯ. Часть емкостной ИЯ, обеспечивающую подключение рабочей области к измерительному прибору (векторному анализатору цепей), называют переходной областью. Эквивалентная схема ИЯ может быть составлена как показано в [1] (см. рис.1), где C_k – емкость переходной области (называемая контактной) и элементы эквивалентной схемы рабочей области: L – индуктивность электродов конденсатора ИЯ, g – активная проводимость, C – емкость рабочей области.

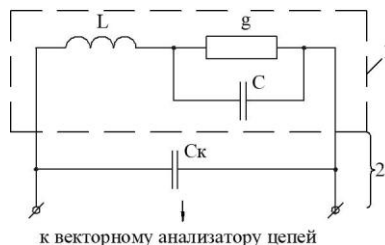


Рис. 1 Эквивалентная схема емкостной измерительной ячейки с отмеченными переходной (2) и рабочей (1) областями.

При проведении емкостных измерений определяют значения элементов эквивалентной схемы ИЯ с воздушным заполнением (активную проводимость и емкость области измерений при этом обозначают как g_0 и C_0). Частотные положения последовательного и параллельного резонансов для ИЯ, ω_s и ω_p , соответственно, задают отношение C_0/C_k , которое выражено (1).

$$C_0/C_k = (\omega_p/\omega_s)^2 - 1. \quad (1)$$

Суммарная емкость $C_\Sigma = C_0 + C_k$ определяют по $B_0 = \omega C_\Sigma$ мнимой проводимости ИЯ (активную проводимость полагают нулевой) при воздушном заполнении на частотах $\omega \ll \omega_s$. Систему двух уравнений на C_0 и C_k разрешают, полученные значения емкостей эквивалентной схемы используют для определения КДП. Измеряют значение проводимости $Y_\Sigma = G + iB_\Sigma$ заполненной материалом ИЯ, по ней определяют значения активной проводимости g и емкости C и с помощью формул (2) и (3) (предварительно проведя коррекцию C_0 с учетом краевой емкости) вычисляют значения КДП.

$$\epsilon' = C/C_0, \quad (2)$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg} \delta = \epsilon' \cdot g/(\omega C), \quad (3)$$

где $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, ω – циклическая частота проведения измерений.

Таким образом, емкостные измерения КДП состоят в вычислении величин емкости и активной проводимости C и g рабочей области ИЯ через ее проводимость $Y = G + iB$ выраженную через общую измеренную проводимость ИЯ Y_Σ с помощью (4).

$$Y = Y_\Sigma - i\omega C_k. \quad (4)$$

Выражение значений g и C через Y формулируют анализом эквивалентной схемы рис.1 через выражение (5).

$$Y = \frac{\frac{1}{i\omega L} (i\omega C + g)}{\frac{1}{i\omega L} + i\omega C + g} = \frac{\omega_0^2 C^2 - i \frac{\omega_0^2}{\omega^2} g \omega C}{g + i\omega C \left[1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right]}, \quad (5)$$

где индуктивность L заменена через характеристическую частоту ω_0 ($\omega_0^2 = 1/(LC)$).

Формула (5) представляет собой систему двух уравнений на действительную G и мнимую B части проводимости Y рабочей области ИЯ, которые с учетом выражения для $\text{tg} \delta$ из (3) могут быть представлены как (6) и (7).

$$G = g \frac{\omega_0^4 / \omega^4}{\operatorname{tg} \delta^2 + (\omega_0^2 / \omega^2 - 1)^2}, \quad (6)$$

$$B = \omega C \frac{\omega_0^2 / \omega^2 [\omega_0^2 / \omega^2 - 1 - \operatorname{tg} \delta^2]}{\operatorname{tg} \delta^2 + (\omega_0^2 / \omega^2 - 1)^2}. \quad (7)$$

Активная проводимость g , выраженная из (6), является полиномом второй степени относительно C , подстановка g в (7) дает уравнение пятой степени относительно C . Уравнение пятой и выше степени не имеет аналитического решения [2].

Поэтому в случае известных способов емкостных измерений КДП g и C выражены приближенно:

а) низкочастотное приближение $\omega \ll \omega_0$ или $\omega / \omega_0 \approx 0$, которое преобразует (6) и (7) к (8) и (9) [3,4];

б) приближение малых потерь $g \ll \omega C$ или $\operatorname{tg} \delta \approx 0$, которое преобразует (6) и (7) к (10) и (11) [1,5,6].

$$g = G, \quad C = B / \omega. \quad (8,9)$$

$$g \approx 0, \quad C = (B / \omega)(1 - \omega^2 / \omega_0^2). \quad (10,11)$$

Описанные недостатки (обусловленные приближенным характером определения g и C) известных методов ограничивают их применимость и снижают точностные характеристики измерения КДП.

Целью данного доклада стало представление и экспериментальное исследование метода точного аналитического выражения значений емкости C и активной проводимости g эквивалентной схемы рабочей области ИЯ через измеренные величины ее активной и реактивной проводимостей G и B для корректного определения КДП материалов с потерями емкостными методами.

Предлагаемый метод определения g и C состоит в получении кубического уравнения (имеющего однозначное аналитическое решение) на $\operatorname{tg} \delta$ из выражений (6) и (7) путем деления первого равенства на второе. Измеренная частота первого последовательного резонанса ИЯ ω_p ($B(\omega_p) = 0$) не равна характеристической ω_0 для материалов с потерями, что видно из (7), поэтому искомое кубическое уравнение принимает вид (12), а его решение дает частотный спектр тангенса угла диэлектрических потерь материала $\operatorname{tg} \delta$ известным способом [7].

$$\operatorname{tg} \delta^3 + (\omega_p^2 / \omega^2) \operatorname{tg} \delta + (G/B)(1 - \omega_p^2 / \omega^2) = 0. \quad (12)$$

Значения активной проводимости и емкости рабочей области предлагается выражать как (13,14).

$$g = G \frac{\operatorname{tg} \delta^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} - 1 - \operatorname{tg} \delta^2 \right)^2}{\left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} - \operatorname{tg} \delta^2 \right)^2}, \quad C = \frac{g}{\omega \operatorname{tg} \delta}. \quad (13,14)$$

Таким образом, по измеренным значениям проводимостей G и B , резонансной частоте ω_p и тангенсу угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ значения активной проводимости g и емкости C могут быть определены и существуют для всех частот, кроме $\omega = \omega_p$ и $\omega = \omega_p / \operatorname{tg} \delta$, обход этих особых точек может быть выполнен выбором частотной сетки проводимых измерений.

Апробация предложенного метода и сравнения с оригинальными были проведены на коаксиальной ИЯ с рабочей областью в виде коаксиальных цилиндров: внутренний длиной 8 мм и диаметром 1.3 мм, внешний длиной 9 мм, внутренним диаметром 5 мм и толщиной стенки 1 мм. Емкость рабочей области при воздушном заполнении C_0 составила 0.4 пФ, частота первого последовательного резонанса ИЯ $f_0 = 3.81$ ГГц. Емкостные измерения были проведены для калибровочной жидкости (заполнявшую без пустот рабочую область и имеющую температуру 30°C): изопропилового спирта. Модель КДП жидкости и ее температурную зависимость приведена в [9], для изопропилового спирта $\operatorname{tg} \delta = 0.015 \dots 0.94$ в диапазоне частот 0.02..2 ГГц. По относительным отклонениям, обработанных разными методами, результатов измерений от модельных значений была проведена оценка точностных характеристик методов для материала с большими потерями.

Размеры ИЯ были выбраны так, чтобы в окрестности релаксационного процесса изопропилового спирта ($f_{rel} = 557$ МГц) были возможны емкостные измерения (проводимость рабочей области имела емкостной характер, а первый последовательный резонанс ИЯ, заполненной материалом, был выше по частоте, чем $2f_{rel}$).

На рис. 2 приведены результаты измерений КДП изопропилового спирта в описанной коаксиальной ячейке тремя методами. Для двух оригинальных методов, в которых g и C области ИЯ выражены через (8,9) и (10,11), измерения мнимой части КДП объединены и представлены по (8,9) поскольку второй метод не дает информации по активной проводимости.

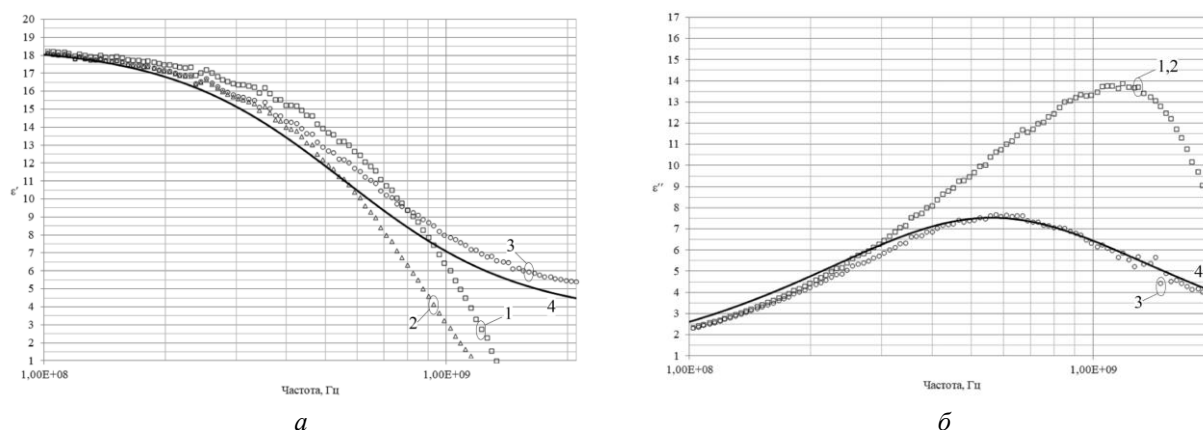


Рис.2 Результаты измерений КДП изопропилового спирта (а – действительной, б – мнимой частей) оригинальными методами (линии 1 – по (8,9) и 2 – по (10,11)) и предложенным (линия 3 – по (12),(13,14)). Линией 4 нанесены модельные значения.

Результаты апробации предложенного метода приведены в формате верхней рабочей частоты f_v применения каждого из методов по критериям непревышения относительного отклонения от модельных значений в 20% для ϵ' и в 13% для ϵ'' . Для метода, отличающегося формулами (8,9) f_v составила 1100 и 385 МГц по ϵ' и ϵ'' соответственно. Для метода, отличающегося формулами (10,11) f_v составила 750 и 385 МГц по ϵ' и ϵ'' соответственно. В случае предложенного метода f_v составила 2000 МГц как для ϵ' так и для ϵ'' .

Анализ результатов измерений известными способами и предложенным показал, что последний превосходит известные по ширине рабочей полосы не менее чем в 1.8 раза. Также показана идентичность работы способов в низкочастотной области. Сниженная рабочая полоса точного определения действительной части КДП оригинального способа по формулам (10,11) относительно формул (8,9) обусловлена ростом потерь калибровочной жидкости, определенным релаксационным процессом на частоте 557 МГц. Последнее видно по максимуму графика частотной зависимости мнимой части КДП на рис.2б.

С ростом потерь в измеряемом материале предложенный метод превосходит по точностным характеристикам известные методы и аналогичен им в низкочастотном диапазоне в случае малых потерь. В докладе продемонстрирована эффективность работы метода в высокочастотном (сантиметровом) диапазоне на примере измерения нескольких калибровочных жидкостей с известными моделями спектров КДП. Показана целесообразность использования предложенного метода в низкочастотном (метровом) диапазоне.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Список публикаций

- [1] Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – государственное издательство физико-математической литературы, М. 1963.
- [2] Mriminal M., Galois theory and the abel-ruffini theorem.//The University of Chicago Department of Mathematics – 2019.
- [3] Webster J.G. (Ed.). (2003). Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203009406> (Chapter 10 Permittivity Measurement)
- [4] Bore T. et al. A large coaxial reflection cell for broadband dielectric characterization of coarse-grained materials //Measurement Science and Technology. – 2017. – V. 29. – no. 1. – p. 015602. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9407>
- [5] Gregory A.P., Clarke R.N. Traceable measurements of the static permittivity of dielectric reference liquids over the temperature range 5–50 C //Measurement Science and Technology. – 2005. – V. 16. – no. 7. – p. 1506.
- [6] Levitskaya T. M. and Sternberg B. K. Laboratory measurement of material electrical properties: Extending the application of lumped-circuit equivalent models to 1 GHz// in Radio Science, vol. 35, no. 2, pp. 371-383, March-April 2000, doi: 10.1029/1999RS002186.
- [7] Witula R., Słota D. Cardano's formula, square roots, Chebyshev polynomials and radicals //Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 2010. – V. 363. – no. 2. – pp. 639-647. doi.org/10.1016/j.jmaa.2009.09.056
- [8] Gregory A.P., Clarke R.N. Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz. – 2012.

Разработка системы магнитного позиционирования для реабилитации пациентов с нарушениями функций верхних конечностей

Кузцова Анжела Евгеньевна, Росляков Сергей Николаевич, Суханов Дмитрий Яковлевич

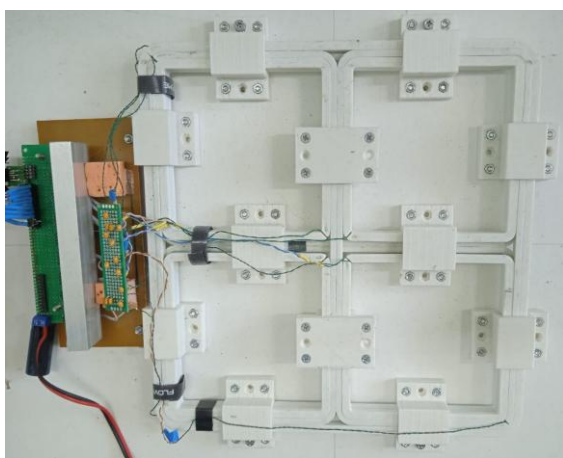
Жданов Дмитрий Сергеевич

Томский государственный университет

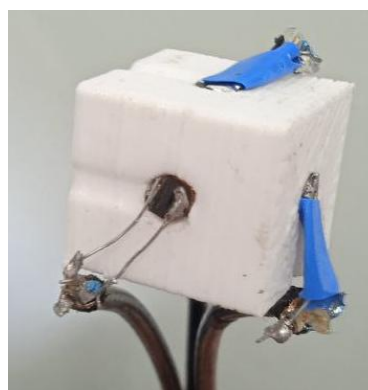
E-mail: Ang_kuz93@mail.ru

Одним из видов отслеживания координат является магнитное позиционирование. Методы определения положения объекта основано на измерении вектора напряжённости магнитного поля. В качестве магнитометра чаще всего выступают датчики Холла или магнитные катушки. Способы магнитного позиционирования можно разделить на два вида: активный и пассивный. Пассивная магнитометрия использует заранее измеренную или рассчитанную карту магнитных полей в области позиционирования [1-2]. Однако точность такого метода привязана к точности изначальной карты полей.

В данной работе предлагается использовать систему, состоящую из базовой станции и приемной системы. Приемная система представляет собой 3 катушки, размещенные на гранях куба и ориентированных вдоль каждой из осей X, Y, Z и образующих один приемный сенсор для регистрации сигнала от базовой станции. Базовая станция генерирует переменные магнитные поля, которые принимаются трёх осевым магнитным сенсором. Базовая станция состоит из 9 передающих катушек, на которые подаются сигналы различной частоты. Такой подход позволяет включать все катушки базовой станции одновременно. После измерения поля приемным сенсором, сигнал оцифровывается и фильтруется на 9 частотных составляющих (по 1 на каждую катушку базовой станции). Каждая частота соответствует отдельной передающей катушке. В результате трёхосевой сенсор позволяет измерить 27 независимых числовых значений характеризующих магнитное поле базовой станции в данной точке пространства для определённой ориентации сенсора. Измеренное поле сопоставляется с заранее рассчитанным полем базовой станции и вычисляются координаты приемного сенсора в пространстве. Система будет применяться в составе роботизированного комплекса для восстановления функции верхней конечности пациентов после перенесенных мозговых катастроф. На рис.1 приведена разработанная система магнитного позиционирования.



а – базовая станция



б – приемная система

рис. 1 Магнитная система позиционирования.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0020.

Список публикаций:

- [1] Bai Y. B., Gu T., Hu A. Integrating Wi-Fi and magnetic field for fingerprinting based indoor positioning system // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). 2016. Alcala de Henares, Spain. 4–7 Oct. 2016. P. 1–6. DOI :10.1109/ipin.2016.7743699.
- [2] Binu P. K., Krishnan R. A., Kumar A. P. An efficient indoor location tracking and navigation system using simple magnetic map matching // IEEE Intern. Conf. on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC). 2016. Chennai, India. 15–17 Dec. 2016. P. 1-7. DOI: 10.1109/iccic.2016.7919537.

Формирование направленного воздушного потока с помощью сфокусированного широкополосного акустического поля

Кузцова Анжела Евгеньевна, Суханов Дмитрий Яковлевич, Росляков Сергей Николаевич
Томский государственный университет
E-mail: Ang_kuz93@mail.ru

Нелинейные акустические эффекты вызывают интерес у современных исследователей [1,2]. В частности, явление акустического ветра в воздухе проявляется при больших амплитудах акустической волны [3]. Большие амплитуды акустического поля, возможно, обеспечить с помощью фокусировки волн от множества излучателей. Тогда нелинейные эффекты проявляются в заданной области пространства. Как правило, рассматривается фокусировка монохроматических ультразвуковых волн, которые после фокуса искажаются, а спектр сигнала расширяется.

В данной работе рассматривается возможность формирования направленного воздушного потока с помощью сфокусированного широкополосного акустического поля ультразвуковой волны на частотах порядка 40 кГц. Принимается во внимание проявление нелинейных эффектов в воздухе. Представлены результаты численного моделирования методом конечных разностей во временной области на основе уравнения Навье-Стокса, уравнения непрерывности и состояния идеального газа для адиабатического процесса. Фокусировка широкополосного ультразвукового сигнала осуществляется за счёт синфазного излучения сигналов с полусферической апертуры, что позволяет обеспечить максимум поля в центре сферы. По результатам численного моделирования наблюдается формирование направленного воздушного потока для широкополосного сигнала. На (рис. 1) представлено распределение средней скорости воздушного потока с нелинейной нормировкой.

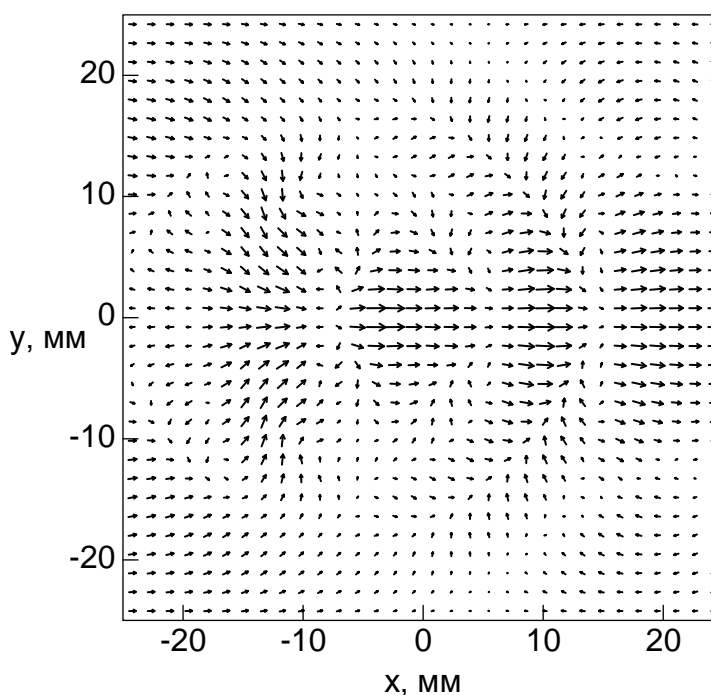


рис. 1 Средняя скорость движения воздушного потока при облучении сфокусированной широкополосной ультразвуковой волной.

Работа выполнена при поддержке гранта №25-22-00137 Российского Научного Фонда.

Список публикаций:

- [1] Giulio E. Di., Leva R. Di., Dragonetti R. *Theoretical and Experimental Assessment of Nonlinear Acoustic Effects through an Orifice* // *Acoustics*. 2024. Vol. 6. Iss4. P. 818–833.
- [2] Тюрина А.В., Юлдашев П.В., Есипов И.Б., Хохлова В.А. Численная модель спектрального описания генерации ультразвуковой волны разностной частоты при двухчастотном взаимодействии // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 2. С. 152–161.
- [3] Виноградов Н.С., Дорофеев М.С., Коробов А.И., Михайлов С.Г., Руденко О.В., Шанин А.В., Шилкин А.О. О нелинейной генерации звука в воздухе волнами ультразвуковых частот // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 2. С. 189–194.

Сверхширокополосный двухполяризационный радар со сканированием объектов в среде**Некрасов Эдуард Сергеевич***Балзовский Евгений Владимирович**Кошелев Владимир Ильич**Тарновский Вячеслав Михайлович**Институт сильноточной электроники СО РАН**E-mail: nekrasov@lhfe.hcei.tsc.ru*

Аннотация: Разработана конструкция двухполяризационного радара для обнаружения объектов в среде на основе решеток сверхширокополосных комбинированных антенн. Углы сканирования передающей антенной решетки $\theta_c = \pm 6^\circ - \pm 33^\circ$, приемной — $\theta_c = 0 - \pm 36^\circ$. В тестовых экспериментах металлические объекты располагали на случайно неоднородной поверхности песка в различных местах относительно области сканирования приемо-передатчика. По результатам измерений отраженных с каждого направления сигналов, используя преобразование Гильберта, строили огибающие сигналов и по максимальным амплитудным значениям огибающих определяли положение объекта. Для численных расчетов было использовано программное обеспечение с открытым кодом `grgMax`. Код разработан на основе метода конечных разностей во временной области для моделирования распространения и рассеяния электромагнитных волн на объектах и средах. Полученные результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными.

Конструкция приемо-передатчика

Фотография экспериментального макета представлена на (рис. 1). Приемная 1 и передающая 2 антенные решетки собраны на основе комбинированных антенн, оптимизированных для излучения и приема сверхширокополосных импульсов длительностью 0.5 нс. Каждая антенная решетка состоит из двух рядов антенн по четыре элемента. Один ряд состоит из антенн с вертикальной поляризацией, второй ряд — горизонтальной. Передающая и приемная решетки обращены друг к другу под углом 30° , расстояние от антенных решеток до среднего уровня случайно неоднородной поверхности составляет $L = 770$ мм. Углы сканирования передающей антенной решетки $\theta_c = \pm 6^\circ, \pm 19^\circ, \pm 33^\circ$, приемной — $\theta_c = 0, \pm 12^\circ, \pm 24^\circ, \pm 36^\circ$, сканирование осуществлялось в горизонтальной плоскости. В качестве случайно неоднородной поверхности был использован песок 3. Были выбраны следующие зондируемые объекты: металлические листы с поперечными размерами 120×120 и 400×70 мм². Объекты 4 располагали на случайно неоднородной поверхности песка в различных местах относительно области сканирования приемо-передатчика.

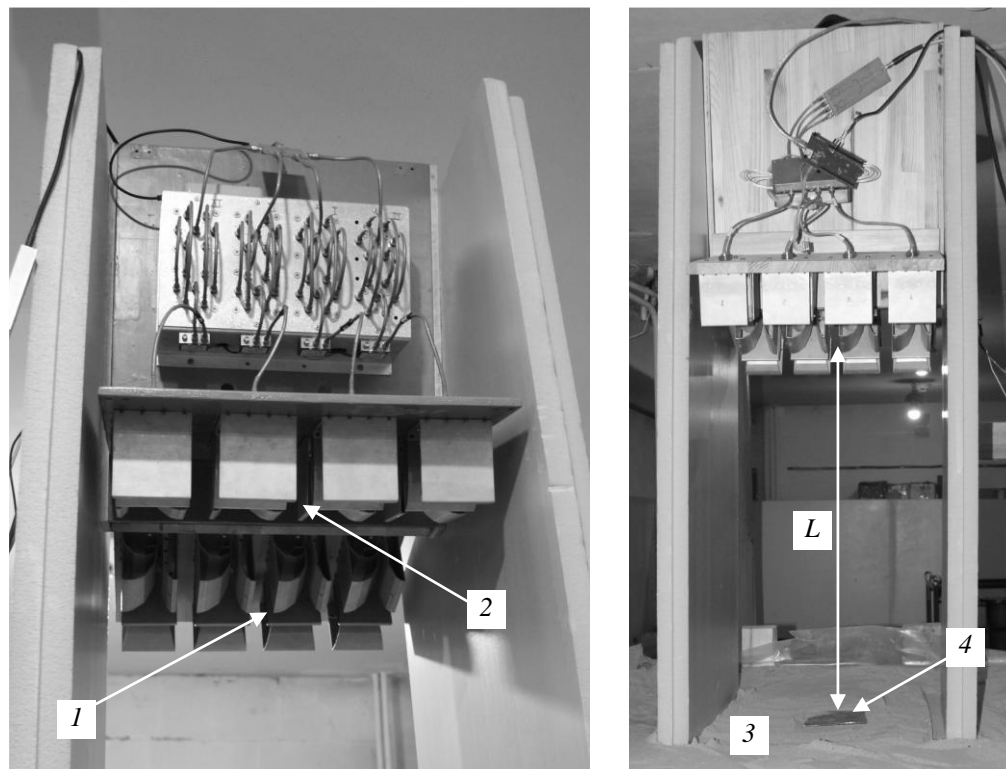


Рис.1 Экспериментальный стенд. 1 — приемная антенная решетка, 2 — передающая антенная решетка, 3 — песок, 4 — металлический объект

Результаты экспериментальных измерений

На входы антенных элементов передающей решетки через делитель мощности 4:1 подавался биполярный импульс напряжения длительностью 0.5 нс [1]. На (рис.2а) показано амплитудное распределение отраженного от объекта поля во временной области в режиме сканирования диаграммами направленности приемо-передатчика. В качестве объекта использовали металлический лист с размерами 120×120 мм², который располагался посередине тестового стенда (под геометрическим центром приемо-передатчика). После регистрации отраженных с каждого направления сигналов, используя преобразование Гильберта, строили огибающие сигналов и по максимальным амплитудным значениям огибающих определяли положение объекта. Рисунок 3 построен в градациях серого, чем темнее область на графике, тем более высокую амплитуду имеет отраженное поле. Найденное по результатам эксперимента положение объекта занимало диапазон углов от -2° до 7° . На (рис.2б) представлено амплитудное распределение отраженного поля для металлического листа с размерами 400×70 мм², расположенного на поверхности песка со смещением относительно центра приемо-передатчика на расстоянии 330 мм. По результатам эксперимента найдено положение объекта, которое занимает диапазон углов от -24° до -17° .

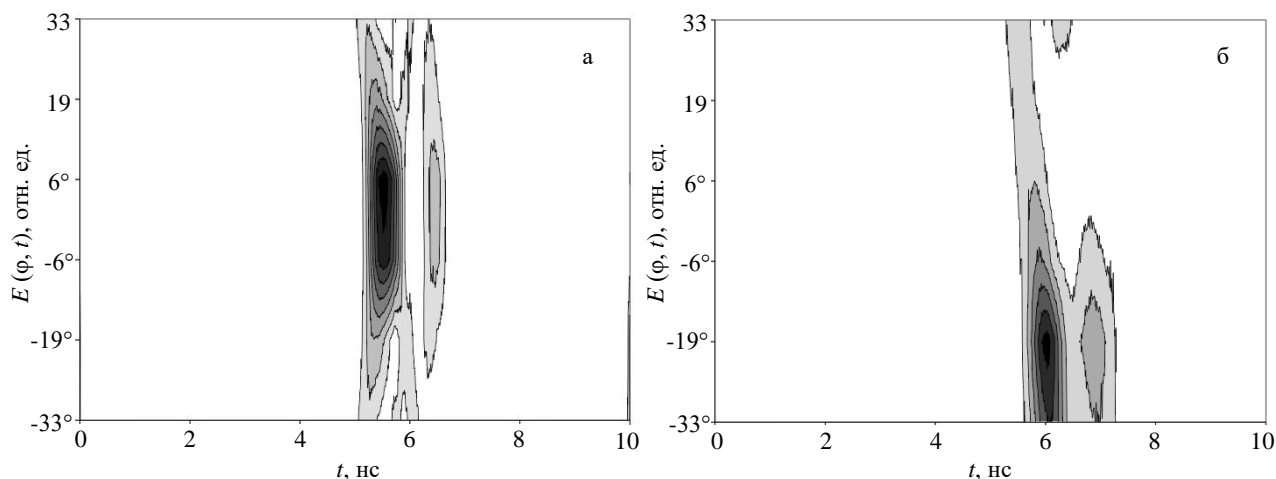


Рис.2 Амплитудное распределение отраженного поля для металлических листов с размерами 120×120 мм²(а) и 400×70 мм²(б)

Результаты численного моделирования

Было проведено компьютерное моделирование представленных экспериментальных исследований. Наличие такой модели позволит в дальнейших исследованиях использовать расчетные данные для планирования экспериментов и изучения методов обработки сигналов при зондировании. Для расчетов было использовано программное обеспечение с открытым исходным кодом grgMax [2, 3], моделирующее распространение и рассеяние электромагнитных волн на объектах и средах с использованием метода конечных разностей во временной области. Общая схема моделирования представлена на (рис.3а) Компоновка приемо-передающей системы аналогична экспериментальной. Все элементы решеток располагались в одной плоскости на расстоянии 720 мм от случайно-неоднородной поверхности среды. Расстояние между передающими и приемными решетками равно 200 мм. В качестве элементов решетки в расчетах были использованы антенны типа «bow-tie» длиной 80 и шириной 74 мм. Выбор такого типа элементов решетки обусловлен простотой реализации в используемой программной среде. Характеристики модельных и экспериментальных антенн приблизительно согласуются. Для среды были использованы параметры сухого песка с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4$ и проводимостью $\sigma = 0.002$ См/м. Случайная неоднородность поверхности среды моделировалась встроенными в программное обеспечение grgMax средствами. Антенные элементы модели возбуждались биполярными импульсами (производная Гауссова импульса) с центральной частотой спектра 2 ГГц. Сканирование по углу диаграммы направленности реализовано соответствующими задержками времени возбуждения передающих элементов решетки. Для сканирования по углу диаграммы направленности приемной решетки эти задержки учитывались при суммировании сигналов отдельных элементов. Обработка принятых отраженных сигналов аналогична обработке, выполненной в эксперименте. На (рис 3б, в) представлено амплитудное распределение отраженного электромагнитного поля для объектов в виде металлических листов с поперечными размерами 120×120 и 400×70 мм², соответственно. Объекты расположены на случайно неоднородной поверхности среды, также как в эксперименте. Как видно из представленных на рисунках 2а, б и 3б, в амплитудных распределений отраженного поля, результаты численных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

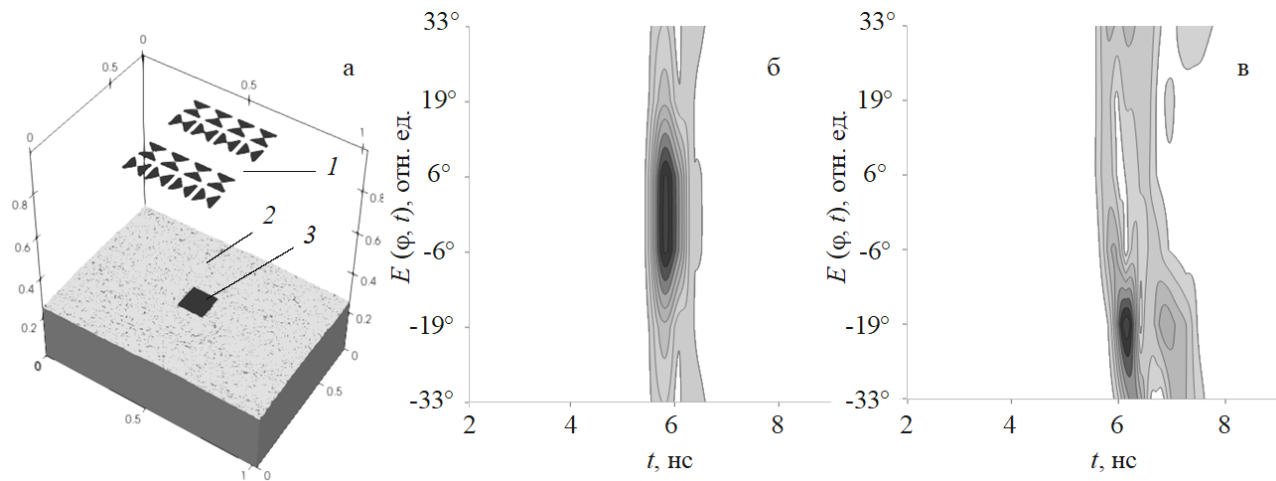


Рис.3 Результаты численного моделирования; а – схема моделирования (1 – приемо-передающая антенная система, 2 – песок со случайно неоднородной поверхностью, 3 – металлический объект); б, в - амплитудное распределение отраженного поля для металлических листов с размерами $120 \times 120 \text{ мм}^2$ (б) и $400 \times 70 \text{ мм}^2$ (в)

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2021-0002).

Список публикаций:

- [1] Ефремов А. М., Кошелев В. И., Ковальчук Б. М., Плиско В. В., Сухушин К. Н. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 77
- [2] gprMax: Electromagnetic simulation software // URL: <https://www.gprmax.com>
- [3] Warren, C., Giannopoulos, A. & Giannakis, I. // Computer Phys. Commun. 2016. V. 209. P. 163.

Оптимизация комбинированной антенны для работы в среде масляной изоляции**Плиско Вячеслав Владимирович***Институт сильноточной электроники СО РАН**E-mail: plisko@lhfe.hcei.tsc.ru*

Для исследования в среде CST Studio Suite была разработана параметрическая модель комбинированной антенны [1, 2], рассчитанной на возбуждение биполярными импульсами длительностью 1 нс. Габариты антенны без коаксиального ввода ($a \times b \times c$) составляли $17 \times 15 \times 15$ см (рис. 1а). Антенна состоит из ТЕМ-рупора 1, активного магнитного диполя 2 и двух пассивных магнитных диполей 3 и 4 (рис. 1б). Модель позволяет легко менять размеры и положение элементов антенны.

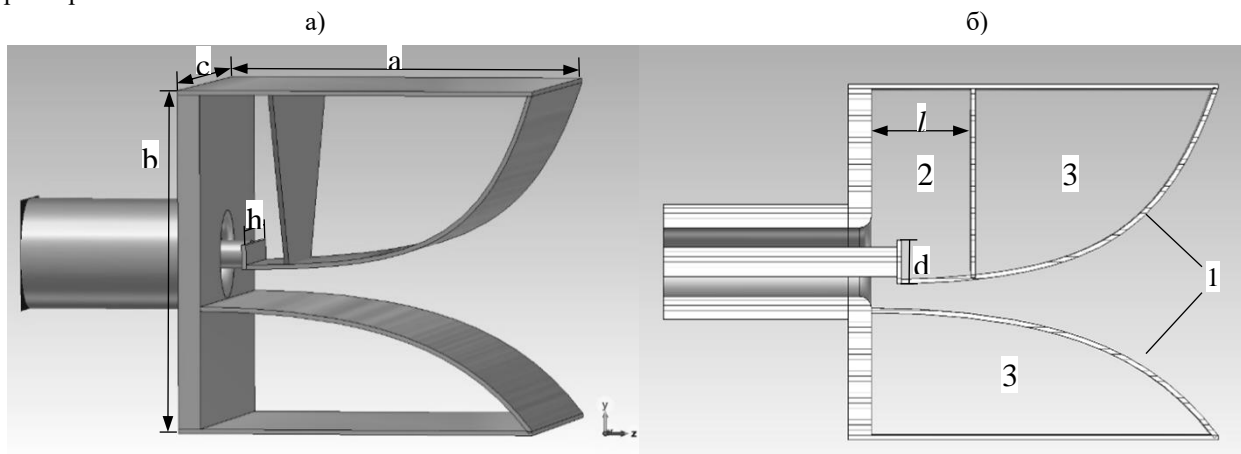


рис. 1. Комбинированная антенна: 1 – ТЕМ-рупор; 2 – активный магнитный диполь; 3 и 4 – пассивные магнитные диполи.

Для оптимизации антенны варьировались три параметра: размеры площадки, согласующей коаксиальный переход (d и h), и положение переключки l , определяющей размер активного магнитного диполя. Антенну оптимизировали по максимальной пиковой амплитуде поля в излученном импульсе.

Для антенны в свободном пространстве с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1$. Наилучший результат получен для $d = 19$, $h = 55$ и $l = 30$ мм. При этом коэффициент по полю $k_E = gE_p/U_{g \max}$ (где E_p – максимальное значение излученного поля на расстоянии g от антенны, а $U_{g \max}$ – максимальное значение импульса генератора) имел значение $k_E = 2$, что является хорошим результатом для комбинированных антенн. Полоса согласования по уровню КСВН ≤ 2 составила 0.43-2.56 ГГц. В полосе согласования коэффициент усиления растет с частотой от 2 до 8 дБи, а полоса частот, в которой коэффициент усиления превышает 0 дБи составляет 0.35-3 ГГц.

Для оптимизации излучения антенны, погруженной в диэлектрик, в расчетной области среда с $\epsilon = 1$ была заменена на среду с $\epsilon = 2.33$ (трансформаторное масло). Как и в предыдущем варианте варьировались значения параметров d , h и l . Максимальная амплитуда E_p излучения получена при значениях $d = 11$, $h = 55$ и $l = 20$ мм. При этом значение k_E составило 1.8. Полоса согласования составила 0.35-1.07 ГГц (по уровню КСВН ≤ 2). Несмотря на то, что полоса согласования сузилась, наблюдалось уменьшение нижней граничной частоты согласования f_n . Полоса частот, в которой коэффициент усиления превышает 0 дБ равна 0.2-2.5 ГГц. Это смещение полосы пропускания антенны в низкочастотную область вызвано укорочением пространственной протяженности импульса в масле на величину $\sqrt{\epsilon}$.

В реальных условиях антенна должна помещаться в тонкостенный (~ 1 см) полиэтиленовый контейнер, заполненный маслом. Так как диэлектрическая проницаемость полиэтилена и масла близки ($\sim 2 \div 2.4$), этот объем можно рассматривать как целиком заполненный однородным диэлектриком с $\epsilon = 2.33$ (рис. 2). С использованием значений параметров антенны d , h и l , полученных выше для антенны в безграничной диэлектрической среде, рассмотрена параметрическая модель диэлектрического объема, условно разделенного на цилиндрическую и полусферическую части. Для оптимизации по максимальной пиковой амплитуде поля будем варьировать радиусами цилиндра (R_C) и полусферы (R_S), а также длиной цилиндра (L_C). На рис.3 приведены результаты моделирования как зависимости коэффициента по полю k_E от размеров диэлектрического объема. Кривая 1 демонстрирует зависимость k_E от радиуса цилиндра R_C и радиуса полусферической части R_S , причем $R_C = R_S$ и $L_C = 125$ мм. Кривая 2 показывает зависимость k_E от радиуса полусферической части при постоянных радиусе и высоте цилиндрической части ($R_C = 115$ мм, $L_C = 150$ мм), а кривая 3 – зависимость k_E от длины цилиндра L_C при $R_C = R_S = 115$ мм. Из приведенных зависимостей следует, что увеличение объема контейнера ведет к увеличению коэффициента по полю. Однако на практике оптимально использовать контейнер минимального объема. Отмечено, что с уменьшением радиуса полусферической части резко растет коэффициент по полю (кривая 2 на

рис.3). Это может быть связано с тем, что полусферическая часть масляного объема выступает в качестве линзы. Исходя из соображений минимизации объема контейнера с маслом и максимизации коэффициента по полю лучшим вариантом представляется контейнер с размерами $R_C = R_S = 115$ мм и $L_C = 125$ мм, при этом значение коэффициента по полю равно $k_E = 2.25$.

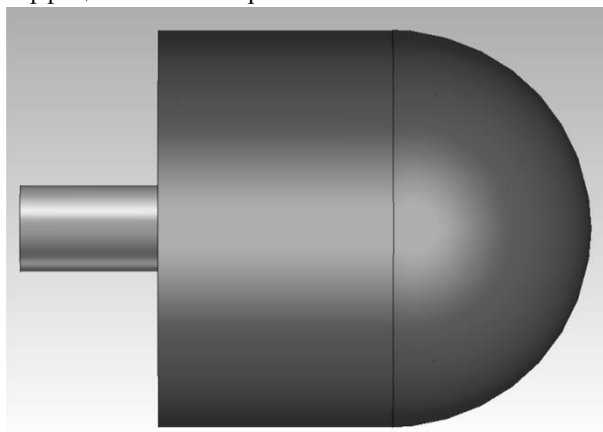


рис.2. Антенна в контейнере с маслом.

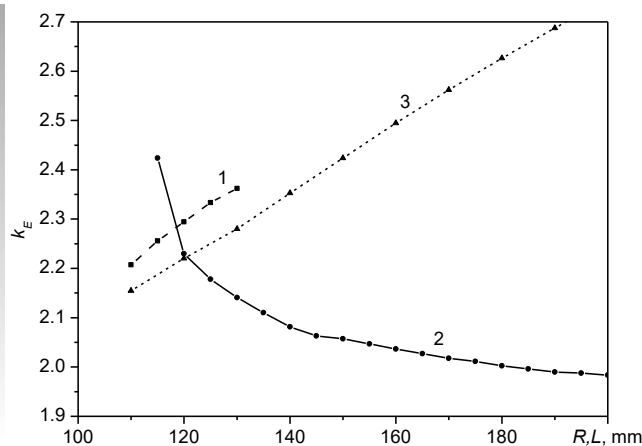


рис.3. Зависимости коэффициента по полю от размеров масляного объема.

Все расчеты выше проводились без учета потерь в масле. Если задать тангенс угла потерь масла равным 0.005, то уменьшится значение $k_E = 2.18$, против 2.25 с маслом без потерь, то есть уменьшение пиковой амплитуды излученного импульса составит $\approx 3\%$.

Диэлектрическая проницаемость масла зависит от марки и может отличаться от партии к партии. Была смоделирована зависимость коэффициента k_E от ϵ . При отклонении значения ϵ на $\pm 10\%$ коэффициент k_E отклоняется не более чем на $\pm 3\%$.

Таким образом помещение комбинированной антенны в контейнер, заполненный диэлектриком с $\epsilon = 2-2.4$, позволяет увеличить электрическую прочность антенны без ухудшения эффективного потенциала излучения r_{E_p} . Оптимизация формы диэлектрического контейнера позволила увеличить эффективный потенциал излучения примерно на 10% по сравнению с антенной в воздухе.

Список публикаций:

- [1] I. Koshelev V.I., Buyanov Yu.I., Andreev Yu.A., Plisko V.V., Sukhushin K.N. // *Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. 2001. – Las Vegas, June 17-22, 2001. – V. 2. P. 1661.*
- [2] Андреев Ю. А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. // *Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 5. С. 585.*

Влияние неровностей границ раздела слоистых структур льда и леса на параметры отражения сигналов навигационных спутников**Подопригора В. Г.¹***Макаров Д. С.², Харламов Д. В.², Реушев М. Ю.²*¹ Институт физики им. А.В. Киренского, СО РАН, Красноярск, Россия² Федеральный исследовательский центр «КНЦ СО РАН», Красноярск, Россия

E-mail: ikivt@yandex.ru

В общем случае поверхности границ раздела сред пространственно неоднородны и имеют неровности, масштабы которых измеряются от нанометров до километров. В качестве одного из важных критериев, применяемых в моделях рассеяния и определяющих степень влияния неровностей поверхности на характеристики отражения и рассеяния волн, используется известный критерий Рэлея. Если он выполняется и высота неровностей много меньше длины волны, поверхность считается квазигладкой, если нет – отражение приобретает диффузный характер, при котором энергия отраженного луча уменьшается.

В данной работе исследовано влияние неровностей поверхностей в структурах озерных льдов и лесов Красноярского края на характеристики отражения и рассеяния сигналов навигационных спутников (НС) диапазона $L1$ ($\lambda = 0.19$ м). Условия экспериментов и их результаты частично представлены в [1]

Когерентные радиоволны, отраженные от первой зоны Френеля вдоль зеркального направления, могут быть описаны через отражательную способность $\Gamma(\theta, \delta)$ [2]:

$$\Gamma(\theta, \delta) = \alpha |R|^2, \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения Френеля, α – потери когерентной энергии на неровностях:

$$\alpha = \exp(-4k^2\delta \cdot \cos^2 \theta), \quad (2)$$

где k – волновое число, $\delta = h^2$ – среднее квадратическое отклонение высоты неровностей h от *средней плоскости*; (θ) угол падения. Для абсолютно гладких поверхностей $\delta = h = 0$; $\alpha = 1$ в формулах (1) и (2). Расчеты для льда ($\epsilon \doteq 3,2$) показывают, что уже при $h \geq 4$ см – большая часть (более 80%) когерентной энергии теряется. Зависимость отражательной способности от угла падения представлена на рисунке (рис. 1).

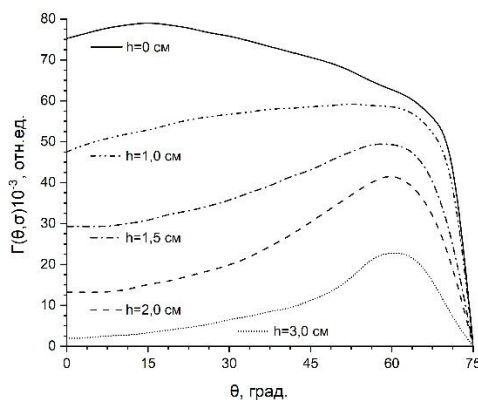


рис.1 Зависимость отражательной способности когерентной энергии $\Gamma(\theta, \delta)$ от угла падения θ для разных высот неровностей h на поверхности озерного льда ($\epsilon \doteq 3,2$)

Помимо когерентной компоненты, принимаемой сигнал содержит некогерентную (диффузную) часть. Её источником является совокупность точек, энергия отражения от которых уменьшается на величину $1/e$ ($\sim 4,3$ dB) по отношению к зеркально отраженному сигналу. Интенсивность диффузной составляющей согласно общей теории рассеяния пропорциональна двум факторам [3]: волновому $Q(\epsilon, \theta, \psi)$, зависящему от диэлектрической проницаемости (ϵ), волновых векторов падающей и отраженной волн, углов падения (θ) и отражения (ψ) (аналог величины α в (2)), а также поверхностному $\tilde{W}(k)$, определяющему форму кривой рассеяния и параметры неровностей. Функция $\tilde{W}(k)$ – спектральная плотность шероховатостей – является по сути Фурье-преобразованием корреляционной функции (КФ) поверхности $W(\rho)$, где ρ – радиус – вектор точки поверхности.

Используя данный подход, можно найти не только диффузную составляющую рассеяния, но и определить непосредственно из эксперимента параметры неровностей поверхности. Для этого надо знать явный вид КФ, который априори неизвестен. Основным используемый метод состоит в подборе из заданного набора

аналитических выражений той КФ, при которой разность между экспериментальной и теоретической индикатриссами была минимальной.

Недостатком подхода являются, во-первых, неоднозначность выбора КФ, которая сама зависит от искомых параметров шероховатостей; во-вторых, необходимость знать индикатрису рассеяния в полной полусфере, так как Фурье-преобразование предполагает интегрирование по всей области определения $\rho(x, y)$. В большинстве же экспериментов рассеянное излучение измеряется в плоскости падения, поэтому данных эксперимента не хватает для определения $W(\rho)$ из обратного Фурье-преобразования. Нами предложен метод определения параметров шероховатостей [4], согласно которому КФ $W(\rho)$ представляется в виде ряда по системе ортогональных функций Лагерра, коэффициенты разложения которого находятся путем сравнения расчета с экспериментом. Тогда параметры шероховатости определяются из условий нормировки, накладываемых на найденную функцию $W(\rho)$.

Зная параметры неровностей, можно решить и обратную задачу: оценить диэлектрические свойства исследуемой поверхности. Поскольку пространственный спектр высот неровностей не зависит от условий поляризации падающего излучения, то измеряя интенсивности по-разному поляризованных сигналов, из отношения волновых факторов при заданных углах падения и рассеивания радиоволны найдем величину диэлектрической проницаемости земной поверхности, как это сделано в [4] для диэлектрических пластин.

Список публикаций:

- [1] М. Ю. Реушев, В. Г. Подопригора, Д. С. Макаров и др. // Актуальные проблемы радиофизики АПП-2023: Сборник трудов X Международной научно-практической конференции. 2023. С. 94-95.
- [2] S.H. Yuch, R. Shan at al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020, p. 1-17.
- [3] J.M. Elson, K.H. Retehir // Phys.Stat.Sol.B. 1978. v. 62. p. 461-468.
- [4] В.Г. Подопригора, С.А. Раковская // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2023. № 6. с. 59-62.

Оптимизация измерений толщин ледовых покрытий с помощью методов ГНСС рефлектометрии

Реушев М. Ю.¹

Макаров Д. С.¹, Харламов Д. В.¹, Подопригора В. Г.², Краснощеков К. В.¹

¹ Федеральный исследовательский центр «КНЦ СО РАН», Красноярск, Россия

² Институт физики им. А.В. Киренского, СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: ikivt@yandex.ru

Особый интерес представляет направления исследований с помощью методов ГНСС рефлектометрии.[1] В основе рефлектометрических измерений с помощью сигналов от навигационных спутников (НС) лежит явление многолучевой интерференции. Радиосигналы в L1 диапазоне, обладают когерентностью с длиной когерентности ~ 300 м. В пределах радиуса когерентности, наблюдается интерференция отраженных сигналов от слоистой структуры: воздух – лед – вода. Результат интерференции регистрируется приемником в виде амплитудно-временной зависимости (АВЗ) $A(t)$. Общая задача рефлектометрии слоистых земных покровов с помощью радиосигналов от навигационных спутников, во многом подобна задаче радиолокации при наличии переотражений отстилающей земной поверхности и сопутствующих этому интерференционных явлений. Вследствие разной длины пути прямого сигнала и отраженного от земли сигнала, разность фаз между ними непрерывно меняется. Интерференционные явления, возникающие за счет разности фаз между прямым сигналом и отраженным от поверхности земли, несут в себе важную информацию о макрофизических характеристиках этой поверхности, таких, к примеру, как ее шероховатость, слоистость, влажность и т.д. [2]. Из практики известно, что самые сильные сигналы передаются по прямой линии между передатчиком и приемником и находятся в первой зоне Френеля [3]. В связи с чем, пространственная область, ограниченная первой зоной Френеля, называется «существенной» для распространения радиоволн.

Схема положения первой зоны Френеля S_F в произвольной точке C на плоскости отражения продемонстрирована *рис. 1*.

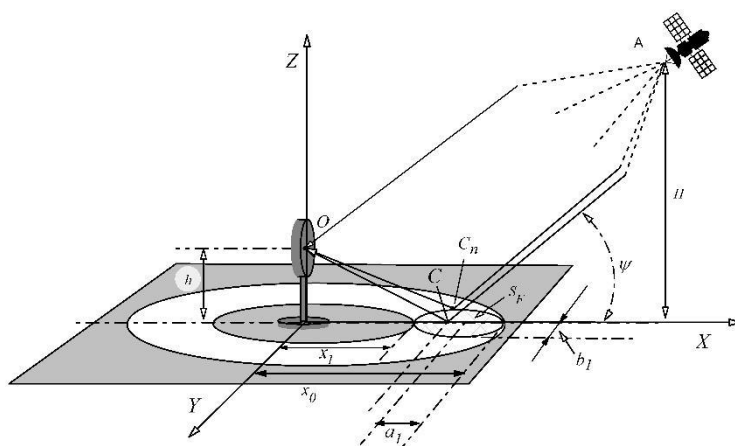


Рис.1. Положение первой зоны Френеля на плоскости отражения

При ориентировочных расчетах, в частности в радиолокации, принимают, что существенная область для отражения совпадает с первой зоной Френеля [4]. В случае, когда высота антенны h много меньше высоты расположения спутника H ($\sim 19\,000$ км), можно записать выражение для положения и размера первой зоны Френеля:

$$x = x_0 \left(1 + \frac{\lambda \sin \psi}{2h} \right); \quad x_0 = \frac{h}{\tan \psi} \quad 2a_1 = \left(\frac{2}{\sin \psi} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{\lambda h}{\sin \psi} \right) \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{4h \sin \psi} \right)}; \quad b_1 = 2a_1 \sin \psi \quad \#(1)$$

Где x - расстояние до центра 1 зоны Френеля, λ - длина волны, ψ - угол возвышения спутника, a и b - большая и малая полуось соответственно.

Для оценки качества интерференции существует понятие контрастности или видности интерференционной картины:

$$V = \frac{(P_{max} - P_{min})}{(P_{max} + P_{min})} \quad \#(2)$$

где: P_{max} , P_{min} - мощности радиосигналов от НС, регистрируемых приемной антенной.

Для получения интерференционных картин с высокой контрастностью V , имеет большое значение, чтобы существенная область при отражении радиоволн в точке наблюдения совпадала или была близка размерами с первой зоной Френеля. Кроме того, площадь этой области $S_{01} = \pi a_1 \cdot b_1$ должна превышать площадь приемной антенны $S_1 \gg S_{ант.}$ В этом случае, интерферирующие лучи равномерно засвечивают плоскость антенны и

видность интерференционной картины, будет максимальна.

Используя выражения (1), были проведены численные расчеты зависимости расстояний x , и площадей первых зон Френеля S_{01} от значений угла возвышения ψ НС над плоскостью отражения сигнала для различных высот. Расчеты показали, что при увеличении высоты h значения $x_0 = x_1$ и S_1 увеличивается, соответственно контраст интерференционной картины, также должен увеличиваться. При измерениях предпочтительно использовать сигналы от НС, у которых углы возвышения ψ над горизонтом лежат в области от 5 град до 40 град. При больших углах ψ , значения расстояние до центра и площади первой зоны Френеля становятся малыми, и вследствие чего уменьшается контраст интерференционной картины. По этой причине уменьшается точность определения измеряемых характеристик поверхности.

Эксперимент. В феврале 2025 года на озере Шира (Республика Хакасия, Россия) проводился сеанс рефлектометрических измерений ледовой поверхности. Запись проводилась с помощью приёмника регистратора НСРП-04 в трехканальном режиме антеннами АМ7 с право-круговыми поляризациями. Приемником регистрировался сигнал в виде отношения сигнал/шум (C/N). Частота отсчета регистрации данных составляла 1Гц. Время сеанса составляла ~ 90 минут. Высоты фазового центра – 3м, 3,5м и 4м. Толщина ледового покрова, измеренная прямым способом, была равна 0,83 метра. Регистрировались амплитудно-временные зависимости (АВЗ) $A(t)$. Пример АВЗ для спутника ГЛОНСС-18 приведен на рис.2. Данные в виде $A(t)$ были обработаны путем процедуры быстрого Фурье преобразования $A(t) \Rightarrow A(f)$. Примеры представления данных в виде $A(t)$ и $A(f)$ приведены на рис. 2.

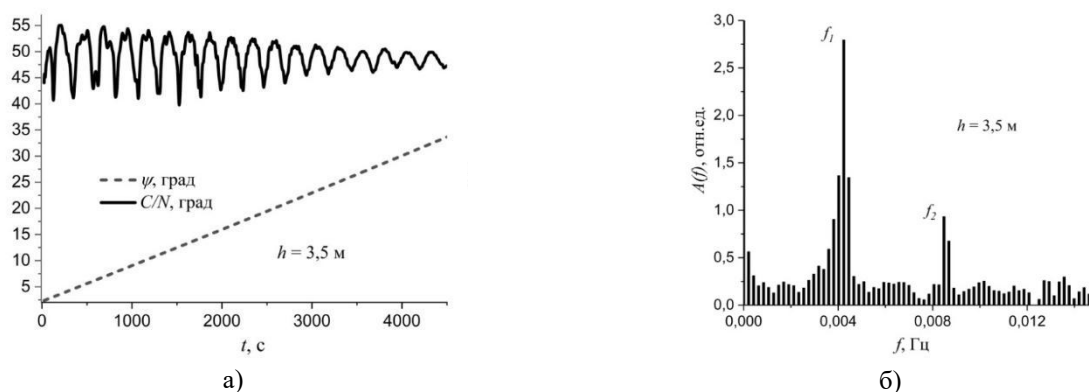


Рис.2. (а) – АВЗ; (б) – результат БФП от АВЗ; R18, ГЛОНСС.

Анализ рефлектометрических измерений на разных высотах приемника, показал, что значения $f_2 - f_1$, f_2 и f_1 линейно зависят от высоты фазового центра приемника h . Ниже приведен пример графических зависимостей $f_2 - f_1$, f_2 и f_1 от $h = 3$ м; 3,5 м и 4 м. (рис. 3) Данные для графиков получены при обработке сигналов от НС GPS 25.

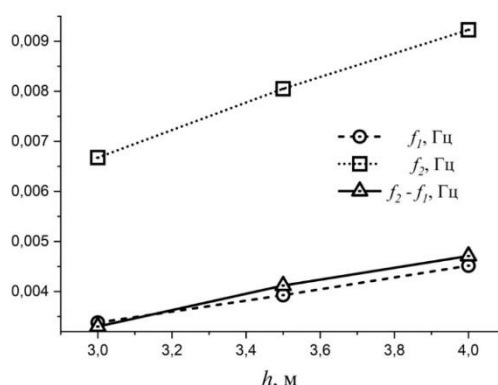


Рис. 3. Зависимости $f_2 - f_1$, f_2 и f_1 от высоты h .

Дальнейший анализ результатов БФП, позволил установить связь между характеристическими частотами в спектре $A(f)$: f_1 , f_2 , $\Delta f = (f_2 - f_1)$, скоростью угла возвышения НС над горизонтом $\left(\frac{\Delta\psi}{\Delta t}\right)$ и высотой фазового центра приемной антенны h в виде постоянной величины – инварианта $k = \left(\frac{f_2 - f_1}{\left(\frac{\Delta\psi}{\Delta t} \cdot h\right)}\right)$, значение которого может быть связано с толщиной льда d .

Выводы. На основе модели существенной области отражения в области радиолокации определены оптимальные условия для рефлектометрических измерений слоистых ледовых поверхностей сигналами навигационных спутников в диапазоне L1. Используя модель, были проведены рефлектометрические измерения,

в результате которых, была установлена связь между полученными данными и высотой фазового центра приемной антенны h в виде постоянной величины – инварианта. Связь величины k с толщиной льда, может быть уточнено путем дополнительных исследований, в которых переменной величиной будет не только высота антенны, но и толщина льда.

Список публикаций:

- [1] Shuanggen Jin, Adriano Camps, Yan Jia, Feng Wang, Manuel Martin Neira, Feixiong Huang, Qingyun Yan, Shuangcheng Zhang, Zhongyu Li, Komi Edokossi, Dongkai Yang, Zhiyu Xiao. Remote sensing and its applications using GNSS reflected signals: advances and prospects. Remote sensing and its applications using // Jin et al. Satellite Navigation, – 2024. – 40p. <https://doi.org/10.1186/s43020-024-00139-4>
- [2] Д.В. Харламов, В.Г. Подопризора, М.Ю. Реушев, Д.С. Макаров, Е.Н. Васильев. Многолучевая интерферометрия от сигналов навигационных спутников в слоистых структурах лесных массивов и льдов пресноводных водоемов. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т.21. № 2. С. 51-60. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-51-60
- [3] Ф.Б. Черный. Распространение волн. М.: Советское радио, 1972. – 463 с.
- [4] В.Д. Сухотерин, В.А. Синицин. Влияние первой зоны Френеля на точность определения угломестных координат низколетящих летательных аппаратов// Биб-лиотека журнала «Военмех, Вестник БГТУ», серия №54, Санкт-Петербург, 2019. – С.133 - 136. URL: <https://repository.library.voenmeh.ru/xmlui/handle/123456789/206> [3] J.M. Elson, K.H. Retehir, Theory of Scattering of Electromagnetic Waves from Surfaces Phys.Stat.Sol.B.- 1978, v. 62, p. 461-468. Г.

Система оперативного обеспечения пользователей КВ радиосвязи краткосрочными прогнозами состояния ионосферы и распространения радиоволн*Романов Илья Владимирович**Григорьев Денис Валерьевич**Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова**E-mail: romanov@ipg.geospace.ru*

Коротковолновая (КВ) радиосвязь сохраняет важное значение в современных системах передачи данных особенно в удаленных слабозаселённых регионах страны и экстремальных условиях Арктики. В то время как спутниковые и волоконно-оптические сети доминируют в глобальных коммуникациях, КВ-диапазон остаётся незаменимым в полярных регионах с их слаборазвитой инфраструктурой и ограниченными возможностями традиционных технологий. В таких регионах низкая плотность населения и суровый климат затрудняют развёртывание оптоволоконных и сотовых сетей, геостационарные спутники имеют плохое покрытие в высоких широтах, а низкоорбитальные группировки могут страдать от задержек и нестабильности связи, геомагнитные бури и полярные сияния нарушают работу радиоканалов и спутниковой навигации. В этих условиях коротковолновая радиосвязь, использующая ионосферное распространение радиоволн, выполняет важные функции, в том числе применение в аварийно-спасательных операциях, научных исследованиях и военной сфере.

Эффективное использование КВ радиосвязи и прогнозирование распространения радиоволн требуют точной информации о текущем состоянии ионосферы и прогнозе. Поскольку КВ-радиоволны распространяются за счет отражения от ионосферных слоев, изменения в ионосфере напрямую влияют на качество и надежность связи. Для прогнозирования радиосвязи необходимо отслеживать несколько ключевых параметров: электронная концентрация, высота ионосферных слоев (D, E, F1, F2), критическая частота (f_oF_2), полное электронное содержание (TEC), уровень ионосферных возмущений. Информацию о состоянии ионосферы получают с помощью наземных и бортовых ионозондов, приемников сигналов низко- и высокоорбитальной томографии, риометров; Для прогнозирования состояния ионосферы используются различные типы моделей: эмпирические модели (IRI, NeQuick); физические модели; гибридные модели; модели реального времени с ассимиляцией данных.

В институте прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ФГБУ ИПГ) создана и применяется в работе ионосферная модель SIMP позволяющая ассимилировать оперативные данные измерений ионосферной наблюдательной сети. Модель обеспечивает долгосрочный и краткосрочный прогноз параметров ионосферы. Запуск космических аппаратов «Ионосфера-М» с бортовым ионозондом и получение оперативных данных измерений параметров ионосферы в труднодоступных регионах страны и мира, приполярных территориях, Арктики и Антарктики, Экватора позволяет обеспечить увеличение точности прогноза ионосферных параметров в ионосферной модели за границами России.

Современные системы прогнозирования КВ радиосвязи используют автоматизированные системы анализа ионосферных данных для прогнозирования, адаптивные системы выбора оптимальных частот, карты распространения радиоволн в реальном времени. Данный принцип использует в своей работе разработанный в ФГБУ «ИПГ» программный комплекс TRASIMP-SW, который предназначен для решения задач планирования и эксплуатации ионосферных радиоперехватов протяженностью от 30 до 10000 км в диапазоне частот 2,0 - 30,0 МГц. Расчет траекторных характеристик трасс протяженностью 30 ÷ 6000 км осуществляется по авторским алгоритмам, для трасс протяженностью более 6000 км используется алгоритм МСЭ-Р Р.533. ПК TRASIMP-SW реализует определение параметров ионосферного радиоканала по данным ионосферной модели с учетом коррекции текущего состояния по данным ионосферной наблюдательной сети и космического сегмента. Модель ионосферы в расчетах может быть представлена в виде одного из четырех вариантов: «Долгосрочный прогноз (модель IRI)»; «Долгосрочный прогноз (модель SIMP)»; «Краткосрочный прогноз (модель SIMP)»; «Текущая обстановка и архив (модель SIMP)». Для прогнозов использующих модель SIMP программный комплекс TRASIMP-SW отправляет запрос о параметрах ионосферы к серверу ФГБУ «ИПГ», время обработки которого в стандартном режиме занимает примерно 10-15 с.

ПК TRASIMP-SW обеспечивает: определение МПЧ, ОРЧ и НПЧ для конкретного времени для заданной линии связи и их суточного хода; определение модовой и лучевой структуры поля в точке приема, нахождение нижних и верхних лучей для перечня линий связи на заданной частоте; определение возможных траекторий распространения радиоволн (в том числе лучом Педерсена) и амплитуд приходящих сигналов; расчет АЧХ, ДЧХ и УЧХ для заданной линии связи, а также динамический диапазон лучей и памяти канала связи на сетке частот.

Таким образом, в институте разработаны инструменты для оперативного обеспечения пользователей КВ радиосвязи краткосрочными и долгосрочными прогнозами состояния ионосферы и распространения радиоволн.

Границы применения приближения физической оптики**Сальников Кирилл Сергеевич***Коношонкин Александр Владимирович, Кустова Наталья Валентиновна, Шишко Виктор Андреевич
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
E-mail: 1015k@mail.ru*

Представлены границы применения приближения физической оптики на основе расчетов для задачи обратного рассеяния на кристаллическом аэрозоле для параметров размера ($k_{eq} = 1 \div 100$). Показатель преломления льда $n=1.3116$ и 1.3004 для длин волн 0.532 и 1.064 мкм соответственно. Решения были получены методами дискретных диполей ($k_{eq} \leq 30$) и приближением физической оптики ($k_{eq} \geq 30$). Обсуждаются сравнение двух методов и границы применимости приближением физической оптики. Расчет проводился для хаотически ориентированных ледяных частиц следующих форм: гексагональных пластинках и столбиках, пулях, дроксталлах и частицах случайной формы.

Облака покрывают от 65 до 70% поверхности Земли, примерно треть из этих облаков составляют перистые облака, состоящие в основном из несферических ледяных частиц, которые существенно влияют на процесс переноса солнечной энергии, и, соответственно на формирование климата нашей планеты. Ледяные кристаллические частицы перистого облака характеризуется своими размерами, формами и ориентацией в пространстве. Принято считать, что для перистых облаков размеры таких кристаллов лежат в диапазоне от 1 до 1000 мкм. В зависимости от ориентации кристаллических частиц, эти облака могут, как задерживать солнечное излучение, так и препятствовать тепловому излучению Земли. Данные, полученные в ходе различных экспедиций направленных на исследование перистых облаков, показали, что в перистых облаках преобладают столбики и пластинки, реже – частицы сложной формы, которые в силу своей специфики являются слабо изученными.

Приближение физической оптики (ФО) является наиболее эффективным методом расчета рассеяния света на больших, по сравнению с длиной волны, несферических частицах. Поэтому целью данной работы является исследование границ применимости данного метода. У приближения ФО нет недостатка геометрической оптики в виде сингулярности в направлении назад, поскольку в нем учитывается явление дифракции за счет интеграла Фраунгофера. Для определения точности решения, полученным приближением ФО, будем сравниваться с методом дискретных диполей – реализация ADDA. Этот точный численный метод основан на объемном сингулярном интегральном уравнении, которое дискретизируется диполями и сводится к системе линейных алгебраических уравнений.

Введем параметр, характеризующий размер частиц - радиус шара r_{eq} , эквивалентный объем которого совпадает с объемом исследуемой частицы. И безразмерный дифракционный параметр k_{eq} .

$$r_{eq} = \sqrt[3]{\frac{3V_{частицы}}{4\pi}}, k_{eq} = \frac{2\pi}{\lambda} r_{eq}, \text{ где } V_{частицы} - \text{объем несферической частицы.}$$

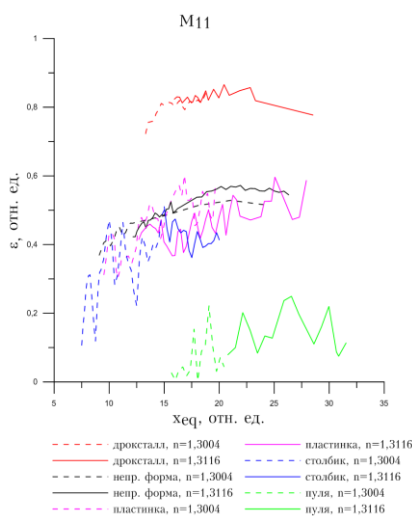


рис. 1. Относительная ошибка дифференциального сечения рассеяния (M_{11}) в зависимости от параметра размера частиц в направлении рассеяния назад на показателях преломления 1.3116 и 1.3004 (пунктир)

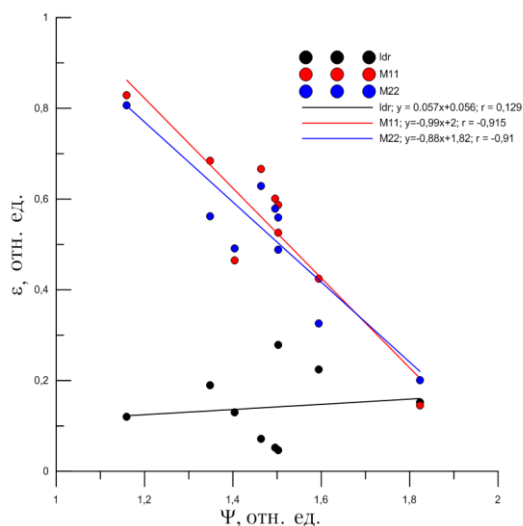


рис. 2. Зависимости относительных ошибок M_{11} , M_{22} и δ от коэффициента сферичности на показателях преломления 1.3116

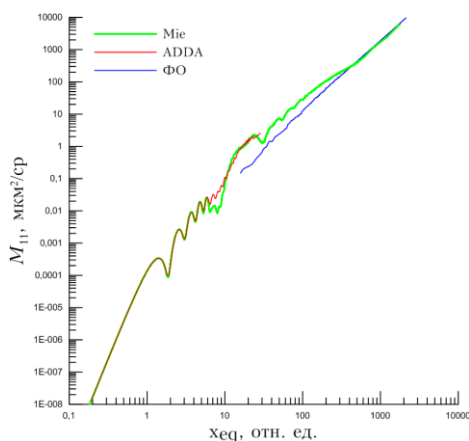


рис. 3. Сравнение точного решения на сфере с решениями на дроксталле в направлении рассеяния назад, показатель преломления 1.3116

Как видно из сравнения (рис. 1, 2) лучшая сходимость методов наблюдается на частице “пуля” благодаря её вытянутой форме. В тоже время дроксталл на малых размерах демонстрирует наихудшую сходимость. Это связано с тем, что у него минимальная площадь поверхности при заданном объеме среди всех рассматриваемых форм частиц. Это увеличивает долю малых рассеянных пучков света, исключаемых из расчётов по методу ФО из-за ограничения на минимальную энергию пучка. На рис. 3 наглядно видно, как интенсивность недоучитывается приближением ФО. Также есть методологическая неточность метода, поскольку не учитываются поля краевых волн, которым отвечают лучи, исходящие из кромок (изломов) тела, и поля соскальзывания (соответствующие лучи срываются с затененной стороны гладкого тела). Данные неточности решены в геометрической теории дифракции.

Исследование выполнено за счет государственного задания ИОА СО РАН.

Оценка воздействия высоковольтных монополярных импульсов напряжения на жизнеспособность микроорганизмов

Невежин Виталий Николаевич¹

Иккерт Ольга Павловна²

Андреев Юрий Анатольевич³

Балзовский Евгений Владимирович³

Смирнов Сергей Сергеевич³

1. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

2. Томский государственный университет

3. Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: vitalayzerman@mail.ru

В настоящее время влияние воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) сверхкороткого импульса (СКИ) на микроорганизмы и биологические объекты недостаточно исследовано, поскольку не существует однозначного мнения о пользе или вреде, оказываемого на живые организмы при длительном облучении их в различных жидких средах. Известно, что воздействие электромагнитных полей (ЭМП) высокой амплитуды приводят к повышению проницаемости клеточной мембраны у клеток и микроорганизмов, вследствие образования электрических пор, что при некоторых параметрах ЭМИ приводят к апоптозу [1].

Нет никаких однозначных результатов, в которых бы сообщалось о влиянии оказываемого серий СКИ высокой амплитуды на биологические объекты находящихся в различных жидких средах. Нет однозначных результатов, в которых бы проводилось сравнение поведения организмов одного вида в отличных по составу химических жидкостях. Как влияет распространение электромагнитного поля в органических и неорганических жидкостях, в которых присутствуют различные микроорганизмы в коаксиальной, экранированной и ТЕМ камерах. Однако сообщается, что подобное воздействие СКИ ЭМИ может приводить к гибели определенного количества микроорганизмов в веществах пригодных для употребления в пищу [2,3].

Существующие методы по стерилизации жидкостей в основном связаны с большими затратами энергии, использование температурной обработки для достижения нейтрализации патогенных микроорганизмов, внесение химически активных веществ, озонирование и другие. Применение их в основной своей массе может нарушить химический состав продукта. В связи с этим использование воздействия СКИ позволяет добиться экологической чистоты и снижением энергетических затрат, без существенной потери качества самого продукта [4-5].

Для экспериментальных исследований воздействия СКИ на грибковые колонии была изготовлена ТЕМ линия. Линия была предназначена для установки чашек Петри высотой 22 мм. Размеры земляной пластины 50 x 20 см. Ширина потенциального электрода в месте установки образцов 100 мм. На входе и выходе ТЕМ линии установлены стандартные радиочастотные разъемы N-типа (50 Ом). Импульс напряжения по коаксиальному кабелю подавался на вход линии с генератора СКИ импульсов (рис. 1). Амплитуда импульса составляла 7 кВ, длительность импульса по уровню 0.1 – 1.7 нс, частота повторения импульсов 300 Гц. Длительность непрерывной работы генератора достигала 8 часов.

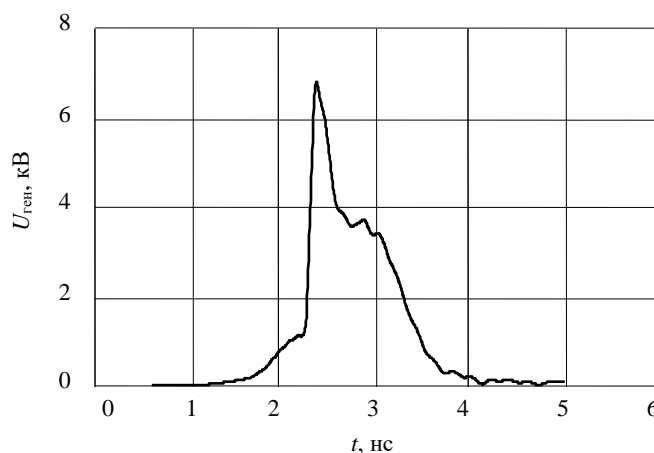


рис.1 Осциллограмма импульса напряжения генератора СКИ.

Выход ТЕМ линии через длинный коаксиальный кабель был подключен к комбинированной СШП антенне [6]. Антенна оптимизирована для возбуждения биполярными импульсами напряжения длительностью 2 нс. Однако, как было показано в [6] антенна может достаточно эффективно преобразовывать энергию монополярного импульса напряжения в коаксиальной линии в энергию электромагнитного импульса, изученного в окружающее пространство. Чтобы исключить воздействие СШП импульсов на окружающее оборудование и операторов установки исследования проводились в безэховой камере. В камере на расстоянии 3 м от передающей антенны была установлена приемная СШП антенна. Сигнал с приемной антенны подавался на осциллограф для контроля стабильной работы генератора по форме излученного импульса.

В работе были использованы микроорганизмы «*Saccharomyces cerevisiae*», которые выращивали на плотной питательной среде Чапека-Докса. После посева микроорганизмов в чашки Петри помещались внутри ТЕМ линии. Затем устанавливалось время воздействия от 10 минут до 8 часов, а после чаши Петри культивировались при температуре 37 градусов в течение 2 суток. Оценка степени воздействия выполнялась при помощи подсчета количества колоний с контрольным образцом.

В результате исследований не было получено однозначного ответа о влиянии СКИ на микроорганизмы. Было решено изменить конструкцию ТЕМ линии с целью уменьшения высоты линии до 12 мм. Ширина модернизированной линии составила 43 мм (рис. 2).

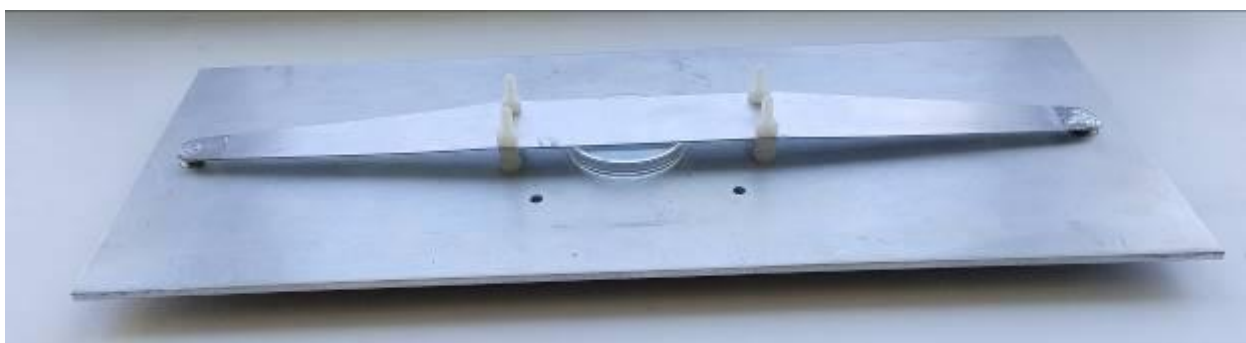


рис.2 Внешний вид ТЕМ линии с установленной чашкой Петри.

Изменение геометрии ТЕМ линии позволит увеличить напряженность поля в области установки чашек Петри в два раза. Подобные изменения в конструкции позволят увеличить однородность поля при воздействии СКИ на микроорганизмы, для получения более достоверного результата.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (тема № FWRM-2021-0002).

Список публикаций:

- [1] Xiao S., Semenov I., Petrella R., Pakhomov A.G., Schoenbach K. H. // *Medical Biological Engineering Computing*. 2017. V.55. P1063
- [2] Шевелев А.В., Михайлова О.В. // *Вестник НГИЭИ*. 2019. № 7(98). С.50
- [3] Kasiviswanathan U., Poddar S., Kumar C. // *Journal of Analytical Science and Technology*. 2020. V. 11, No 25.
- [4] Wetz D., Truman K., Dickens J., Mankowski J., Neuber A., // *Digest of Technical Papers. PPC-2003*. 2003. P. 1124
- [5] El-Hag A., Jayaram S., Griffiths M. // *Plasma Science, IEEE Transactions on*. 2006. V. 34. P. 1412.
- [6] Андреев Ю. А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. // *Радиотехника и электроника*. 2005. Т. 50. № 5. С. 1.

Рассеяние света на атмосферных частицах сложных агрегатов для задач лазерного зондирования на основе метода физической оптики**Ткачев Илья Валерьевич***Шишко Виктор Андреевич¹, Коношонкин Александр Владимирович^{1,2}, Кустова Наталья Валентиновна¹, Тимофеев Дмитрий Николаевич¹, Кан Надежда Владимировна¹**¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия**² Томский государственный университет, г. Томск, Россия**E-mail: tiv@iao.ru*

Облака покрывают до 70% поверхности Земли, из которых примерно 30% составляют перистые облака, оказывающие значительное влияние на климатические процессы [1]. Частицы перистых облаков классифицируются по форме на три категории: выпуклые, невыпуклые и агрегаты. Выпуклые частицы включают шестиугольные столбики и пластины, пули и другие формы. Невыпуклые частицы представлены полыми шестиугольными столбиками. Агрегаты состоят из множественных кристаллических частиц, обладающих различными характеристиками, такими как количество, размер, форма, степень разреженности и взаимное расположение.

В настоящее время разработан алгоритм, базирующийся на методе физической оптики [2], для решения задачи рассеяния света на невыпуклых кристаллах. Тем не менее, агрегаты кристаллических частиц, составляющие значительную долю частиц в атмосфере, остаются недостаточно изученными из-за принципиальных отличий от выпуклых и невыпуклых частиц. Совокупность частиц может существенно варьироваться по своим характеристикам, что требует разработки специализированного численного метода для расчета матриц рассеяния света. Данный метод должен учитывать распространение оптических лучей не по всей частице, а по отдельным её компонентам, создавая переходы между средами "частица-воздух-частица".

В данной работе представлен сравнительный анализ предложенной математической модели агрегата с решением задачи рассеяния света, полученным в рамках приближения физической оптики. Предложена упрощенная математическая модель агрегата, основанная на решении задачи рассеяния света на каждой отдельной частице, входящей в его состав. Результаты, полученные для каждой частицы, суммируются и умножаются на коэффициенты вклада в их общее рассеяние. Такой подход позволяет построить решение в десятки раз быстрее по сравнению с ресурсоемким прямым расчетом задачи рассеяния света на агрегате, при этом погрешность упрощенной модели составляет менее 20%.

На рисунке 1 представлены некоторые наборы частиц сложных агрегатов, которые были использованы для расчета, как пример показаны частицы, содержащие 2, 3, 4 и 5 единичных элементов.

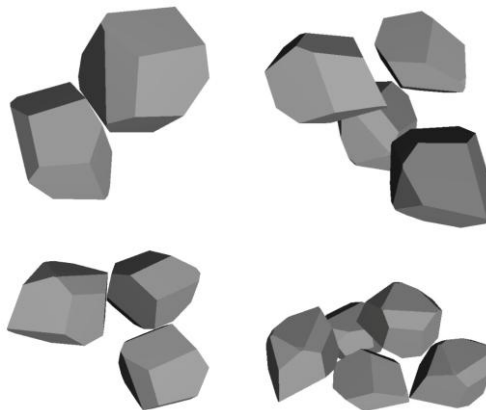


рис. 1. Пример частиц агрегатов сложной формы от двух единичных элементов до пяти соответственно.

Рисунок 2 иллюстрирует зависимость элемента M_{11} матрицы обратного рассеяния (матрицы Мюллера) от номера генерации частицы. Группировки по количеству частиц (элементов) обозначены различными цветами. Анализ данных позволяет выявить прямую корреляцию между количеством элементарных частиц, составляющих сложный агрегат, и интенсивностью рассеяния в обратном направлении. Таким образом, с увеличением числа элементарных частиц в составе агрегата наблюдается повышение интенсивности обратного рассеяния.

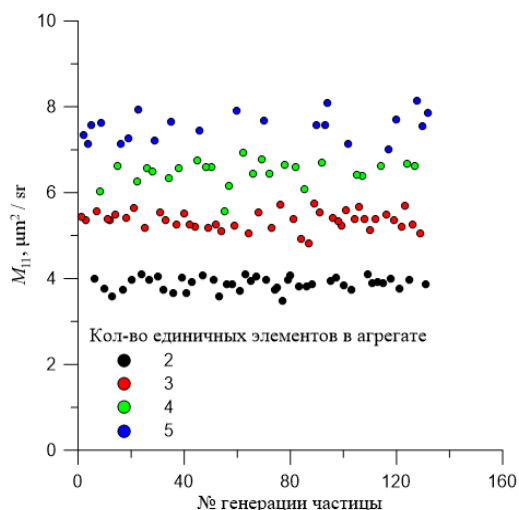


рис. 2 Зависимость элемента M_{11} матрицы Мюллера от номера генерации частицы.

На рисунке 3 (а) демонстрируется значение P_{11} , которое представляет собой отношение элемента M_{11} для агрегата к его площади. Черной пунктирной линией обозначено значение для эталонной частицы, взятой из базы данных 2023 года [3]. Как видно, значение эталонной частицы составляет 0,0093; в то время как значения для остальных частиц варьируются в диапазоне от 0,0065 до 0,0086. Это указывает на то, что при формировании агрегата частицы частично перекрывали друг друга, поскольку их расположение было задано случайным образом. Вследствие этого было получено значение P_{11} для агрегата, которое оказалось ниже, чем для эталонной частицы. На рисунке 3 (а) также присутствуют цветные линии, которые представляют собой трендовые значения для групп, выделенных по количеству элементов.

Рисунок 3 (б) демонстрирует, как расположение частиц и их количество в агрегате влияют на отклонение от трендовых линий. Можно заметить, что большинство частиц имеют отклонение от трендовой линии менее 10%.

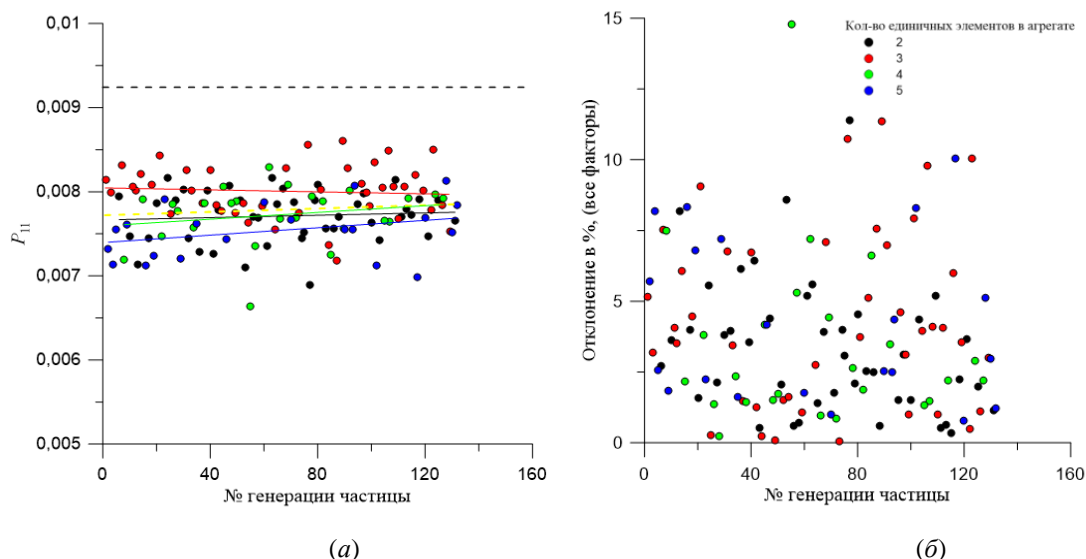


рис. 3 Зависимость P_{11} от номера генерации частицы (а) и зависимость отклонения из-за всех факторов (количества единичных элементов, их расположения в пространстве и т.д.) от номера генерации частицы (б).

Вторая часть работы заключалась в решении задачи рассеяния света на 30 мкм агрегате из восьми гексагональных столбиков (имеющих различные размеры и соотношения сторон (фактор формы)), построенного в рамках приближения физической оптики, с уже существующим решением, полученной группой ученых под руководством Р. Yang [4].

На рисунке 4 представлено сравнительное исследование элемента M_{11} матрицы рассеяния, полученного методом физической оптики и решением Р. Yang. Анализ результатов выявил существенные различия между двумя подходами. В частности, в направлении рассеяния строго «назад», что имеет критическое значение для задач лазерного зондирования, расхождение достигает 1,5 раз, что может существенно повлиять на

интерпретацию лидарных данных.

Ранее было проведено исследование формирования гало на длине волны 1,064 мкм, в ходе которого было установлено, что гало начинает формироваться при размере гексагонального столбика более 14 мкм [5]. Этот факт может объяснить отсутствие гало в решении, полученном методом физической оптики, где наблюдается гладкая структура. Однако это противоречит наличию гало в решении Р. Yang.

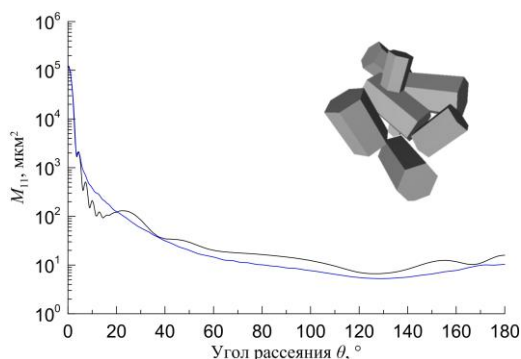


рис. 4 Сравнение элемента M_{11} матрицы рассеяния света построенного от угла рассеяния θ , полученного методом физической оптики (синяя линия) с решением из базы данных Р. Yang (черная линия). Размер агрегата – 30 мкм, длина волны – 1,064 мкм.

Следует отметить, что предыдущие исследования гало были сосредоточены на столбиках с соотношением сторон $Q \approx 1,42$. В то же время, в агрегате столбики имеют различные соотношения сторон, варьирующиеся от 1,3 до 1,7 [6]. В связи с этим было принято решение провести исследование столбиков, входящих в состав агрегата, для более глубокого понимания механизмов формирования гало.

В качестве демонстрации вычислений матрицы рассеяния света представлена величина элемента M_{11} для каждого гексагонального столбика, входящего в состав исследуемого агрегата, в рамках модели физической оптики. Графическое представление данных приведено на рисунке 5 (а). На рисунке 5 (б) представлено отношение M_{11}/CS , где CS обозначает геометрическое сечение рассеяния частицы, что позволяет привести решение к единому нормализованному виду.

Анализ данных, представленных на рисунке 5, выявляет значительные отклонения для двух наименьших частиц ($L = 4,07$ мкм и $L = 5,87$ мкм). Эти отклонения предположительно обусловлены малым размером частиц относительно длины волны падающего излучения. Однако следует отметить отсутствие гало-эффекта, что ставит под сомнение достоверность наблюдений гало, зафиксированных в решении Р. Yang для данного агрегата.

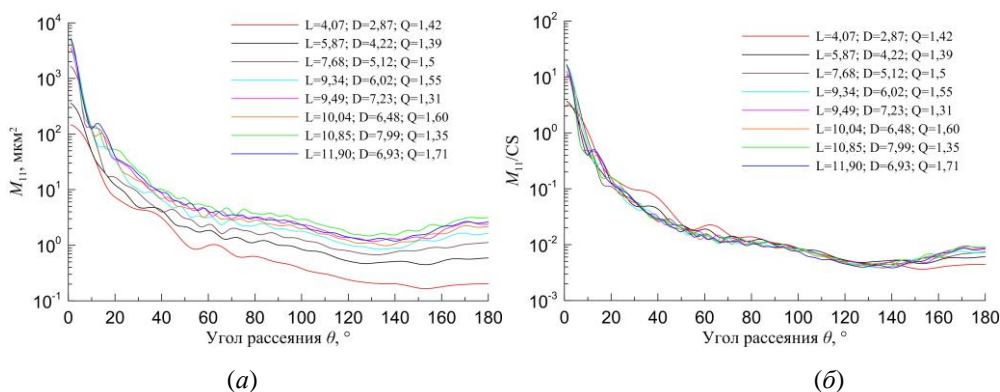


рис. 5 (а) Зависимость элемента M_{11} матрицы рассеяния света от угла рассеяния θ , построенные в рамках приближения физической оптики для гексагональных столбиков с представленными параметрами (L – длина, D – диаметр основания, $Q=L/D$ – фактор формы). (б) Зависимость отношения M_{11}/CS от угла рассеяния θ .

Для разработки математической модели агрегата было использовано предположение, что решение задачи рассеяния света на агрегате может быть получено путем умножения решения для отдельной частицы, входящей в состав агрегата, на отношение сечения рассеяния всего агрегата к сечению рассеяния одной частицы.

На основании этого предположения было проведено вычисление сечения рассеяния для каждого гексагонального столбика, являющегося компонентом агрегата. Затем на основе полученных сечений рассеяния были рассчитаны коэффициенты, сумма которых равняется единице.

$$a = \frac{309,953897}{1694,78} = 0,183 ;$$

$$e = \frac{216,125929}{1694,78} = 0,128 ;$$

$$b = \frac{342,792051}{1694,78} = 0,202 ;$$

$$f = \frac{152,213756}{1694,78} = 0,09 ;$$

$$c = \frac{256,643829}{1694,78} = 0,151 ;$$

$$g = \frac{97,509578}{1694,78} = 0,058 ;$$

$$d = \frac{273,947181}{1694,78} = 0,162 ;$$

$$h = \frac{45,592521}{1694,78} = 0,027 ,$$

Знаменатель в данном контексте соответствует сечению рассеяния, которое определено в рамках математической модели агрегата. Коэффициенты $a(L=11,9)$, $b(L=10,85)$, $c(L=10,04)$, $d(L=9,49)$, $e(L=9,34)$, $f(L=7,68)$, $g(L=5,87)$, $h(L=4,07)$ представляют собой индивидуальные вклады каждой частицы в общее сечение рассеяния математической модели агрегата. В данной формуле L обозначает длину столбика.

На основании вышеуказанной формулы (1) можно осуществить построение математической модели агрегата:

$$Agg_model = a \cdot M_{ij}(L=11,90) + b \cdot M_{ij}(L=10,85) + c \cdot M_{ij}(L=10,04) + d \cdot M_{ij}(L=9,49) + e \cdot M_{ij}(L=9,34) + f \cdot M_{ij}(L=7,68) + g \cdot M_{ij}(L=5,87) + h \cdot M_{ij}(L=4,07) \quad (1),$$

где M_{ij} – элемент ij матрицы рассеяния.

На рисунке 6 представлены следующие данные:

1. Зависимость отношения M_{11}/CS для математической модели агрегата, обозначенная красной кривой.
2. Зависимость отношения M_{11}/CS , полученная методом физической оптики для задачи рассеяния света на агрегате, состоящем из 8 столбиков, представленная синей кривой.
3. Решение для агрегата из 8 столбиков в направлении "вперед", выделенное желтым пунктиром. Данное направление характеризуется тем, что решение для него может быть получено значительно быстрее, чем для других направлений рассеяния.
4. Погрешность решения для модельного агрегата относительно агрегата из 8 столбиков обозначена зеленым пунктиром.

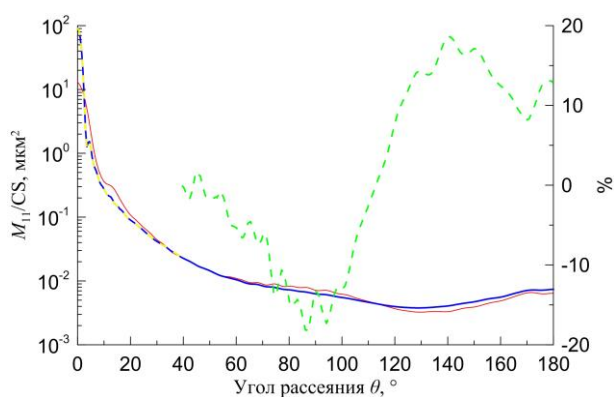


рис. 6 Зависимость отношения M_{11}/CS от угла рассеяния θ для: математической модели агрегата (красная кривая); агрегата из 8 столбиков (синяя кривая). И погрешность решения для модельного агрегата относительно агрегата из 8 столбиков (зеленый пунктир), решение для агрегата из 8 столбиков в конусе направления «вперед» (желтый пунктир).

В первой части работы проведенного исследования были изучены агрегаты частиц сложной формы с целью определения закономерностей изменения оптических характеристик в зависимости от количества составляющих элементов, расстояниями между ними и их пространственного расположения. Были определены трендовые значения для групп частиц, классифицированных по количеству составляющих элементов. Установлено, что подавляющее большинство частиц демонстрируют отклонение от трендовой линии не более чем на 10%.

Во второй части исследования показано, что замена решения для агрегата из 8 столбиков (размер 30 мкм) на математическую модель экономит затраченное время расчета в десятки раз. При этом учитывая погрешность

модели относительно прямого решения (до 20%), представляется более целесообразным производить расчеты для составляющих агрегата частиц и на их основе уже формировать математическую модель агрегата.

Такие модели агрегатов демонстрируют свою эффективность в первоначальной оценке их влияния на оптические характеристики перистых облаков как в контексте лазерного зондирования, так и при решении задач переноса излучения.

Построение решения задачи рассеяния света по всем углам направлений рассеяния для агрегатов атмосферных ледяных частиц выполнено при финансовой поддержке РНФ No. 25-17-00087, <https://rscf.ru/project/25-17-00087/>.

Список публикаций:

[1] Kärcher B. *Cirrus Clouds and Their Response to Anthropogenic Activities* // *Curr. Clim. Change Rep.* 2017. V. 3. P. 45–57

[2] Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. *The physical-optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals* // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2014. V. 146. P. 181–189. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.04.030.

[3] “Database of light backscattering of cirrus clouds’ ice crystals”

ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical_optics/Backscattering/Data_bank_2023_level_2/

[4] Yang P., Bi L., Baum B., Lion K-N., Kattawar G., Mishchenko M., Cole B. *Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 to 100 μm* // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70. P. 330–347. DOI: 10.1175/JAS-D-12-039.1.

[5] Кан Н.В., Шишко В.А., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. *Исследование изменчивости гало 46° при вариации размера хаотически ориентированного ледяного гексагонального столбика в рамках метода физической оптики* // В сборнике: XXX Юбилейный Международный симпозиум Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Сборник материалов. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024. С. В642–В646. DOI: 10.56820/OAO30B80

[6] Timofeev D., Kustova N., Shishko V., Konoshonkin A. *Light-Scattering Properties for Aggregates of Atmospheric Ice Crystals within the Physical Optics Approximation* // *Atmosphere.* 2023. V. 14, No 6. 933. DOI: 10.3390/atmos14060933.

Аналитическое решение дисперсионных уравнений для показателя особенности поля в многосекторных структурах с общим ребром***Фисанов Василий Васильевич****Томский государственный университет**E-mail: fisanov@mail.tsu.ru*

В теории дифракции электромагнитных волн в дополнение к граничным условиям вводится так называемое «условие на ребре», если поверхность рассеивающего объекта содержит складки с острым краем наподобие ребра полуплоскости. Вблизи ребра напряжённость перпендикулярных к нему компонент электромагнитного поля обычно неограниченно нарастает с уменьшением расстояния до этой неоднородности. По Мейкснеру, порядок роста должен быть таким, чтобы плотность электромагнитной энергии в области пространства, окружающей край, была интегрируемой [1]. Если сингулярное радиальное поведение поля в малой окрестности ребра характеризуется степенной функцией как ρ^t с показателем $t = -1 + \tau$, то показатель роста (особенности) поля τ должен быть строго положительным и не превышать значение $\tau = 1$. Знание значения τ гарантирует корректность постановки и единственность решения задачи дифракции, оно также полезно для создания эффективных алгоритмов численного расчёта полей и позволяет оценить опасность электрического пробоя. Для идеально проводящего экрана типа полуплоскости было получено значение показателя особенности $\tau = 1/2$ [1], а для идеально проводящего клина, ограничивающего однородное пространство с угловым размером Ψ в полярных координатах (ρ, φ) – значение $\tau = \tau_0 = \pi/\Psi$ [2].

Теория расчёта поля в окрестности общего ребра многосекторных структур, когда доступная для поля область Ψ поделена на два или несколько секторов, изложена в [3, 4]. Согласно Мейкснеру [3], параллельная ребру составляющая магнитного поля в j -м секторе с диэлектрической проницаемостью ε_j есть

$$H_z = \rho^\tau [A_j \sin(\tau\varphi) + B_j \cos(\tau\varphi)] [1 + O(\rho)], \quad (1)$$

тогда как поперечные составляющие электрического поля имеют особенность вида $\rho^{\tau-1}$. Многосекторная (m -секторная) структура является своеобразной линией передачи по отношению к угловой координате φ и может характеризоваться парциальной унимодулярной матрицей передачи $\bar{\mathbf{a}}_j$, которая обеспечивает согласование касательных компонент электромагнитного поля на j -й и $(j-1)$ -й гранях отдельного сектора, а именно:

$$\begin{pmatrix} E_j \\ H_j \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos(\tau\psi_j) & \zeta_j \sin(\tau\psi_j) \\ -\varepsilon_j \sin(\tau\psi_j) & \cos(\tau\psi_j) \end{pmatrix}}_{\bar{\mathbf{a}}_j} \cdot \begin{pmatrix} E_{j-1} \\ H_{j-1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\zeta_j = 1/\varepsilon_j$, $\psi_j = \varphi_j - \varphi_{j-1}$ – угловой размер j -го сектора [4]. Дисперсионное уравнение относительно показателя τ получается путём перемножения всех парциальных матриц передачи структуры

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^m \bar{\mathbf{a}}_j = \bar{\mathbf{a}}_m \cdot \bar{\mathbf{a}}_{m-1} \cdot \dots \cdot \bar{\mathbf{a}}_j \cdot \dots \cdot \bar{\mathbf{a}}_2 \cdot \bar{\mathbf{a}}_1, \quad (3)$$

и приравнивания нулю элементов итоговой матрицы структуры $\bar{\mathbf{A}}$. Равенство $A_{11} = 0$ приводит к дисперсионному уравнению для структуры с внешними гранями смешанной проводимости, если первая грань первого сектора является магнитной стенкой, а вторая грань m -го сектора является электрической стенкой; равенству $A_{22} = 0$ соответствует аналогичная структура с переставленными стенками смешанной проводимости. Равенство $A_{12} = 0$ даёт дисперсионное уравнение для структуры с обеими электрическими стенками, а равенство $A_{21} = 0$ – для структуры с обеими магнитными стенками. Для полностью прозрачной структуры, в которой отсутствуют идеально проводящие грани, дисперсионное уравнение следует из соотношения $A_{11} + A_{22} = 2$ [5]. Возникающие многопараметрические трансцендентные уравнения содержат тригонометрические функции и, как правило, не имеют явного решения в замкнутом виде. Для некоторых достаточно простых структур были представлены отдельные аналитические решения в [4] и [6]. По общему правилу, из множества нулей дисперсионного уравнения в качестве τ принимается наименьшее положительное решение этого уравнения или комплексное решение, имеющее наименьшую положительную вещественную часть.

Особого внимания заслуживают структуры, образованные секторами единого размера $\psi_m = \Psi/m$, где $\Psi = 2\pi - \psi_0$ и ψ_0 – раствор идеально проводящего сектора. В случае проводящей полуплоскости, а также при отсутствии проводящих граней принимается значение $\Psi = 2\pi$. Варьируя диэлектрическими параметрами и числом дискретизации m , можно получить большой набор разнообразных структур, в том числе наиболее часто востребованных в приложениях. Применительно к диэлектрическим трёх- и четырёхсекторным структурам с положительными проницаемостями и с двумя электрически-проводящими стенками были формально получены, но не исследованы решения на основе функции $\operatorname{tg}(\tau\psi_m)$ [4]. Использование тангенса представляется не вполне удачным, поскольку главное значение обратной функции – арктангенса – может принимать отрицательные значения. Более перспективным является применение косинуса, в частности, косинуса удвоенного аргумента [7],

поскольку главное значение арккосинуса является положительной величиной. Все варианты дисперсионных уравнений приводятся к универсальному виду

$$\cos(2\tau\psi_m) = a_m, \quad (4)$$

где определяющий параметр a_m является функцией, зависящей только от набора проницаемостей конкретной структуры. Например, для трёхсекторных структур с идентичными проводящими гранями

$$a_3 = \frac{\varepsilon_2^2 - (\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_1\varepsilon_3 + \varepsilon_2\varepsilon_3)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)}, \quad (5)$$

а для таких же структур со смешанными проводящими гранями

$$a_3 = \frac{\varepsilon_1(\varepsilon_2 + \varepsilon_3) + \varepsilon_2(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)}, \quad (6)$$

причём при положительных проницаемостях ε_j выражения (5) и (6) являются вещественными рациональными дробными функциями, по абсолютной величине не превосходящими единицу [8]. Однако при наличии отрицательных проницаемостей, что свойственно метаматериалам и плазмоподобным средам, параметр a_m может иметь нули знаменателя и, следовательно, может по абсолютному значению превышать единицу, а формула (4) сохранит смысл только для комплексных значений τ . Начиная с номера $m = 4$, параметр a_m оказывается корнем алгебраического уравнения второй или более высокой степени, вследствие чего он становится иррациональным выражением. По этой причине даже при вещественных ε_j он, а также показатель особенности τ может оказаться комплексной величиной. При комплексных значениях $\tau = \text{Re}(\tau) + i \text{Im}(\tau)$ показателем особенности фактически является его вещественная часть $\text{Re}(\tau)$. $\text{Im}(\tau)$ не оказывает влияния на радиальное поведение энергии поля, так как $|\rho^{\text{Re} \tau + i \text{Im} \tau}| = \rho^{\text{Re} \tau}$.

Пусть правая часть формулы (4) является комплексным числом: $a_m = x + iy$, откуда следует

$$2\tau\psi_m = \arccos(x + iy). \quad (7)$$

Согласно формулам (507.20) и (507.21) из справочника Двайта [9], имеет место формула

$$\arccos(x \pm iy) = \arccos\left(\frac{2x}{p+q}\right) \mp i \text{Arch}\left(\frac{p+q}{2}\right), \quad (8)$$

где применены обозначения $p = \sqrt{(1+x)^2 + y^2}$, $q = \sqrt{(1-x)^2 + y^2}$. Поэтому из (7) и (8) следует

$$2\psi_m \text{Re}(\tau) = \arccos\left(\frac{2x}{p+q}\right) = \arccos\left(\frac{p-q}{2}\right). \quad (9)$$

Необходимо иметь в виду, что формула (9) для $y = 0$ (то есть для вещественных значений a_m) даёт различные результаты в зависимости от знака и величины x по сравнению с единицей.

Пусть далее имеется квадратное уравнение вида $az^2 + 2bz + c = 0$ с вещественными коэффициентами, где под z понимается в дальнейшем параметр a_m . Оно имеет вещественные корни

$$z_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - ac}}{a},$$

если дискриминант $D = b^2 - ac > 0$, и комплексно-сопряжённые корни $z_{1,2} = x \pm iy$, если $D < 0$. Отождествим их с комплексным значением величины a_m . По теореме Виета имеем: $z_1 + z_2 = -\frac{2b}{a}$, $z_1 z_2 = \frac{c}{a}$. Кроме того, $z_1 - z_2 = \frac{2\sqrt{D}}{a}$. Для комплексно-сопряжённых корней справедливы формулы $z_1 + z_2 = 2x$, $z_1 - z_2 = 2iy$, $z_1 z_2 = x^2 + y^2$. Следовательно, имеют место формулы

$$x = -\frac{b}{a}, \quad y = \frac{\sqrt{-D}}{a}, \quad |z_1|^2 = |z_2|^2 = \frac{c}{a}, \quad (10)$$

и для величин p и q получаются выражения:

$$p = \sqrt{\frac{a-2b+c}{a}}, \quad q = \sqrt{\frac{a+2b+c}{a}}. \quad (11)$$

В итоге имеем для показателя особенности:

$$\text{Re}(\tau) = \frac{1}{2\psi_m} \arccos \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{a-2b+c}{a}} - \sqrt{\frac{a+2b+c}{a}} \right) \right]. \quad (12)$$

Формула (12) справедлива только для отрицательных значений дискриминанта D . В случае $D = 0$, то есть для пары вещественных идентичных корней квадратного уравнения, формула (12) непосредственно не применима. Из равенства нулю дискриминанта следует, что $b = \sqrt{ac} \text{sign}(b)$, причём корень \sqrt{ac} является вещественным вследствие формул (10). Вещественные корни квадратного уравнения есть

$$z_1 = z_2 = x = -\frac{\sqrt{ac} \text{sign}(b)}{a} = \sqrt{\frac{c}{a}} \text{sign}(-ab).$$

Теперь следует конкретизировать величины $\left\{ \frac{p}{q} \right\} = \left| 1 \pm \sqrt{\frac{c}{a}} \text{sign}(-ab) \right|$. Если выполняется неравенство $\frac{c}{a} <$

1, то $p = 1 + \sqrt{\frac{c}{a}} \text{sign}(-ab)$, $q = 1 - \sqrt{\frac{c}{a}} \text{sign}(-ab)$. На основании формулы (9) имеем:

$$\operatorname{Re}(\tau) = \frac{1}{2\psi_m} \arccos \left[\sqrt{\frac{c}{a}} \operatorname{sign}(-ab) \right] = \begin{cases} \frac{1}{2\psi_m} \arccos \sqrt{\frac{c}{a}}, \operatorname{sign}(-ab) = +1 \\ \frac{1}{2\psi_m} \left[\pi - \arccos \sqrt{\frac{c}{a}} \right], \operatorname{sign}(-ab) = -1 \end{cases}. \quad (13)$$

Если имеет место противоположное неравенство $\frac{c}{a} > 1$, а также $\operatorname{sign}(-ab) = +1$, то $p = 1 + \sqrt{\frac{c}{a}}$, $q = \sqrt{\frac{c}{a}} - 1$, $p - q = 2$; если же $\frac{c}{a} > 1$, но $\operatorname{sign}(-ab) = -1$, то $p = \sqrt{\frac{c}{a}} - 1$, $q = \sqrt{\frac{c}{a}} + 1$, $p - q = -2$. Поэтому для $\frac{c}{a} > 1$

$$\operatorname{Re}(\tau) = \frac{1}{2\psi_m} \arccos \left(\frac{p-q}{2} \right) = \begin{cases} 0, \text{ если } ab < 0, \\ \frac{\pi}{2\psi_m}, \text{ если } ab > 0. \end{cases} \quad (14)$$

При делении угловой области на 5 равных частей иногда возникают комплексные значения параметра a_5 . Например, для симметричной структуры $\{1\varepsilon\varepsilon1\}$ с обеими электрически проводящими гранями, к которым примыкают секторы с $\varepsilon = 1$, дисперсионное уравнение

$$2(\varepsilon + 1)^2 \cos^2(2\tau\psi_5) - (\varepsilon + 1)(\varepsilon - 3) \cos(2\tau\psi_5) + (1 - 2\varepsilon - \varepsilon^2) = 0 \quad (15)$$

сводится к форме [8]

$$\cos(2\tau\psi_5) = \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon - 3}{\varepsilon + 1} + \sqrt{\frac{9\varepsilon + 1}{\varepsilon + 1}} \right) \quad (16)$$

согласно которой параметр a_5 является комплексной величиной, если $-1 < \varepsilon < -1/9$. Вычисление $\operatorname{Re}(\tau)$ выполняется по формуле (12), где следует положить $a = 4(\varepsilon + 1)^2$, $b = -(\varepsilon + 1)(\varepsilon - 3)$, $c = 2(1 - 2\varepsilon - \varepsilon^2)$.

Принимается во внимание, что в указанном промежутке $p = \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1} \right| = -\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1}$, $q = \frac{\sqrt{2\varepsilon + 3}}{|\varepsilon + 1|} = \frac{\sqrt{2\varepsilon + 3}}{\varepsilon + 1}$:

$$\operatorname{Re}(\tau) = \frac{1}{2\psi_5} \arccos \left(-\frac{\varepsilon + \sqrt{2\varepsilon + 3}}{2(\varepsilon + 1)} \right). \quad (17)$$

Как следует из формулы (17), в указанном интервале происходит с ростом ε уменьшение $\operatorname{Re}(\tau)$ от значения $\frac{\pi}{2\psi_5}$ к значению $\frac{1}{2\psi_5} \arccos \left(-\frac{7}{8} \right)$.

При отсутствии проводящих граней, пятисекторная структура $\{\varepsilon\varepsilon11\}$ характеризуется формулой [10]

$$\cos \left(\frac{2\pi}{5} \tau \right) = a_5 = \frac{1}{4} \left(-1 + \sqrt{\frac{\varepsilon + 9}{\varepsilon + 1}} \right). \quad (18)$$

Формула (18) является корнем квадратного уравнения $2(\varepsilon + 1)a_5^2 + (\varepsilon + 1)a_5 - 1 = 0$ с коэффициентами $a = 4(\varepsilon + 1)$, $b = (\varepsilon + 1)$, $c = -2$, дискриминант которого является отрицательным в промежутке $-9 < \varepsilon < -1$.

Вычисление по формулам (11) и (12) даёт результат

$$\operatorname{Re}(\tau) = \frac{5}{2\pi} \arccos \left\{ \frac{-\sqrt{-(\varepsilon + 1)}}{\sqrt{2}[\sqrt{-\varepsilon} + \sqrt{-(3\varepsilon + 2)}} \right\}. \quad (18)$$

На левом конце интервала с отрицательным дискриминантом, то есть при $\varepsilon = -9$ получается значение $\operatorname{Re}(\tau) = \frac{5}{2\pi} \arccos \left(-\frac{1}{4} \right)$, а на правом конце – значение $\operatorname{Re}(\tau) = \frac{5}{4}$.

Предложенный метод может оказаться полезным и в случаях, если дисперсионное уравнение приводится к алгебраическим уравнениям 3-й и 4-й степени, аналитическое решение которых содержит квадратные корни и в принципе является возможным.

Список публикаций:

- [1] Meixner J. // *Annalen der Physik*. 1950. V. 6. No. 1. P. 1.
- [2] Maue A. W. // *Zeitschrift für Physik*. 1949. V. 126. No. 7, P. 601.
- [3] Meixner J. // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1972. V. 20. No. 4. P. 442.
- [4] Hurd R. A. // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1976. V. 24. No. 1. P. 70.
- [5] Фисанов В. В. // *Радиотехника и электроника*. 2007. Т. 52. № 9. С. 1072.
- [6] Миттра Р., Ли С. *Аналитические методы теории волноводов*. М.: Мир, 1974.
- [7] Фисанов В. В. // *Известия вузов. Физика*. 1985. Т. 28. № 9. С. 92.
- [8] Бобровников М. С., Фисанов В. В. *Дифракция волн в угловых областях*. Томск: Изд-во Томского университета, 1988.
- [9] Двайт Г. Б. *Таблицы интегралов и другие математические формулы*. М.: Наука, 1977.
- [10] Фисанов В. В. // *Известия вузов. Физика*. 2006. Т. 49. № 8. С. 56.

Генератор коротких импульсов поля магнитной индукции**Хлыстун Евгений Сергеевич***Злыгостев Игорь Николаевич, Юрченко Алексей Васильевич
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
Томский политехнический университет
E-mail: zheka.hlistyn@gmail.com***Аннотация**

Широкий спектр практических задач инженерной геофизики диктует необходимость детального исследования малых глубин геоэлектрической структуры. Возможность таких исследований методом переходных процессов обуславливает возбуждение геологической среды короткими импульсами с последующей регистрацией компонент вектора магнитной индукции с высокой частотой. Данная работа посвящена оптимизации технических характеристик быстродействующего коммутатора тока и вертикального магнитного диполя (ВМД), излучения высокоамплитудных коротких видеоимпульсов магнитной индукции B_z .

Введение

В работе [1] выполнено численное моделирование, возможности определения малоразмерного объекта на глубине 30 м, коротким видеоимпульсом (~ 100 нс), с регистрацией $3^{\text{х}}$ компонент магнитной индукции. Одним из результатов, данного численного эксперимента, является формирование технических требований к системе генерирования зондирующих импульсов, необходимых для успешного решения прикладных задач инженерной геофизики. Ключевыми параметрами зондирующих импульсов являются: амплитуда, длительность и, главным образом, время спада. Так как эти параметры взаимосвязаны, то одной из основных характеристик системы будет произведение амплитуды и длительности импульса:

$$Q = B_z \cdot \tau = 0,05 \text{ [нТл} \cdot \text{с]} \quad (1)$$

где: B_z – поле магнитной индукции в центре ВМД, τ – длительность импульса.

Вертикальный магнитный диполь представляет собой круглый виток из проводника, через который протекает ток. Величина компоненты B_z определяется величиной тока (I) и геометрическими размерами (R) витка: $B_z \approx \mu_0 I / 2R$.

Как правило, формирование мощных импульсов производится путем апериодического разряда накопительного конденсатора, предварительно заряженного от высоковольтного источника напряжения, через последовательный RLC – контур (критический случай) [2].

Численный эксперимент [1] показывает, что технические характеристики ранее разработанного генератора [3], недостаточны для решения прикладных задач инженерной геофизики, что обуславливает необходимость в оптимизации как конструкции ВМД, так и схемотехнических решений коммутатора.

Вертикальный магнитный диполь

В качестве излучателя магнитного поля был выбран плоский диск с центральным отверстием, который представляет собой индуктивность L , из-за более равномерного распределения поверхностных токов, меньшей индуктивности и геометрических размеров. Высокая величина L ограничивает амплитуду тока и увеличивает длительность среза импульса. Индуктивность плоского диска определяется по формуле [4]:

$$L = \mu_0 R_{oc} \left[\ln \left(\frac{8R_{oc}}{a+r} \right) - 0,5 \right] \quad (2)$$

где: $R_{oc} = \frac{R_2 + R_1}{2}$ – радиус осевой линии, R_1 — внутренний радиус, R_2 — внешний радиус, r — ширина диска, a — толщина диска.

Поле магнитной индукции в центре диска определяется как [5]:

$$\vec{B}_z = \frac{\mu_0 I_0 \cdot (R_2 - R_1)}{2R_1 R_2 \cdot \ln(R_2/R_1)} \quad (3)$$

Оптимальные геометрические параметры ВМД определяются следующими критериями: минимальное значение индуктивности, максимальное значение поля магнитной индукции, габариты не должны превышать 500×500 мм, для оперативного выполнения профильного зондирования верхней части разреза и не менее 150×150 мм, так как исследуемый объем среды на прямую зависит от площади магнитного диполя и времени регистрации сигнала.

Из анализа (2) следует, что основными параметрами, определяющим величину индуктивности витка, является его осевой радиус и ширина диска, определяемыми значениями R_1 и R_2 (рис. 1 и 2).

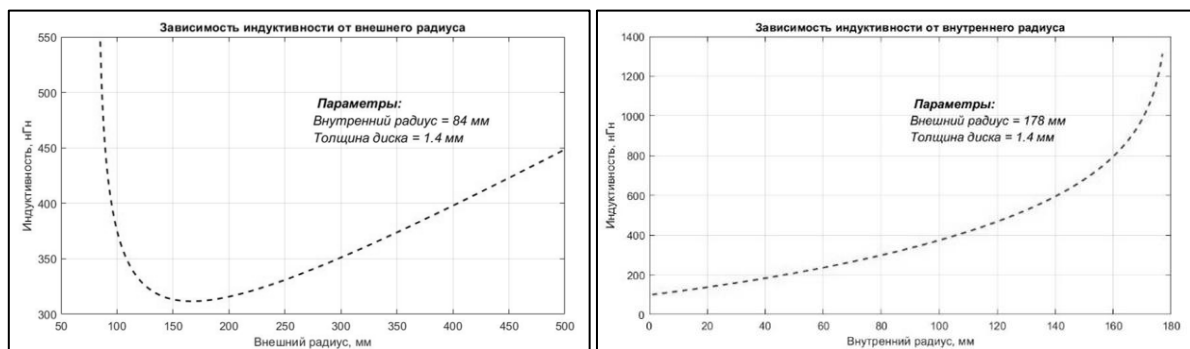


рис. 1 Зависимость индуктивности от внешнего и внутреннего радиусов

Величина компоненты B_z имеет другую, более сложную зависимость от этих размеров (7). Процедура решения этой оптимизационной задачи представляет собой итерационный процесс последовательных приближений, связанный с большим объемом вычислений. Результатом решения этой задачи является небольшой набор наиболее подходящих вариантов размеров диполя, приведенный в таблице:

№	R_1 , мм	R_2 , мм	r , мм	R_{OC} , мм	L , нГн	B_z , нТл ($I_0=10$ А)
1	10	150	140	80	101,1	216 500
2	20	150	130	85	121,7	135 100
3	30	150	120	90	144,2	104 100

Быстродействующий коммутатор высокоамплитудных токовых импульсов

Мощные токовые импульсы формируются путем разряда накопительного конденсатора, предварительно заряженного от высоковольтного источника напряжения, при замыкании ключа К1, через индуктивность (рис. 2а) формируя последовательный RLC – контур (критический случай) [2]. Данный коммутатор имеет ряд принципиальных недостатков, например: для устранения паразитного «звона» необходимо вводить балластное сопротивление, которое ограничивает максимальный ток в индуктивности (в момент времени τ), формула (4); а длительность импульса определяется постоянной времени, формула (5). Переходной процесс можно считать завершённым спустя $t = (4 \div 5) \cdot \tau$, по достижению которого ток в цепи $i = (1 \div 2\%) \cdot I_{MAX}$.

$$I_{MAX} = -\frac{2U}{e \cdot R_6} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{2L}{R_6} \quad (5)$$

где: U — напряжение на конденсаторе (в нулевой момент времени);

$R_6 = 2\sqrt{L/C}$ — балластное сопротивление (условие критического режима).

Оптимизационным схемотехническим решением является добавлением ключа К2 и балластного сопротивления R_{62} , формируя замкнутую RL – цепь (рис. 2б) [2]. Основным преимуществом такой схемы является то, что длительность импульса в основном определяется временем размыкания К1, К2 замыкается с некоторым наложением на размыкание К1, формируя схему низкодобротного параллельного RLC-контура, что позволяет увеличить крутизну среза импульса, постоянная времени которого определяется как:

$$\tau = \frac{L}{R_6 + R_{62}} \quad (6)$$

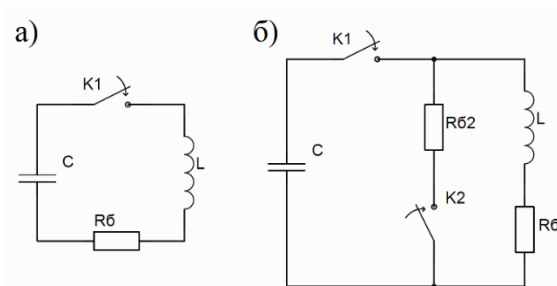


рис. 2 Упрощенная схема формирователя токовых импульсов

Результаты

Выполнен сравнительный анализ формируемых импульсов, длительностью ~ 100 нс, графики численного моделирования 3 вариаций схем коммутатора представлены на рис. 3, где легенды:

- 1) RLC: $L=350$ — последовательный RLC-контур с индуктивностью $L=350$ нГн (рис. 2а);
- 2) RLC: $L=100$ — последовательный RLC-контур с индуктивностью $L=100$ нГн (рис. 2а);
- 3) RLC-RL — последовательный RLC и короткозамкнутым RL-контур (рис 2б);

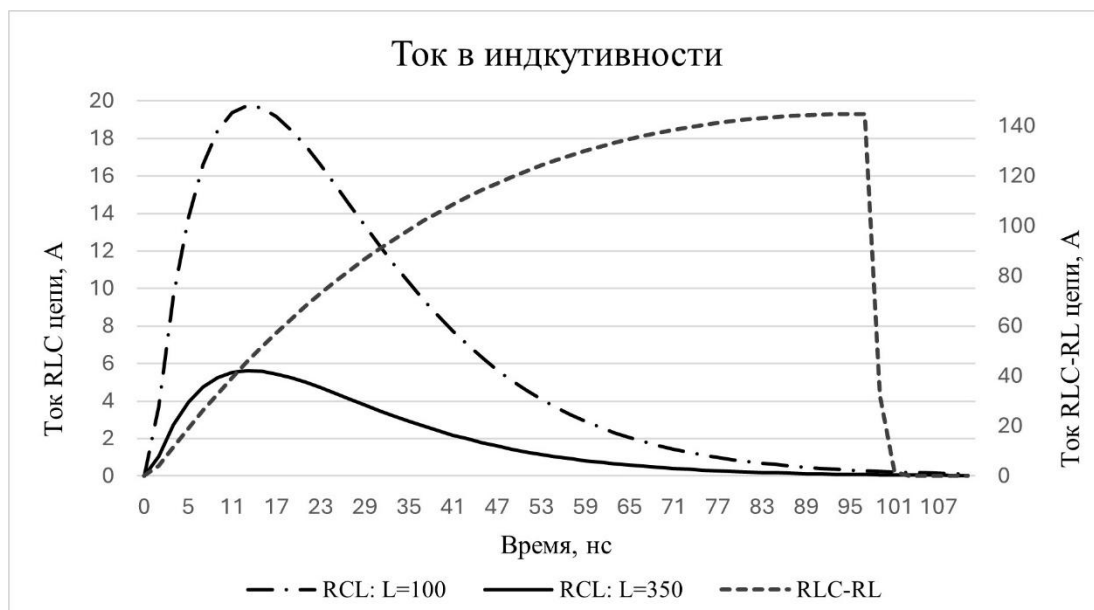


рис. 3 Сравнительный график тока в индуктивности

Параметры моделируемых цепей и формируемых импульсов представлены в таблице:

Цепь	L , нГн	C , нФ	R_0 , Ом	R_{02} , Ом	τ_n , нс	t_f , нс	t_{cp} , нс	I_{MAX} , А	B_z , мкТл	Q , нТл·с
RLC	350	0,51	52,4	—	101	13	67	5,6	29	0,003
RLC	100	1,8	14,9	—	101	13	67	19,7	426	0,043
RLC-RL		91	2	150	101	97	3	144,8	3 135	0,316

Выводы: оптимизация конструкции ВМД увеличила значение B_z в центре диполя в **60 раз!** Новое схемотехническое решение коммутатора дает возможность формировать импульсы длительностью порядка 100 нс с амплитудой тока 140 А, что в **25 раз** больше относительно прошлого схемного решения и сократить длительность среза импульс с 67 до 3 нс, короткий фронт среза позволяет снизить диапазон глубин, что значительно в исследованиях малых глубин, до первых метров. Новые технические решения позволили превысить минимально достаточную величину $Q = 0,05$ нТл·с в **6 раз!**

Финансирование: работа выполнена в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН в рамках госзадания FWZZ-2022-0027 “Новые технологии внелабораторного химического анализа и контроля, прецизионных измерений физических полей природных и техногенных объектов” (приоритетное направление 1.5.1. Геофизика).

Список публикаций:

- [1] Злыгостев И. Н. и др. Численное решение прямой задачи метода переходных процессов с использованием новой формулировки уравнений Максвелла // Геофизические технологии. — 2025. — №. 4. — С. 64-74.
- [2] Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие. 7-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2009. — 592 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).
- [3] Хлыстун Е. С., Злыгостев, Игорь Николаевич. Генератор коротких импульсов магнитного поля для высокочастотной индуктивной электроразведки с использованием малогабаритного вертикального магнитного диполя // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2023. — С. 102-111.
- [4] Калантаров П.Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. - 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. - 488 с.: ил.
- [5] Кауфман А.А., Хансен Ричард О., Клейнберг Роберт Л.К.; Ефремов В.А. и Тимакин Т.А. (пер. с англ.). — Новосибирск, 2012. — XV, 403 с.: ил. — Пер. изд.: Principles of the magnetic methods in geophysics / Kaufman A.A. Amsterdam [etc.] : Elsevier, cop. 2009. Библиогр.: с. 402-403. — ISBN 978-5-4262-0030-2.

**Моделирование циклотронного взаимодействия солнечных протонов с МГД волнами
во вспышечных и высоких корональных петлях****Чернов Александр Александрович***Алтайский государственный университет**E-mail: chernov_alex58@mail.ru*

УДК 523.98+550.385+533.9+001.891.57

Аннотация. При моделировании учитываются два (новых) фактора: изменение энергии частиц и взаимодействие с быстрой магнитозвуковой волной. Моделирование (аналитическое и численное) проведено для случая симметричных петель и случая ступенчатого спектра МГД волн. Сделаны выводы, в частности, следующие. 1. Учёт изменения энергии частиц может привести к захвату пролётных частиц в солнечные петли, остыванию или нагреву частиц в петлях. Причём эффект остывания (нагрева) частиц весьма важен наряду с высыпанием (захватом) частиц. 2. Вклад быстрой магнитозвуковой волны сравним с вкладом альфвеновской волны как в процесс диффузии частиц в конус потерь, так и в процесс обмена энергией с частицами. 3. Циклотронным взаимодействием солнечных частиц (протонов) с МГД волнами можно объяснить характерные времена распада (усиления) вспышечных и высоких корональных петель: от долей секунды до суток и более. 4. Эти времена (точнее их модуль) для вспышечных петель меньше (на порядок и больше) соответствующих времён для высоких корональных петель. 5. Возможно существование особо стабильных петель.

Abstract. Two (new) factors are taken into account in the modeling: change in particle energy and interaction with a fast magnetosonic wave. Modeling (analytical and numerical) is carried out for the case of symmetric loops and the case of a stepped spectrum of MHD waves. The following conclusions are made, in particular. 1. Taking into account the change in particle energy can lead to the capture of passing particles in solar loops, cooling or heating of particles in the loops. Moreover, the effect of cooling (heating) of particles is very important along with the precipitation (capture) of particles. 2. The contribution of the fast magnetosonic wave is comparable to the contribution of the Alfvén wave both in the process of particle diffusion into the loss cone and in the process of energy exchange with particles. 3. The cyclotron interaction of solar particles (protons) with MHD waves can explain the characteristic decay (amplification) times of flare and high coronal loops: from fractions of a second to a day or more. 4. These times (or rather their modulus) for flare loops are less (an order of magnitude or more) than the corresponding times for high coronal loops. 5. The existence of particularly stable loops is possible.

Ключевые слова: МГД волны, циклотронное взаимодействие, солнечные корональные петли, энергия.

Введение

Как и работы [1 – 5], данная работа посвящена моделированию циклотронного взаимодействия частиц, заряд которых равен элементарному, с МГД волнами. Но в данной работе рассматривается важный пример, когда параметры этих частиц, плазмы и волн соответствуют солнечным протонам, ускоренных во вспышке и захваченных магнитным полем солнечных петель [6 – 8]. Эти параметры (данные) приведены в **таблицах 1 и 2**. Из этих таблиц видно, что автор условно (по параметрам) выделяет вспышечные и высокие корональные петли.

Табл. 1. Данные для высоких корональных петель.

Характерный линейный масштаб петли: $R_E = 6,96 \cdot 10^{10}$ см
Среднее магнитное поле петли: $B_0 = 30$ Гс $\equiv 3 \cdot 10^6$ нТл
Размер конуса потерь (для пробочного отношения 100): $\alpha_0 = 5,74^\circ$
Концентрация фоновой плазмы (электронов): $n_e = 10^9$ см ⁻³
Концентрация энергичных протонов: $n = 2 \cdot 10^5$ см ⁻³
Энергия энергичных протонов (на один протон): $\varepsilon/n = 30$ МэВ $\equiv 4,807 \cdot 10^{-5}$ эрг
Магнитное поле волн: $B = 0,01 \cdot B_0$ (первое значение), $B = 0,001 \cdot B_0$ (второе значение)
Несущая частота волн: $f_0 \equiv \omega_0/2\pi = 1530$ Гц
Угол (средний) распространения волн: $\theta = 10^\circ$

Табл. 2. Данные для вспышечных петель.

Характерный линейный масштаб петли: $R_E = 6,96 \cdot 10^8$ см
Среднее магнитное поле петли: $B_0 = 300$ Гс $\equiv 3 \cdot 10^7$ нТл
Размер конуса потерь (для пробочного отношения 10): $\alpha_0 = 18,43^\circ$
Концентрация фоновой плазмы (электронов): $n_e = 10^{11}$ см ⁻³
Концентрация энергичных протонов: $n = 10^8$ см ⁻³
Энергия энергичных протонов (на один протон): $\varepsilon/n = 30$ МэВ $\equiv 4,807 \cdot 10^{-5}$ эрг

Магнитное поле волн: $B = 0,01 \cdot B_0$ (первое значение), $B = 0,001 \cdot B_0$ (второе значение)
Несущая частота волн: $f_0 \equiv \omega_0/2\pi = 15300$ Гц
Угол (средний) распространения волн: $\theta = 10^\circ$

Солнечные петли (арки) являются достаточно типичными магнитными ловушками с конусом потерь и МГД волнами, способными удерживать энергичные заряженные частицы некоторое время [6 – 8]. Но при описании и моделировании взаимодействия этих частиц с МГД волнами обычно учитывается только изменение питч-угла и МГД волна левой поляризации (т. е. альвеновская волна) [6 – 8]. Заметим, что МГД волны по способу генерации могут быть циклотронными (и генерироваться как ионами, так и электронами).

В данной работе учитывается изменение энергии частиц (наряду с учётом изменения питч-угла) и взаимодействие с быстрой магнитозвуковой волной (наряду с учётом взаимодействия с альвеновской волной). Моделирование проводится для симметричной ловушки, ступенчатого спектра волн и для трёх распределений частиц солнечных петель. Численное моделирование проведено только для протонов солнечных петель по данным, приведённым в табл. 1 и 2.

Моделирование и аналитические результаты

При аналитическом моделировании следуем описаниям циклотронного взаимодействия частиц и МГД волн в магнитной ловушке [9, 10], учитывающих изменение энергии частиц и быструю магнитозвуковую волну. При этом, следуя работам [1 – 5], моделируем величины, характеризующие взаимодействие энергичных частиц солнечных петель и МГД волн. В частности, моделируем квазилинейный интеграл столкновений частиц с волнами (как для однородной плазмы), тензор диффузии в пространстве скоростей (с азимутальной симметрией), спектральную плотность волн (в виде узкой ступенчатой функции), функцию распределения энергичных частиц (в виде распределения Паркера, бимаксвелловского распределения и распределения Кеннела-Петчека). **Подробно** процедура моделирования и аналитические результаты изложены в препринте [11]. Здесь ограничимся только некоторыми важными моментами.

Характеристики волн. Считаем, что показатель преломления N и вектор поляризации волн \mathbf{e} определяется формулами [12 – 15]:

$$N^2 = \frac{c^2}{v_a^2} \frac{1}{1 \mp \omega/\omega_{Bi}} \approx \frac{c^2}{v_a^2}, \quad (1)$$

$$\mathbf{e} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, \mp i, 0). \quad (2)$$

В (1): c – скорость света (в вакууме), v_a – альвеновская скорость, ω_{Bi} – гирочастота однозарядного положительного иона (например, протона). Формулы (1) и (2) соответствуют случаю холодной дисперсии МГД волн (в одноионном приближении) и их квазипродольному распространению. Здесь и далее в формулах верхний знак относится к волне левой поляризации (альвеновской), нижний – к волне правой поляризации (быстрой магнитозвуковой).

Функция распределения частиц. Пусть стоит задача найти функцию распределения f энергичных частиц в магнитной ловушке, исходя из кинетического уравнения

$$\frac{df}{dt} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial v_\gamma} D_{\gamma\beta} \frac{\partial f}{\partial v_\beta}}_{\equiv -\frac{\partial \sigma_\gamma}{\partial v_\gamma} = I} + s. \quad (3)$$

В (3): d/dt – полная производная по времени, \mathbf{D} и $\boldsymbol{\sigma}$ – соответственно тензор диффузии и вектор плотности потока частиц в пространстве скоростей \mathbf{v} , I – интеграл столкновений частиц с волнами, s – функция источника частиц. Тогда **ключевым результатом** моделирования является формула

$$D_{\alpha\alpha}^{(p)} = 4\pi \left(\frac{|p|}{2^{|p|} |p|!} \right)^2 \underbrace{(p^2 \tan^2 \theta \tan^2 \alpha)^{|p|-1}}_{\approx y^2} \frac{v^3}{|p|} \underbrace{\left(\frac{|\omega_B| B^2}{B_0^2} \right)}_{\equiv D_0} \delta\left(v - \frac{v_{res}^{(p)}|_{\omega=\omega_0}}{\cos \alpha}\right). \quad (4)$$

В (4):

$$p = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

– номер циклотронного резонанса; α – питч-угол (угол между \mathbf{B}_0 и \mathbf{v}); y – ларморовский радиус (в единицах поперечной длины волны), ω_B – гирочастота частиц в ловушке; D_0 – стандартный коэффициент диффузии; v_{res} – резонансная скорость. **Формула (4)** в этой задаче действительно является **ключевой**, так как

$$D_{vv}^{(p)} = \left(\sin \alpha \cos \alpha \frac{\omega_0}{p\omega_B} \right)^2 D_{\alpha\alpha}^{(p)}, \quad (6)$$

$$D_{v\alpha}^{(p)} = D_{\alpha v}^{(p)} = \sin \alpha \cos \alpha \frac{\omega_0}{p\omega_B} D_{\alpha\alpha}^{(p)}, \quad (7)$$

$$I = \underbrace{\frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} v^2 D_{vv} \frac{\partial f}{\partial v} + \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} v D_{v\alpha} \frac{\partial f}{\partial \alpha}}_{\equiv -\frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} v^2 \sigma_v} + \underbrace{\frac{1}{v \sin \alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} D_{\alpha v} \sin \alpha \frac{\partial f}{\partial v} + \frac{1}{v^2 \sin \alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} D_{\alpha\alpha} \sin \alpha \frac{\partial f}{\partial \alpha}}_{\equiv -\frac{1}{v \sin \alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \sigma_\alpha \sin \alpha}. \quad (8)$$

Из (4) – (8) видно, что слагаемые, учитывающие изменение энергии (в (8) они $\sim \partial/\partial v$), содержат множитель ω_0/ω_B . Видно, что при $\omega_0/\omega_B \rightarrow 0$ они (первые три слагаемые в (8)) $\rightarrow 0$. Напрашивается вывод, что при $\omega_0/\omega_B \rightarrow 0$ изменение энергии не нужно учитывать. Но это при $\partial/\partial \alpha \rightarrow 0$ будет ошибкой. **Из (4)** при $y^2 \ll 1$ **видно**, что учитывать резонансы с $|p| > 1$ надо в случае отсутствия резонансных частиц с $|p| = 1$. Кроме определения, **(5) означает**, что альвеновская волна взаимодействует с частицами на резонансах с $p > 0$, а быстрая магнитозвуковая – с $p < 0$.

В этой задаче **для стационарного случая** и чисто pitch-угловой диффузии (с источником s как в [14]) найдено решение уравнения (3) в виде распределения Кеннела-Петчека (см. формулу (7.3.19) с комментариями в [11]).

Концентрация и энергия частиц. Пусть стоит задача найти скорость изменения концентрации частиц в ловушке \dot{n} и скорости изменения плотности их энергии $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{pr} + \dot{\epsilon}_{ex}$, исходя из следующих их определений:

$$\dot{n} = \int_{\{v_{tr}\}} d^3 v \cdot I = \int_0^\infty dv \cdot \dot{n}(v), \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon} = \int_{\{v_{tr}\}} d^3 v \cdot \frac{mv^2}{2} I = \underbrace{\int_0^\infty dv \cdot \frac{mv^2}{2} \dot{n}(v)}_{\equiv \dot{\epsilon}_{pr}} + \underbrace{\int_0^\infty dv \cdot \dot{\epsilon}_{ex}(v)}_{\equiv \dot{\epsilon}_{ex}}. \quad (10)$$

В (9) и (10) $d^3 v$ – элемент объема пространства скоростей \mathbf{v} , а интегрирование проводится по объёму магнитной ловушки $\{v_{tr}\}$. В (10) первое слагаемое $\dot{\epsilon}_{pr}$ описывает изменение энергии за счёт диффузии частиц в конус потерь (или из конуса при $\dot{\epsilon}_{pr} > 0$), а второе $\dot{\epsilon}_{ex}$ – за счёт обмена энергией с волнами. Тогда **ключевым результатом** моделирования является формула

$$\dot{n}(v_{res}^{(p)}, \alpha) = -16\pi^2 \left(\frac{|p|}{2^{|p|} |p|!} \right)^2 (p^2 \tan^2 \theta \tan^2 \alpha)^{|p|-1} \sin \alpha \frac{D_0}{|p|} v^3 \widehat{\partial f} \bigg|_{v=\frac{v_{res}^{(p)}}{\cos \alpha}, \omega=\omega_0}, \quad (11)$$

где

$$\partial = \frac{\partial}{\partial \alpha} + \frac{\omega}{p\omega_B} v \sin \alpha \cos \alpha \frac{\partial}{\partial v}. \quad (12)$$

В операторе (12) второе слагаемое учитывает изменение энергии. **Формула (11)** в этой задаче действительно является **ключевой**, так как

$$\dot{n} = \dot{n}(v_{res}^{(p)}, \alpha = \alpha_0), \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon}_{pr} = \dot{n}(v_{res}^{(p)}, \alpha_0) \cdot \frac{m(v_{res}^{(p)})^2}{2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \alpha_0}, \quad (14)$$

$$\dot{\epsilon}_{ex} = 2 \frac{m(v_{res}^{(p)})^2}{2} \frac{\omega_0}{p\omega_B} \int_{\pi/2}^0 d\alpha \cdot \dot{n}(v_{res}^{(p)}, \alpha) \tan \alpha. \quad (15)$$

Из (11) – (15) видно, что слагаемые, учитывающие изменение энергии ($\sim \partial/\partial v$), содержат множитель ω_0/ω_B . Видно, что при $\omega_0/\omega_B \rightarrow 0$ только $\dot{\epsilon}_{ex} \rightarrow 0$. Напрашивается вывод, что при $\omega_0/\omega_B \rightarrow 0$ изменение энергии не нужно учитывать. Но это при $\partial/\partial \alpha \rightarrow 0$ будет ошибкой. **Из (11) – (14) видно**, что при $\partial > 0$ величины \dot{n} и $\dot{\epsilon}_{pr}$ меньше нуля, что означает уход частиц и энергии в конус потерь (высыпания) и ослабление (распад) петель. При $\partial < 0$ величины \dot{n} и $\dot{\epsilon}_{pr}$ больше нуля, что означает захват частиц и энергии в ловушку и усиление (накачку) петель. **Из (11), (12) и (15) видно**, что при $(\omega_0/p\omega_B) \cdot \partial > 0$ величина $\dot{\epsilon}_{ex}$ меньше нуля, что означает генерацию волн и ослабление петель. При $(\omega_0/p\omega_B) \cdot \partial < 0$ величина $\dot{\epsilon}_{ex}$ больше нуля, что означает затухание волн и усиление петель.

В этой задаче были использованы распределение Паркера (**РП**), бимаксвелловское распределение (**БМР**)

и распределение Кеннела-Петчека (**РКП**) (см. формулы (7.1.1), (7.2.1) и (7.3.19) в [11]). Заметим, что РП и БМР могут быть решениями уравнения (3) для нестационарного случая (при специальном выборе источника s).

Моделирование и численные результаты

При получении численных результатов были использованы данные табл. 1 и 2 (как входные параметры), результаты аналитического моделирования (в частности, ключевые формулы (4) и (11); формулы (13), (14) и (15)). Для трёх распределений (РП, БМР и РКП) энергичных частиц были рассчитаны величины \dot{n} , $\dot{\epsilon}_{pr}$ и $\dot{\epsilon}_{ex}$. Кроме того, были рассчитаны характерные времена τ (точнее, обратные времена $1/\tau$), которые определяются ниже. Подробно численные результаты были оформлены в препринте [11] (в частности, в виде табл. 3 – 10, рис. 1 – 296 и приложений 1 – 11). Здесь ограничимся только некоторыми важными моментами, в частности, несколькими рисунками и выводами.

Характерные времена. Определим для частиц в ловушке характерное время τ_n , связанное с изменением их концентрации n , формулой

$$\frac{1}{\tau_n} \equiv -\frac{\dot{n}}{n}. \quad (16)$$

Из (16) видно, что обратное время $1/\tau_n$ является нормированной на n скоростью \dot{n} . Характерные времена τ_ϵ , τ_{pr} и τ_{ex} , связанные с изменением плотности энергии ϵ частиц, определим формулой

$$\frac{1}{\tau_\epsilon} \equiv -\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon} = -\frac{\overbrace{\dot{\epsilon}_{pr} + \dot{\epsilon}_{ex}}^{\dot{\epsilon}}}{\epsilon} = \underbrace{\left(-\frac{\dot{\epsilon}_{pr}}{\epsilon}\right)}_{\equiv 1/\tau_{pr}} + \underbrace{\left(-\frac{\dot{\epsilon}_{ex}}{\epsilon}\right)}_{\equiv 1/\tau_{ex}} = \frac{1}{\tau_{pr}} + \frac{1}{\tau_{ex}}. \quad (17)$$

Из (17) видно, что обратные времена $1/\tau_{pr}$, $1/\tau_{ex}$ и $1/\tau_\epsilon$ являются нормированными на ϵ скоростями $\dot{\epsilon}_{pr}$, $\dot{\epsilon}_{ex}$ и $\dot{\epsilon}$. Во всех характерных временах τ (т. е. в величинах τ_n , τ_{pr} , τ_{ex} и τ_ϵ) выделим четыре составляющие следующими формулами:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_\alpha} + \frac{1}{\tau_v}, \quad (18)$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_a} + \frac{1}{\tau_f}. \quad (19)$$

При расчёте величины $1/\tau_\alpha$ в операторе (12) полагаем $\partial/\partial v = 0$, а при расчёте $1/\tau_v - \partial/\partial \alpha = 0$. Таким образом, второе слагаемое в (18) учитывает изменение энергии, тогда как первое – изменение pitch-угла. При расчёте величины $1/\tau_a$ используем формулы для альвеновской волны, а при расчёте $1/\tau_f$ – для быстрой магнитозвуковой. Напомним, что в формулах, начиная с (1), верхний знак относится к альвеновской волне (**АВ**), а нижний – к быстрой магнитозвуковой (**БМЗВ**). Таким образом, второе слагаемое в (19) обусловлено быстрой магнитозвуковой волной, тогда как первое – альвеновской.

Рисунки. На рис. 1 и 2 приводятся результаты расчёта величин $1/\tau_n$, $1/\tau_\alpha$ и $1/\tau_v$, определяемых формулами (11), (12), (13), (16), (18) и (19). На рис. 3 и 4 приводятся результаты расчёта величин $1/\tau_{pr}$, $1/\tau_{ex}$ и $1/\tau_\epsilon$, определяемых формулами (11), (12), (14), (15), (17) и (19). Все перечисленные величины построены в зависимости от номера магнитной оболочки L только для распределения Кеннела-Петчека (**РКП**).

Выводы. Из рис. 1 и 2: 1. С увеличением L (уменьшением анизотропии) процесс изменения энергии доминирует. 2. Для альвеновской волны это приводит к захвату протонов в солнечные петли. 3. Времена τ (точнее модуль этих времён) для вспыхивающих петель меньше (на порядок и больше) соответствующих времён для высоких корональных. 4. Времена τ для быстрой магнитозвуковой волны сравнимы (а то и меньше) соответствующих времён для альвеновской. 5. Времена τ_α больше нуля для обеих МГД волн. Но времена τ_v для альвеновской волны меньше нуля, а для быстрой магнитозвуковой – больше нуля. 6. Обратные времена $1/\tau_n$ и $1/\tau_\alpha$ убывают с увеличением L , что означает увеличение стабильности магнитных оболочек (и даже их усиление при $1/\tau_n < 0$). 7. Для альвеновской волны с увеличением L обратное время $1/\tau_n$ меняет положительный знак на отрицательный, что означает смену высыпаний частиц на их захват (при переходе особо стабильной оболочки L_{stn} , на которой $1/\tau_n = 0$). 8. Диапазону $10^{-2} \leq L \leq 10^2$ соответствует диапазон (порядок): $100 \text{ c}^{-1} \geq 1/\tau_n \geq -10 \text{ c}^{-1}$.

Из рис. 3 и 4: 1. Обратные времена $1/\tau_\epsilon$ и $1/\tau_{pr}$ убывают с увеличением L , что означает увеличение стабильности магнитных оболочек (и даже их усиление при $1/\tau_\epsilon < 0$). 2. Для быстрой магнитозвуковой волны величина $1/\tau_{pr}$ больше нуля, а $1/\tau_{ex}$ – меньше нуля. 3. Для альвеновской волны величины $1/\tau_{pr}$ и $1/\tau_{ex}$ с увеличением L меняют (могут менять) знак с положительного на отрицательный. 4. Для обеих волн с увеличением L обратное время $1/\tau_\epsilon$ меняет (может менять) знак с положительного на отрицательный. Это означает смену распада (энергетического ослабления) петель на их усиление (накачку энергией). Кроме того, существование особо стабильной оболочки L_{ste} , на которой $1/\tau_\epsilon = 0$. 5. В диапазоне оболочек $10^{-2} \leq L \leq 10^2$ диапазон обратных времён (порядок): $100 \text{ c}^{-1} \geq 1/\tau_\epsilon \geq -10 \text{ c}^{-1}$.

Приведённые численные результаты полностью соответствуют аналитическим. **Главное**, они подтверждают, что даже при $\omega_0/\omega_B \rightarrow 0$ изменение энергии частиц нужно учитывать. У нас

$$\omega_0 / \omega_B = 0,0334 \quad (20)$$

для обоих типов корональных петель. Важность вклада (учёта) быстрой магнитотозвуковой волны более очевидна.

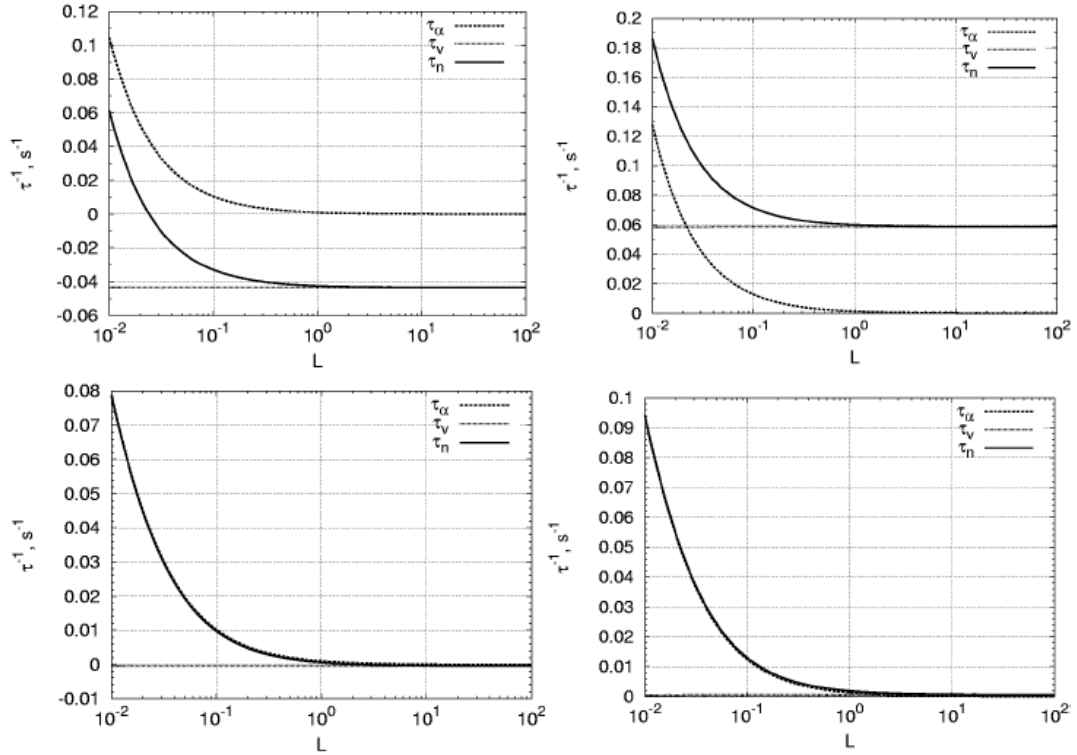


Рис. 1. Результаты расчёта по данным **табл. 1** обратных характерных времён изменения концентрации протонов в ловушке при циклотронном ($p = \pm 1$) взаимодействии с АВ (левые две панели) и БМЗВ (правые две панели). Кривые τ_α – учитывается изменение только pitch-угла частиц, кривые τ_v – учитывается изменение только модуля скорости частиц, кривая τ_n – учитываются оба процесса. Кривые на верхних панелях построены для первого значения магнитного поля волн ($B = 0,01 \cdot B_0$), а на нижних – для второго ($B = 0,001 \cdot B_0$)

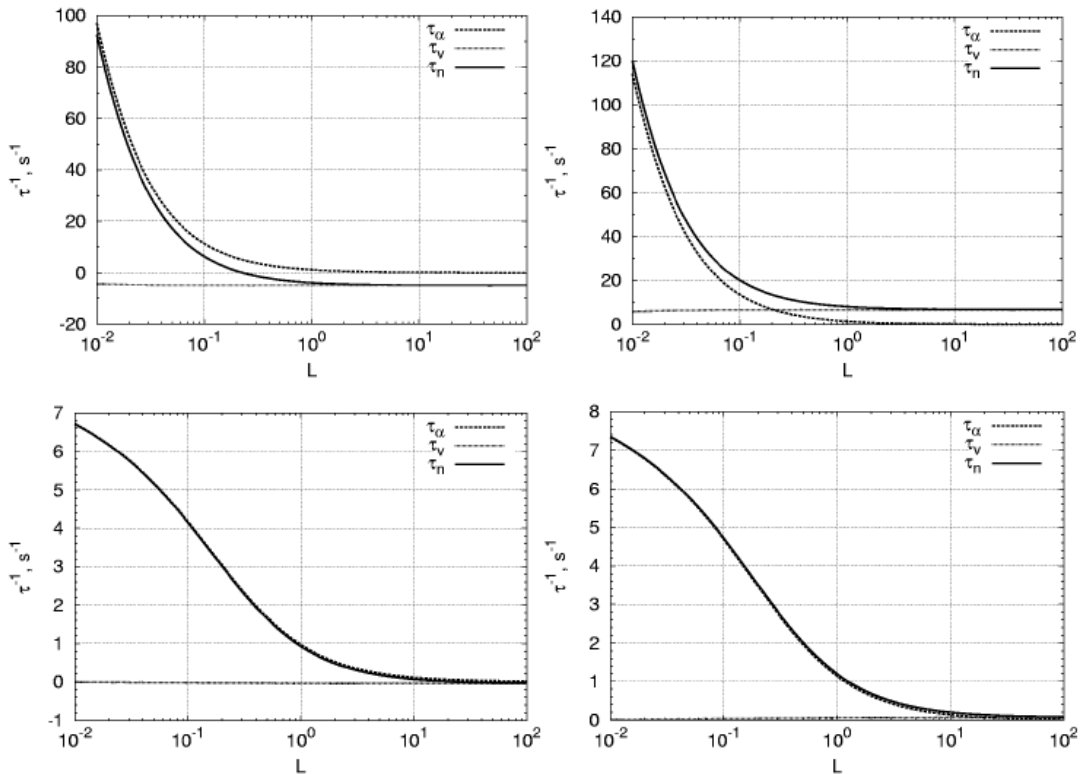


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но по данным табл. 2

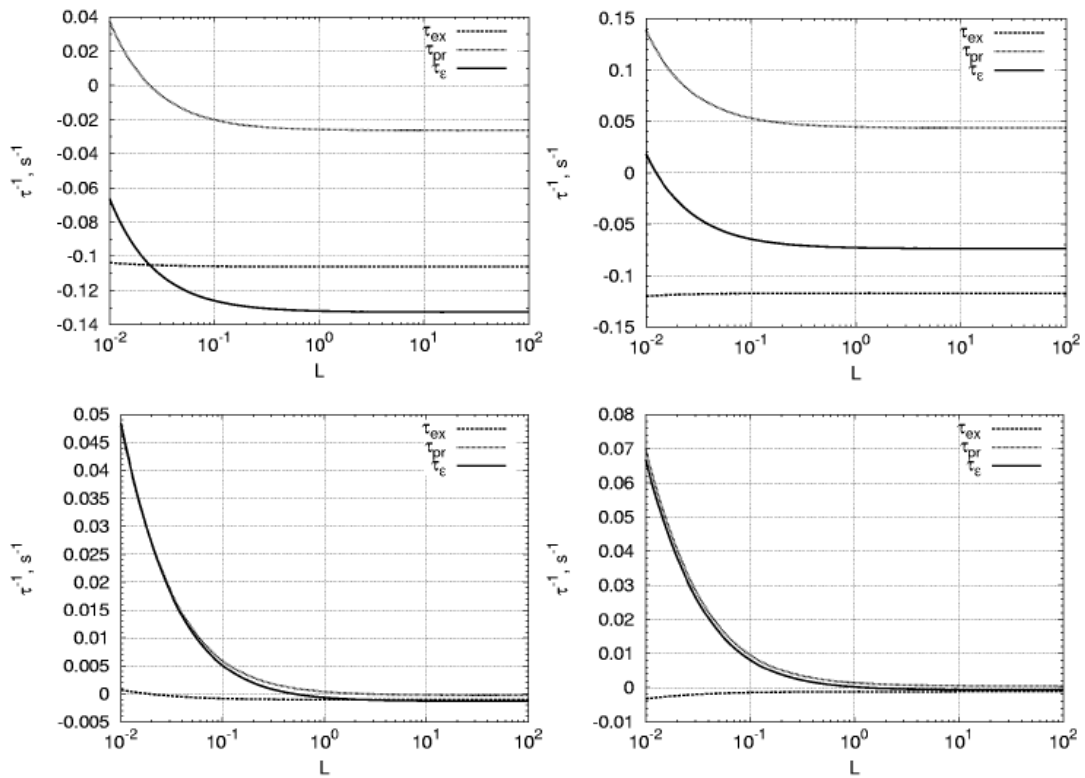


Рис. 3. Результаты расчёта по данным табл. 1 обратных характерных времён изменения плотности энергии протонов в ловушке при циклотронном ($p = \pm 1$) взаимодействии с АВ (левые две панели) и БМЗВ (правые две панели). Кривые τ_{pr} – учитывается только высыпания (захват) энергии, кривые τ_{ex} – учитывается только обмен энергией, кривые τ_e – учитываются оба процесса. Кривые на верхних панелях построены для первого значения магнитного поля волн ($B = 0,01 \cdot B_0$), а на нижних – для второго ($B = 0,001 \cdot B_0$)

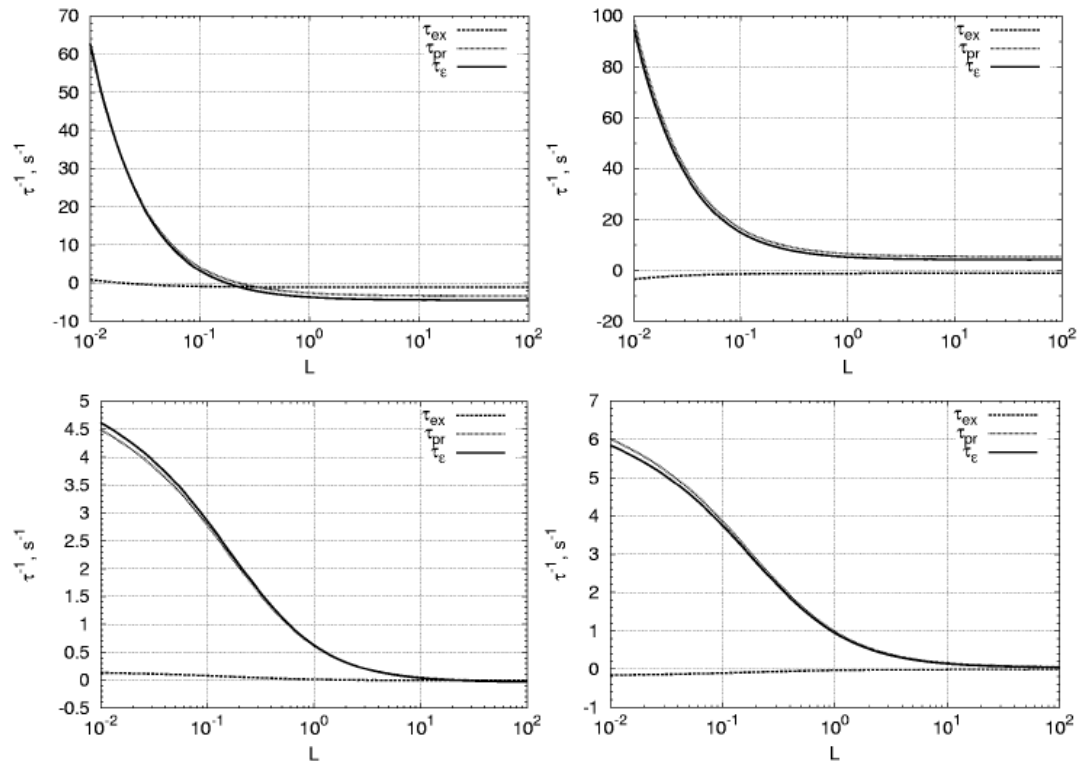


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но по данным табл. 2

Заключение

В данной работе проведено моделирование характерных скоростей и времён распада и усиления солнечных петель (арок) при циклотронном взаимодействии его частиц с МГД волнами. При этом учитывается два новых фактора. Первый фактор – изменение энергии частиц (обычно учитывается изменение только питч-угла). Этот фактор обусловлен конечностью (малой) частоты волн по сравнению с гирочастотой частиц солнечных петель. Второй фактор – взаимодействие с быстрой магнитозвуковой волной (обычно учитывается взаимодействие только с альвеновской волной). Моделирование (аналитическое и численное) проведено для случая симметричной ловушки и случая ступенчатого спектра волн. При этом использованы три распределения частиц солнечных петель: Паркера, бимаксвелловское и Кеннела-Петчека. Численное моделирование проведено только для солнечных протонов с характерными параметрами (плазмы и волн) в высоких корональных (табл. 1) и вспыхивающих (табл. 2) петлях. **Подробно** процедура моделирования, результаты и выводы изложены в **препринте [11]**. В данной работе автор ограничился только некоторыми важными моментами.

Проведённое моделирование и полученные результаты подтверждает важность (и необходимость) учёта названных выше факторов и ниже следующее. Для процесса диффузии частиц солнечных петель в конус (из конуса) потерь первый фактор особенно важен при достаточно малой анизотропии протонов. Для процесса обмена энергией частиц с волнами первый фактор критически важен, поскольку при неучёте его обмена нет. Что касается второго фактора, то вклад быстрой магнитозвуковой волны может превосходить вклад альвеновской волны как в процесс диффузии частиц в конус потерь, так и в процесс обмена энергией с частицами.

Проведённое моделирование и полученные результаты позволяет сделать ряд (других) важных выводов. Назовем некоторые из них:

Учёт изменения энергии частиц приводит к появлению эффекта захвата пролётных частиц в солнечные петли, эффекта остывания (нагрева) частиц в петлях и эффекта усиления петель (накачки петель частицами и энергией). При учёте изменения только питч-угла указанные эффекты невозможны. Эффект остывания (нагрева) частиц весьма важен наряду с высыпанием (захватом) частиц.

Циклотронное взаимодействие солнечных частиц (протонов) с МГД волнами может объяснить характерные времена распада (усиления) вспыхивающих и высоких корональных петель (порядка от долей секунды до суток и более).

Эти характерные времена τ (точнее их модуль) для вспыхивающих петель меньше (на порядок и больше) соответствующих времён для высоких корональных.

В диапазоне магнитных оболочек $10^{-2} \leq L \leq 10^2$ (анизотропий $10^0 \geq A \geq 10^{-7}$) диапазон обратных времён (порядок): $100 \text{ с}^{-1} \geq 1/\tau \geq -10 \text{ с}^{-1}$. Это означает смену ослабления (распада) петель на их усиление (накачку). Кроме того, это указывает на существование особо стабильной петли L_{st} , для которой $1/\tau = 0$.

Список публикаций:

- [1] Чернов А.А. Моделирование изменения содержания частиц и их энергии в магнитной ловушке с МГД волнами // *препринт № 2* – Барнаул: АлтГУ, 2011. – 23 с.
- [2] Чернов А.А. Моделирование изменения содержания частиц и их энергии в магнитной ловушке с МГД волнами // *препринт № 102* – Барнаул: АлтГУ, 2025. – 55 с.
- [3] Чернов А.А. Моделирование распада и усиления кольцевого тока Земли под влиянием МГД волн // *препринт № 3* – Барнаул: АлтГУ, 2011. – 29 с.
- [4] Чернов А.А. Моделирование распада и усиления кольцевого тока Земли под влиянием МГД волн // *препринт № 103* – Барнаул: АлтГУ, 2025. – 86 с.
- [5] Чернов А.А. Моделирование распада и усиления кольцевого тока Земли под влиянием МГД волн // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 10/3. – С. 54–57.
- [6] Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 1 и 2. – М.: Мир, 1974 и 1975. – 384 и 512 с.
- [7] Зеленый Л.М., Веселовский И.С., Степанов А.В. и др. Плазменная гелиогеофизика. Т. 1. – М.: Физматлит, 2008. – 672 с.
- [8] Рогачевский И.В. Исследование плазменных процессов, связанных с динамикой энергичных частиц в солнечной короне и магнитосфере Земли / канд. дис. ф.–м. н. – М.: ИПГ, 1987. – 158 с.
- [9] Чернов А.А. К описанию взаимодействия частиц в магнитной ловушке с МГД волнами // *препринт № 1* – Барнаул: АлтГУ, 2011. – 18 с.
- [10] Чернов А.А. К описанию циклотронного взаимодействия частиц в магнитной ловушке с МГД волнами // *препринт № 101* – Барнаул: АлтГУ, 2025. – 26 с.
- [11] Чернов А.А. Моделирование циклотронного взаимодействия солнечных протонов с МГД волнами во вспыхивающих и высоких корональных петлях // *препринт № 104* – Барнаул: АлтГУ, 2025. – 142 с.
- [12] Ахизер А.И., Ахизер И.А., Половин П.В. и др. Электродинамика плазмы. М.: Наука, 1974. – 719 с.
- [13] Чернов А.А., Таныгин С.В., Хазанов Г.В. К описанию линейных характеристик альвеновских и быстрых магнитозвуковых волн в магнитосфере // *Космические исследования.* – 1994. – Т. 32. – № 3. – С. 102–107.
- [14] Kennel C.F., Petschek H.E. Limit on stably trapped particle fluxes // *J. Geophys. Res.* – 1966. – V. 71. – No. 1. – P. 1–28.
- [15] Chernov A.A., Khazanov G.V., Konikov Yu.V. On the linear theory of the oblique Alfvén and fast magnetosonic waves in the Earth's magnetosphere // *Planet. Space Sci.* – 1990. – V. 38. – No. 7. – P. 823–834.

Алгоритм автоматизированной проверки результатов обработки ионограмм вертикального зондирования ионосферы

Долгачева Светлана Александровна

Калишин Алексей Сергеевич

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (АНИИИ)

E-mail: dolgacheva@aari.ru

На сети мониторинга геофизической обстановки Росгидромета расположено шесть пунктов вертикального зондирования ионосферы (ВЗ) в авроральной и субавроральной зоне [1], данные с которых поступают в Полярный геофизический центр (ПГЦ) АНИИИ в режиме реального времени. В сутки наблюдателями ПГЦ проводится обработка 144 часовых ионограмм, хотя зондирование выполняется каждые 15 минут и суточный массив состоит из 576 ионограмм. В настоящее время, для решения задач в области мониторинга космической погоды и обеспечения потребителей актуальной информацией необходим переход на зондирование каждые 5 минут. Таким образом, суточный массив поступающей информации будет состоять из 1728 ионограмм. Столь большие массивы данных невозможно обработать силами наблюдателей и средств автоматизированной обработки. Помимо этого, актуальной задачей является введение в научный оборот архивных данных вертикального зондирования. С момента возобновления наблюдений методом ВЗ в высоких широтах прошло более 13 лет, на серверах ПГЦ накопилось более 400 тысяч обработанных и миллиона необработанных ионограмм. Перед использованием данных вертикального зондирования в научной или практической работе, необходимо проверять их на ошибки, допущенные наблюдателем при обработке. Проверка большого количества данных является трудоемкой задачей, автоматизация которой является целью данной работы.

Ошибки в данных бывают нескольких видов: перепутанные ионосферные характеристики, определяемые по ионограммам, неправильно определенные значения при обработке сложных ионограмм и случайные выбросы. Построение f - и h -графиков, статистический анализ и проверка по пороговым значениям позволяют обнаружить выбросы, но не могут помочь в более сложных случаях при возмущенной ионосфере. На следующем шаге визуального контроля можно построить частотные и высотные проекции ионограмм [2, 3] за одни или несколько суток с нанесением на графики значений характеристик, определенных оператором (рис. 1 в). Частотные и высотные проекции ионограмм хорошо выделяют пики интенсивности отражения сигнала, которые соответствуют критическим частотам и действующим высотам О- и Х-моды. Так же можно выделить минимальную частоту отражения сигнала, наибольшую частоту отражения сигнала в области F и наличие поглощения. Благодаря этим свойствам, суточные графики частотных и высотных проекций ионограмм выбраны для автоматизации проверки параметров.

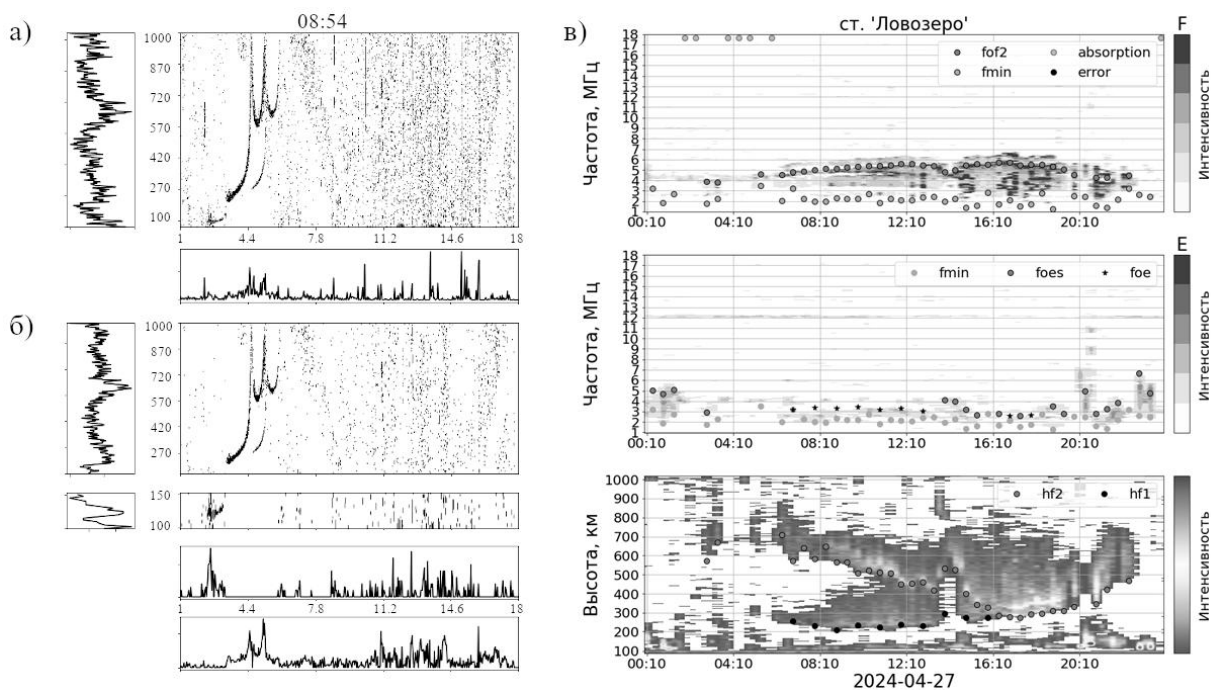


рис. 1. Пример построения суточных графиков частотных и высотных проекций ионограмм за 27 апреля 2024 года станции Ловозеро (в) из ионограмм и их проекций (а), прошедших фильтрацию и разделение для частотных проекций на области E и F (б).

Для проверки можно было бы использовать высотную и частотную проекции отдельной ионограммы (рис. 1 а), но в этом случае возникает ряд проблем: при фильтрации остаётся часть шума (рис. 1 б), интенсивность

которого сравнима или выше интенсивности полезного сигнала, в суточном графике большая часть шума остаётся изолированным пикселем или малой группой пикселей, в то время как полезный сигнал предстаёт в виде протяженной линии локальных максимумов или большой области. В случаях, когда отраженный сигнал на ионограмме имеет малую интенсивность или сильную диффузию, критические частоты на проекции не совпадают с локальными максимумами, но на суточном графике представляют собой область вокруг локального максимума или края областей полезного сигнала.

Идея алгоритма автоматической проверки заключается в следующем: такие параметры как минимальная частота отражения (f_{min}) и критические частоты плоских слоёв Es (f_{oes}) должны находиться на краях областей полезного сигнала частотных проекций. Высоты слоёв (hE , hEs , $hF1$, $hF2$), а так же критические частоты слоёв E, Esr, F1 и F2 (f_oE , f_oEs , f_oF1 и f_oF2 соответственно) отображаются как локальные максимумы графиков проекций. В данной работе разработан алгоритм для проверки следующих параметров ионограммы: минимальной частоты отражения, критических частот F1, F2, E, Es слоёв и высот отражений.

Для разработки алгоритма и проверки его работы на максимально разнообразных ионограммах был собран следующий набор из обработанных наблюдателями данных - 272 суток при трёх уровнях солнечной активности, в трёх сезонах и при трёх уровнях геомагнитных возмущённостей. Критерий точности обработки был взят из руководства по ионосферным, магнитосферным и гелиогеофизическим наблюдениям [4] и составляет ± 4 пикселя, что соответствует $\pm 0,1$ МГц и ± 12 км.

На первом шаге работы алгоритма происходит фильтрация ионограмм (рис. 1 б). После фильтрации составляются суточные массивы высотных и частотных проекций. Частотные проекции разделены на E и F области на высоте 150 км (рис. 1 б). Для проверки параметров по локальным максимумам для каждого столбца-проекции ионограммы определялись локальные максимумы с условиями, позволяющими не учитывать большую часть оставшегося шума (рис. 2 б). Проверка на наборе данных выявила, что примерно половина проверяемых критических частот и высот находятся на расстоянии от локальных максимумов больше, чем заданный интервал точности. Для увеличения вероятности обнаружения проверяемых параметров возле локальных максимумов были добавлены области сигнала вокруг максимумов, найденные через производные. При таком подходе в интервал точности попали от 60 до 87 процентов проверяемых параметров.

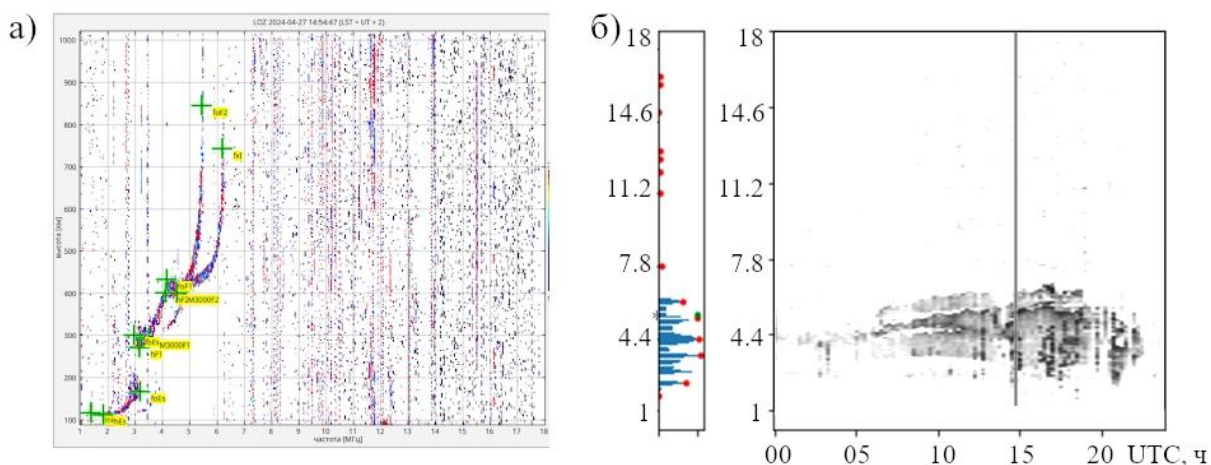


рис. 2. Пример выделения локальных максимумов на суточном графике частотной проекции области F (б) и соответствие им параметров ионограммы (а).

Для параметров, определяемых по краям областей полезного сигнала, был подобран фильтр, основанный на алгоритме обнаружения гребня `skimage.filters.meijering` [5, 6], реализованный в библиотеке `skimage` языка программирования `python`. Подобные фильтры хорошо выделяют структуры типа сосудов на медицинских снимках, рек на спутниковых снимках. Данный фильтр выделил не только границы сигнала, но и области вокруг локальных максимумов. С помощью данного фильтра из графиков получалась маска, на которой проходили проверку параметры (рис. 3). В эту маску попали от 82 до 97 процентов всех искомых параметров, что является хорошим результатом. Однако, линии масок достаточно широкие, и этот факт не позволяет решить задачу проверки правильности определения параметра с высокой точностью. Данная проблема несовпадения параметров с локальными максимумами связана с правилами обработки ионограмм – определением высоты не по центру трека отражённого сигнала, где наибольшая интенсивность, а по нижнему краю, и определением критической частоты по левому краю трека, что может не совпадать с наибольшей интенсивностью в случае диффузности отражённого сигнала.

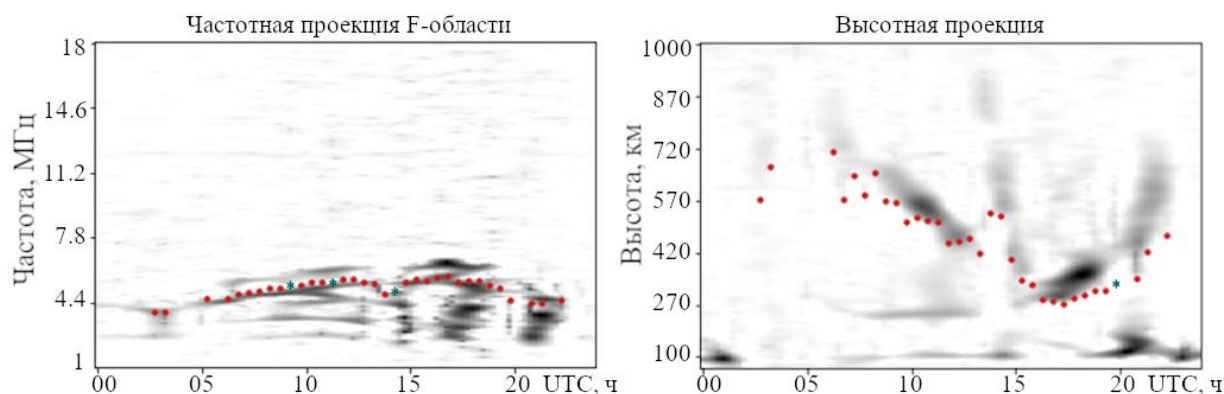


Рис. 3. Маска после работы алгоритма обнаружения гребня.

Проценты нахождения параметров собранного набора данных описанными тремя методами приведены в таблице:

метод	fmin	foE	foEs	foF1	foF2	hE	hEs	hF1	hF2
локальные максимумы	42.2%	59.6%	33.6%	60.4%	68.5%	61.4%	68.6%	34.0%	29.0%
область вокруг локального максимума	66.4%	87.6%	57.1%	75.6%	82.5%	79.9%	83.2%	72.3%	61.3%
маска	90.4%	97.2%	85.2%	90.7%	94.9%	93.2%	96.8%	89.9%	82.3%

В результате работы алгоритма все не прошедшие проверку параметры сохраняются в список. Также создаётся папка, в которую сохраняются ионограммы с отмеченными на них непрошедшими параметрами для визуальной проверки.

Заключение

Разработан алгоритм автоматизированной проверки результатов обработки ионограмм вертикального зондирования ионосферы для таких параметров как минимальная частота отражения, критические частоты и высоты отражений от F1, F2, E, Es слоёв ионосферы. Алгоритм основан на анализе временного распределения интегральной интенсивности отраженного сигнала по частоте или высоте. Точность работы алгоритма для определенных параметров составляет около 90%, что является достаточным для работы. Для увеличения точности определения остальных параметров необходимо добавлять новые методы проверки. Алгоритм предназначен для выявления ошибок в обработке наблюдателями для контроля и самоконтроля, проверки массива данных перед использованием в научной работе, а так же для проверки набора данных для обучения и тестирования нейросетевых моделей автоматической обработки ионограмм [7] и контроля работы самих нейросетевых моделей.

Список публикаций:

- [1] ФГБУ "ААНИИ". Геофизические исследования в высоких широтах / А. С. Калишин, Н. Ф. Благовещенская, О. А. Трошичев, А. В. Франк-Каменецкий // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. – 2020. – № 3-4(107-108). – С. 60-78. – DOI 10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-60-78
- [2] Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. -1072с.
- [3] Долгачева, С. А. Цифровой информационный ресурс мониторинга и моделирования геофизической обстановки в Арктике / С. А. Долгачева, Н. А. Степанов, А. С. Калишин // Российские полярные исследования. – 2025. – № 2(60). – С. 21-26
- [4] РД 52.26.817-2023 Руководство по ионосферным, магнитосферным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть 1- Ионосферные наблюдения
- [5] Meijering, E., Jacob, M., Sarria, J. C., Steiner, P., Hirling, H., Unser, M. (2004). Design and validation of a tool for neurite tracing and analysis in fluorescence microscopy images. Cytometry Part A, 58(2), 167-176. DOI:10.1002/cyto.a.20022
- [6] Нуньес-Иглесиас Х., Уолт Ш. ван дер, Дэшиноу Х. Элегантный SciPy. Искусство научного программирования на Python. М.: ДМК Пресс, 2018. – 267 с.
- [7] Долгачева, С. А. Автоматическая интерпретация высокоширотных ионограмм CADI: обнаружение слоев E, Es, F1 и F2 / С. А. Долгачева, А. В. Николаев, Л. Н. Макарова // Physics of Auroral Phenomena. – 2021. – Т. 44, № 1. – С. 133-136. – DOI 10.51981/2588-0039.2021.44.031.

Характеристики поля разреженной ФАР скрещенной конфигурации в задаче фокусировки излучения

Димов Максим Андреевич

Шипилов Сергей Эдуардович

Томский государственный университет

E-mail: nasa300@mail.ru

Для задач, требующих сканирования луча по двум координатам, традиционно применяются плоские фазированные антенные решётки (ФАР) с заполнением апертуры по типу квадратной матрицы. Такой подход требует большого числа излучателей и управляющих элементов, что усложняет и удорожает систему. В данной работе методом математического моделирования исследуется альтернативная разреженная конфигурация — «скрещенная» (крестовидная) ФАР, с целью оценить её характеристики поля (размер фокального пятна и уровень боковых лепестков) при фокусировке в ближнюю зону.

Проведено сравнение двух решёток, работающих на частоте 4.9 ГГц и сфокусированных на расстояние $z = 1$ м: полностью заполненной квадратной матрицы 6×6 (36 излучателей) и разреженной скрещенной решётки, сформированной из двух пересекающихся прямоугольных решёток 3×7 (суммарно 33 излучателя). Для оценки характеристик при отклонении луча от нормали, было рассчитано амплитудно-фазовое распределение для фокусировки поля в точку (0.5 м, 0.5 м, 1 м).

Результаты моделирования распределения поля в плоскости фокусировки представлены на рис. 1. Сравнение показало, что скрещенная решётка с 33 излучателями позволяет получить размер главного лепестка (45 см), практически идентичный размеру лепестка квадратной решётки из 36 излучателей (44 см). При этом ключевым преимуществом скрещенной конфигурации является более низкий уровень боковых лепестков (0.17 отн. ед. против 0.25 отн. ед. у квадратной решётки).

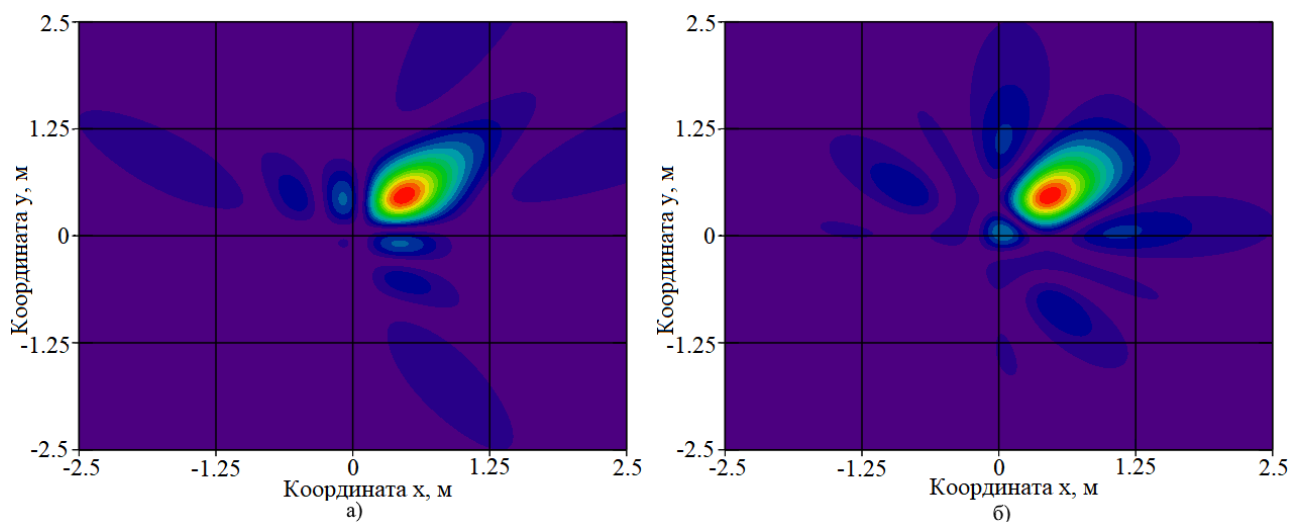


Рис. 1. Распределение поля на плоскости $z = 1$ м при фокусировке в точку (0.5 м, 0.5 м) для: а) квадратной ФАР из 36 излучателей; б) скрещенной ФАР из 33 излучателей.

Таким образом, исследование показало, что разреженная ФАР скрещенной конфигурации является эффективной альтернативой полностью заполненным решёткам. Несмотря на использование меньшего на 8% числа излучателей, данная конфигурация обеспечивает сопоставимую разрешающую способность и одновременно достигает лучшего подавления боковых лепестков. Этот результат указывает на возможность существенного снижения стоимости и сложности аппаратной реализации ФАР за счёт уменьшения количества излучающих элементов и связанных с ними фазовращателей без ухудшения ключевых характеристик системы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-15-2024-557 от 25.04.2024 "Развитие фундаментальных основ новых технологий обеспечения безопасности жизнедеятельности на основе интеграции мультимодальной радиоволновой и оптической дистанционной сенсорики, и искусственного интеллекта".

Сравнительный анализ КПД различных компоновок согласующей цепи антенного согласующего устройства КВ-диапазона при работе с укороченными антеннами электрического типа**Агарков Никита Евгеньевич***Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)**Омский научно-исследовательский институт приборостроения**E-mail: agarkov.nikita@gmail.com*

Известно, что укорочение излучателей антенн относительно длины рабочей волны приводит к ухудшению коэффициента усиления антенн, увеличению количества разрядов согласующих звеньев в антенных согласующих устройствах (АнСУ), снижению КПД АнСУ и системы «Антенна – АнСУ», к сужению полосы согласования системы [1-4]. Ухудшаются (усложняются) режимы работы элементов АнСУ. Несмотря на перечисленные проблемы, использование укороченных приземных антенн в КВ диапазоне позволяет повысить мобильность и скрытность комплексов радиосвязи малой мощности (от 10 до 100-200 Вт) за счет уменьшения времени развертывания и свертывания антенн, увеличения надежности их конструкций, а также повышения удобства эксплуатации.

Существует два пути повышения эффективности систем «приземная укороченная антенна – АнСУ». Первый путь заключается в применении излучателей антенн с пониженным волновым сопротивлением, что позволяет повысить конструктивную емкость антенн электрического типа (снизить конструктивную индуктивность антенн магнитного типа). Это, в свою очередь, обеспечивает сокращение количества согласующих звеньев в АнСУ и приближает режимы работы согласующей цепи (СЦ) к работе на полноразмерные антенны с небольшим уровнем вносимых потерь АнСУ (до 1-3 дБ). Данный путь давно известен и находит широкое применение в конструкциях стационарных, реже – крышевых антенн транспортных средств [1-5]. Однако преимущества данного пути перетекают в его главный недостаток – необходимость применения сложных объемных конструкций излучателей и противовесов антенн. Условия использования носимых и мобильных радиостанций малой мощности зачастую не позволяют применять такие антенны. Наоборот, необходимость сокращения времени на подготовку к сеансу связи и обеспечение высокой мобильности радиосредств предопределяет использование в качестве излучателей антенн простых проволочных конструкций, обладающих высоким волновым сопротивлением. Согласование таких антенн с точки зрения обеспечения малого уровня вносимых потерь АнСУ затруднено.

На практике при использовании антенны Куликова с длиной излучателя 2,4 м в диапазоне частот от 2 до 8-10 МГц наблюдается дополнительное, возрастающее со снижением частоты, ухудшение эффективности системы (до 3-10 дБ) относительно прогнозируемых показателей [6]. Оно связано с различными паразитными параметрами СЦ (и ее звеньев), проявляющимися по мере укорочения излучателя антенны относительно длины рабочей волны [7-9]. Поэтому второй путь увеличения эффективности системы «приземная укороченная антенна – АнСУ», рассматриваемый в данной работе, заключается во всестороннем учете эффектов системного взаимодействия укороченной приземной антенны с АнСУ при компоновке СЦ АнСУ. Целью работы является анализ КПД трех различных компоновок СЦ АнСУ радиостанции малой мощности, при разработке которых были учтены различные особенности взаимодействия с укороченными приземными антеннами. В качестве таких антенн в исследовании выступали антенна Куликова с длиной излучателя 2,4 м (АШ-2,4), а также антенна «Наклонный луч» с длиной плеча 9 м и высотой подвеса 6 м (НЛ 9/6).

Оценка КПД АнСУ производилась в лабораторных условиях с использованием в качестве нагрузки СЦ диапазонных эквивалентов антенн (ЭА) [3,4,10]. Они повторяют импеданс передающей антенны с погрешностью не более 20-30% в диапазоне частот с перекрытием до 4-10, что сопоставимо с разницей в активной и реактивной части импеданса при практическом развертывании антенн над различными типами подстилающей поверхности. Разработанные ЭА предназначены для измерения КПД АнСУ прямым способом. Они построены на основе связанных LC-контуров с единственной оконечной согласованной нагрузкой (50 Ом) для измерения проходящей мощности и имеют измеренную частотную зависимость собственного КПД, учитываемую при оценке КПД АнСУ. Погрешность оценки величины вносимых потерь АнСУ использованным методом, связанная с влиянием паразитных параметров печатных проводников топологии ЭА, а также КСВ на входе АнСУ от 1,1 до 1,5, составляет не более 0,3 дБ (не более 6% КПД). При проведении трассовых испытаний систем «приземная антенна – АнСУ» КВ диапазона обеспечить столь малую погрешность оценки КПД АнСУ и системы не представляется возможным [11].

На рис. 1 представлены графики импеданса ЭА АШ-2,4, а также НЛ 9/6, использованных для оценки КПД АнСУ. С учетом наличия у СЦ паразитной емкости между ее прямым и обратным проводником, достигающей нескольких десятков пикофард, на рис. 1 для примера показаны кривые согласуемого АнСУ импеданса ЭА АШ-2,4 и НЛ 9/6 при их подключении к СЦ с паразитной емкостью 30 пФ. На рис. 2 приведены принципиальные схемы ЭА и частотные зависимости их собственного КПД.

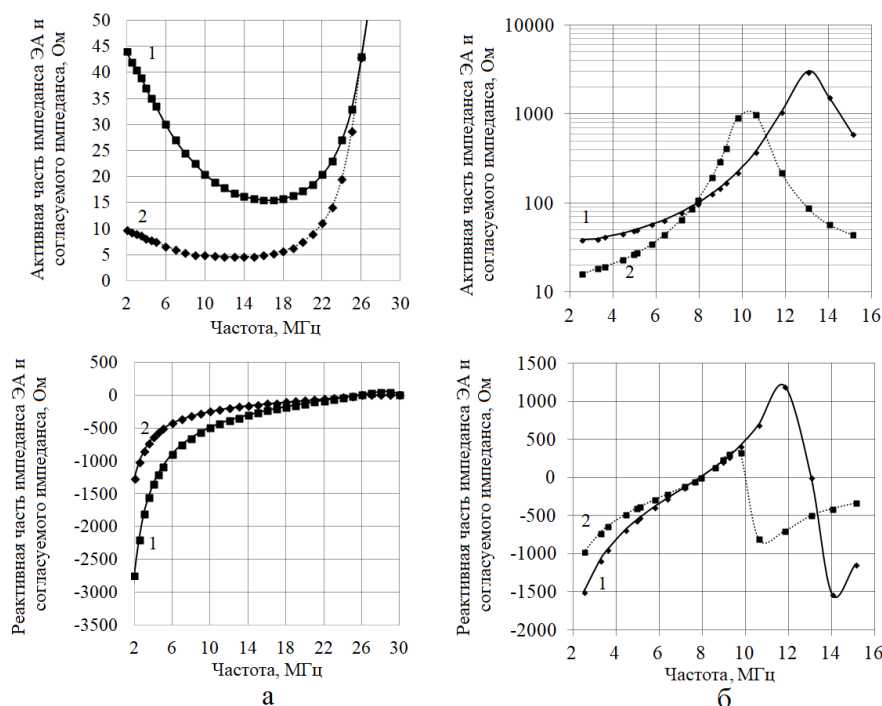


Рис. 1 Частотные зависимости собственной активной и реактивной части импеданса (1) ЭА АШ-2,4 (а) и ЭА НЛ 9/6 (б), а также при подключении ЭА к СЦ с паразитной параллельной емкостью 30 пФ (2)

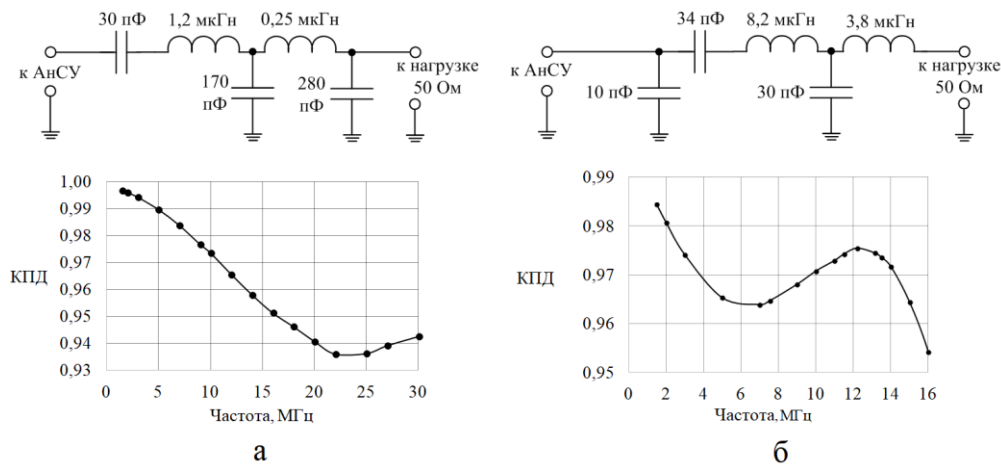


Рис. 2 Принципиальная схема и КПД ЭА АШ-2,4 (а) и НЛ 9/6 (б)

Для проведения сравнительного анализа КПД различных компоновок СЦ АнСУ использовались три образца СЦ. Первая СЦ представляла собой перебрасываемую из прямой в обратную Г-цепь [12, 13], содержащую 14 индуктивных звеньев (от 25 нГн до 50 мкГн), 11 емкостных согласующих звеньев (от 2 до 2048 пФ) и 3 шунтирующих емкостных звена (от 10 до 30 пФ). СЦ была реализована на печатной плате с подложкой из материала с $\text{tg}\delta \approx 0,02$, имеющей габаритные размеры 200x150 мм, что привело к необходимости использования длинных проводников между катушками и реле индуктивных звеньев СЦ. Кроме этого габаритные размеры катушек индуктивности, применяемых в первой СЦ, были значительно уменьшены относительно оптимальных. Вторая и третья СЦ были выполнены в виде набора широкополосных трансформаторов сопротивления с дискретно коммутируемым коэффициентом трансформации (из 50 Ом в 12; 18; 30; 50; 85; 145; 230; 415 и 700 Ом) и содержали цепь компенсации реактивного сопротивления антенны, подключаемой последовательно к нагрузке (10 индуктивных звеньев от 50 нГн до 25,6 мкГн, 11 емкостных звеньев от 2 до 2048 пФ, а также 2 шунтирующих нагрузку емкостных звена емкостью 22 и 33 пФ) [14, 15]. Вторая СЦ была реализована на печатной плате из материала с $\text{tg}\delta \approx 0,02$ и имела габаритные размеры 350x300 мм, что позволило реализовать оптимальные компоновки индуктивных звеньев как в части габаритных размеров сердечников старших разрядов (до 45x55 мм), так и в части минимизации длины печатных проводников звеньев между катушкой и реле. Третья СЦ была реализована на печатной плате из материала с $\text{tg}\delta \approx 0,008$ и габаритными размерами 230x150 мм, из-за чего вынужденно были увеличены длины печатных проводников индуктивных звеньев между катушкой индуктивности и реле (аналогично первой используемой СЦ).

На рис. 3 показаны практические и теоретические графики вносимых потерь СЦ АнСУ и их КПД. Теоретические кривые построены на основе учета активного сопротивления индуктивных звеньев, компенсирующих реактивную часть импеданса ЭА на каждой частоте при неизменной добротности звеньев 150 ед. Для теоретических кривых не учитывался эффект повышения добротности согласуемого импеданса из-за наличия паразитной емкости СЦ, а также не учитывались частотные зависимости добротности звеньев и другие паразитные эффекты СЦ. При проведении экспериментов мощность передатчика в режиме несущей варьировалась от 50 до 100 Вт, выдерживался критерий согласования на входе АнСУ не более 1,5 на рабочей частоте.

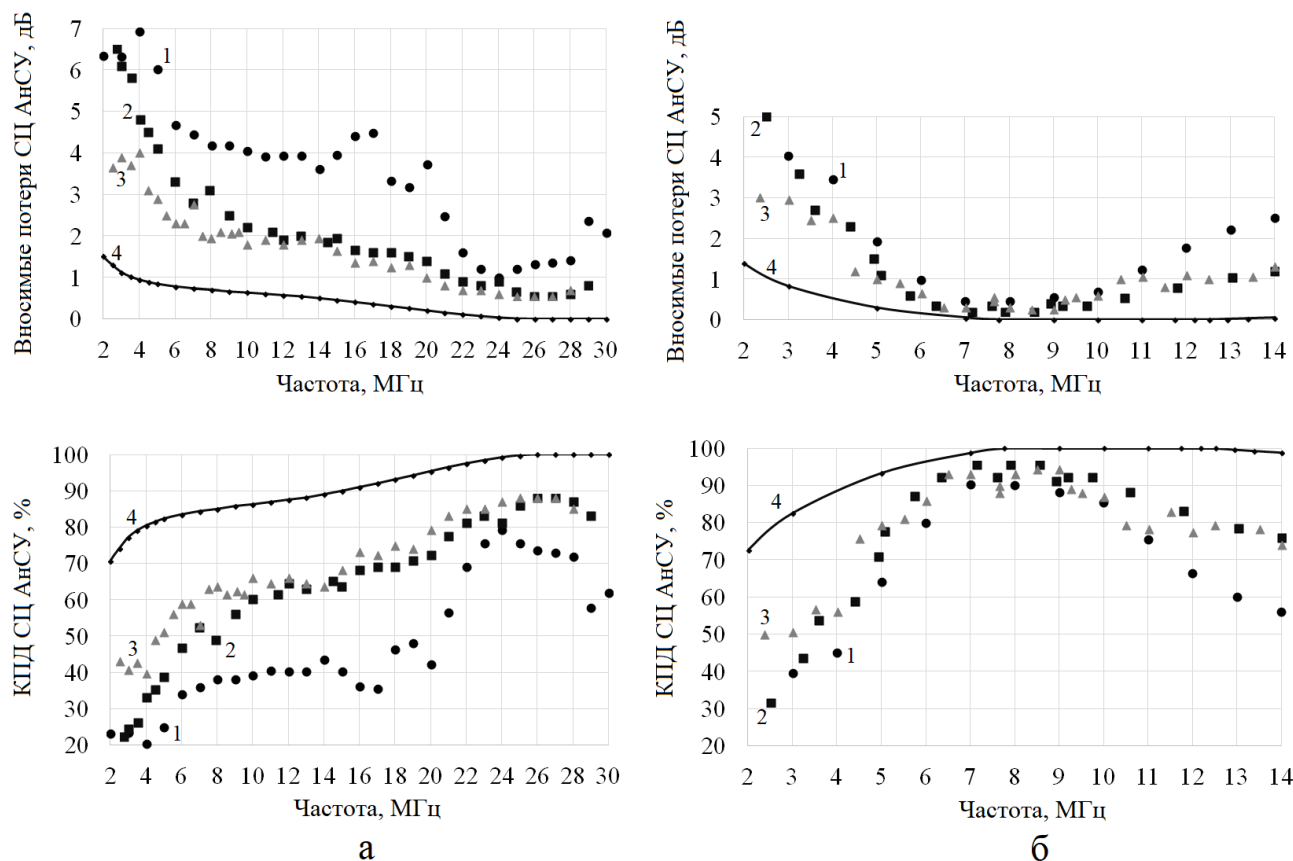


Рис. 3 Частотные зависимости вносимых потерь и КПД первой СЦ (1), второй СЦ (2), третьей СЦ (3) и теоретической кривой (4) при работе СЦ с ЭА АШ-2,4 (а) и НЛ 9/6 (б)

Перед анализом приведенных на рис. 3 графиков необходимо описать дополнительные особенности каждой из использованных в экспериментах СЦ.

Во-первых, вокруг первой СЦ на расстоянии не более 10 мм с каждой из сторон находился металлический корпус, что снизило добротности индуктивных звеньев до 50-100 ед. Во второй и третьей СЦ были достигнуты добротности (отношения реактивной части импеданса к активной) индуктивных звеньев в пределах 100-250 ед. за счет применения сердечников из карбонильного железа оптимальных размеров (до 45x55 мм) для старших разрядов индуктивных звеньев, а также выполнения корпуса АнСУ из пластика. Воздушные катушки индуктивности-соленоиды младших разрядов (1600 нГн и менее) располагались над поверхностью печатной платы на расстоянии 5 мм, в их конструкции не применялся клей, а для увеличения жесткости использовался провод ПЭТВ-2 диаметром 2 мм. Для дополнительного снижения эффекта близости данные катушки наматывались с зазором между витками в 1 мм, а не вплотную, как в подавляющем большинстве выпускаемых АнСУ. Это дополнительно способствовало увеличению их добротности и линейности реактивной части импеданса во всем рабочем диапазоне частот каждого из звеньев [16, 17].

Во-вторых, в первой СЦ паразитная шунтирующая емкость СЦ составляла порядка 90 пФ, в то время как во второй и третьей СЦ она находилась на уровне 33 и 27 пФ, соответственно. К большой величине паразитной емкости первой СЦ привело как наличие дополнительных полигонов и слоев под топологией СЦ в многослойной печатной плате АнСУ, так и большая общая длина прямого и обратного проводника СЦ вследствие необходимости размещения в крайне ограниченных габаритных размерах печатной платы очень большого числа согласующих звеньев. Величина 90 пФ сопоставима с конструктивной емкостью таких полноразмерных антенн, как «Вертикальный полуромб» с половинной длиной плеча 10-12 м, в то время как величины 27 и 33 пФ сопоставимы с емкостью антенны Куликова длиной 2,4 м. Поэтому режим работы первой СЦ при подключении

к ней антенны Куликова (ЭА) с малой емкостью является достаточно близким к понятию «самонастройки» СЦ на собственную паразитную емкость с конечным $\text{tg}\delta$. Основная часть мощности передатчика, согласно возникающему делителю напряжения, будет рассеиваться в этой паразитной нагрузке СЦ, что и наблюдается на практике.

В-третьих, эквивалентная индуктивность звеньев первой СЦ с ростом частоты возрастала значительно быстрее, чем в аналогичных звеньях второй и третьей СЦ, что приводило к необходимости включения на некоторых частотах шунтирующих конденсаторов для обеспечения критерия согласования системы «ЭА – АнСУ». Включение таких конденсаторов вне окрестности частоты параллельного резонанса антенны (ЭА) всегда приводит к резкому снижению КПД АнСУ на этих частотах.

С учетом описанных выше особенностей каждой из использованных СЦ, анализ графиков *рис. 1 и 3* позволяет определить следующие общие закономерности поведения КПД (величины вносимых потерь) СЦ АнСУ в диапазоне рабочих частот ЭА.

Во-первых, при работе СЦ с ЭА НЛ 9/6 наименьшим КПД обладает первая СЦ с наибольшей паразитной емкостью. Помимо шунтирующего эффекта, активная часть импеданса данной паразитной емкости вносит вклад в согласуемое активное сопротивление системы и выступает внутренней паразитной нагрузкой АнСУ (происходит нагрев печатной платы в местах расположения проводников СЦ). На частотах выше 11 МГц у первой СЦ заметно резкое снижение КПД до 70-55%, в то же время значения КПД теоретической кривой 4 на *рис. 3, б* близки к 98-99%. Снижение КПД второй и третьей СЦ в диапазоне частот выше 11 МГц менее существенно (до 80-75%). Оно имеет в своей основе ту же причину – паразитную емкость СЦ. У третьей СЦ к этому эффекту добавляется и более низкая, чем у второй СЦ, добротность индуктивных звеньев. Антенна НЛ 9/6 между первым параллельным и вторым последовательным резонансом является полноразмерной. Несмотря на это, в указанном интервале частот, характер поведения КПД всех использованных СЦ АнСУ схож с работой СЦ на укороченную антенну. Данный эффект необходимо учитывать при прогнозировании энергетических характеристик радиолиний. В работе [10] приводится частотная зависимость величины вносимых потерь второй СЦ при работе с ЭА «Вертикальный полуромб», на которой присутствует и спад величины вносимых потерь при приближении рабочей частоты к частоте второго последовательного резонанса ЭА. Все использованные СЦ имеют максимальный КПД в диапазоне частот от 7 МГц (окрестность частоты последовательного резонанса, где в СЦ задействуются согласующие звенья младших разрядов) до 9 МГц, где ЭА обладает высоким активным сопротивлением. В диапазоне от 2 до 6 МГц наибольшее КПД наблюдается у третьей СЦ с наименьшей паразитной емкостью и наименьшим $\text{tg}\delta$. Однако на частотах от 2,5 до 4 МГц у третьей СЦ заметно очень медленное повышение КПД, что также связано с более низкими, чем у второй СЦ, добротностями индуктивных звеньев, особенно старших разрядов.

Во-вторых, при работе СЦ с ЭА АШ-2,4, описанные выше эффекты проявляются еще заметнее, поскольку диапазоны рабочих частот звеньев повышаются на 20-30% относительно работы СЦ с ЭА НЛ 9/6 (возрастает нелинейность реактивной части их импеданса), а активная часть согласуемого импеданса в диапазоне частот от 2 до 22 МГц (без учета дополнительного активного сопротивления паразитной емкости) находится в пределах 5-10 Ом. Включение шунтирующих емкостных звеньев при работе первой СЦ в диапазоне частот от 15 до 17 МГц, а также на частотах 19 и 29 МГц приводит к резкому снижению КПД СЦ на десятки процентов, что закономерно. При обсуждении графиков КПД первой и третьей СЦ необходимо акцентировать внимание на частотном диапазоне от 2,5 до 4 МГц, где у обеих СЦ наблюдается падение КПД с ростом частоты. Оно вызвано быстрым снижением добротности старших звеньев с ростом частоты из-за емкостей длинных печатных проводников между катушками индуктивности и реле звеньев старших разрядов. График КПД второй СЦ, в конструкции которой реализованы оптимальные компоновки индуктивных звеньев, не имеет такой особенности. По мере приближения к частоте 30 МГц на графиках всех использованных СЦ заметно снижение КПД, вызванное паразитными емкостями печатных проводников в местах установки реле, создающих внутренние паразитные связи в СЦ. Стоит отметить, что ни одна СЦ в диапазоне частот от 20 до 30 МГц не обеспечивает КПД более 80-88%, хотя для согласования в данной области частот используются младшие разряды индуктивных и емкостных звеньев. Этот эффект объясняется тем, что прямой и обратный проводник согласующей цепи сам выступает в качестве неотключаемого разряда индуктивности с низкой добротностью порядка 30-50 ед. Дополнительный вклад в снижение этой добротности вносят контакты реле индуктивной ветви СЦ, соединенные последовательно друг с другом. Активная часть импеданса собственной индуктивности прямого и обратного проводника СЦ на частотах от 20 до 25 МГц у разных компоновок СЦ достигает 3-6 Ом, а активная часть согласуемого импеданса при подключении к СЦ ЭА АШ-2,4 составляет от 7 до 25 Ом (*рис. 2*) на тех же частотах.

В-третьих, ввиду различных технических требований, предъявляемых к габаритным размерам второй и третьей СЦ, каждая из них обладает своими преимуществами и недостатками перед другой. В целом, за счет применения материала печатной платы с величиной $\text{tg}\delta$ около 0,008 и наименьшей длины прямого и обратного проводника СЦ, наибольшим КПД обладает третья СЦ.

Таким образом, благодаря выявлению и учету эффектов системного взаимодействия СЦ АнСУ с импедансом укороченной приземной антенны, удалось повысить КПД новых образцов АнСУ на 15-20% при

работе СЦ на импеданс антенны НЛ 9/6 и на 20-30% при работе СЦ на импеданс антенны АШ-2,4. Дальнейшее приближение частотных зависимостей КПД СЦ к показанным в данной работе теоретическим кривым возможно путем применения объемного монтажа в части прямого и обратного проводника СЦ, а также звеньев СЦ. Дополнительной мерой повышения КПД является минимизация длин прямого и обратного проводника СЦ (уменьшение паразитной шунтирующей емкости СЦ, а также паразитной низкодобротной индуктивности СЦ). Еще одной мерой повышения КПД АнСУ является организация рациональной компоновки каждого индуктивного звена в части минимизации длин его проводников, что приводит к увеличению добротности звеньев в широком диапазоне частот и обеспечению вместе с этим большей линейности реактивной части импеданса звеньев. В свою очередь, высокая линейность реактивной части импеданса индуктивных звеньев обеспечивает сокращение областей «пораженных» частот согласования системы с низким КПД СЦ в связи с отсутствием необходимости включения шунтирующих емкостных звеньев вне окрестностей частот параллельных резонансов нагрузки.

Проведение данных исследований стало возможным благодаря разработке и внедрению в процесс отладки макетов и опытных образцов СЦ АнСУ специального класса устройств – широкодиапазонных эквивалентов передающих антенн, предназначенных для прямого измерения выходной мощности АнСУ и имеющих апробированную частотную зависимость собственного КПД относительно широкополосной выходной нагрузки 50 Ом.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Список публикаций

- [1] Гвоздев И.Н., Муравьев Ю.К., Серков В.П., Чернолес В.П. Характеристики антенн радиосистем связи. Ленинград: Изд. ВАС, 1978. 231 с.
- [2] Мешалкин В. А., Сосунов В. В., Филиппов В. В. Поля и волны в задачах разведзащищенности и радиоэлектронной защиты систем связи. С.-Пб.: ВАС, 1993. 321 с.
- [3] Лавров Г. А., Князев А. С. Приземные и подземные антенны. М.: Советское радио, 1965. 472 с.
- [4] Верецагин Е. М. Антенны и распространение радиоволн. М.: Воениздат, 1964. 240 с.
- [5] Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. М.: Радиотехника, 2009. 720 с.
- [6] Агарков Н. Е. Влияние паразитной емкости согласующей цепи на вносимые потери антенного согласующего устройства // Техника радиосвязи. 2025. Выпуск 1 (64). С. 40–55.
- [7] Агарков Н.Е. Влияние комбинации согласующих звеньев на вносимые потери антенного согласующего устройства КВ-диапазона // XVIII Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин». Омск, ОмГТУ. – 2024. – С. 3-11.
- [8] Борийчук Г. И., Юдин А.А., Селягин М. А., Сергеев В. М. Синтез антенных согласующих устройств с вычислительными алгоритмами настройки // Вопросы расчета и проектирования антенн и радиолиний. Изд. ВАС, 1985. С. 138-145.
- [9] Ковалевич Д. А. Способ автоматического согласования антенны и выходных каскадов передатчика // Доклады БГУИР. 2021. №19 (3). С. 31-39.
- [10] Агарков Н.Е. Анализ диапазонных свойств антенного согласующего устройства КВ-диапазона при работе на эквиваленты передающих антенн // III Российская научно-техническая конференция «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества» (РФИВ-2024). Омск, ОНИИП. – 2024. – С.33-35.
- [11] Агарков Н. Е., Бучельников А. В. Анализ частотных характеристик малогабаритных вертикальных несимметричных вибраторов КВ-диапазона, расположенных над естественной и искусственной подстилающей поверхностью // Техника радиосвязи. 2023. Выпуск 2 (57). С. 7-19.
- [12] Бабков В.Ю., Борийчук Г.И., Виноградов В.А., Лунев С.Ф., Назаренко С.Н., Пивоваров В.Ф. Основы проектирования передающих устройств систем радиосвязи. Изд. ВАС, 1984. 296 с.
- [13] Григоров И.Н. Антенны. Настройка и согласование. М.: ИП РадиоСофт, 2015. 272 с.
- [14] Ангара-1 (2Р-20) // Специальные радиосистемы: офиц. сайт. URL: <https://www.radioscanner.ru/trx/civil/angara-1> (дата обращения: 06.07.2025).
- [15] Агарков Н.Е. Сравнительный анализ частотных характеристик антенного согласующего устройства в виде Г-цепи и в виде набора широкополосных трансформаторов сопротивления с компенсатором реактивности антенны // X Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (АПР-2023). Томск, ТГУ. – 2023. – С.35-39.
- [16] Medhurst R. G. H. F. Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids // Wireless Engineer. February 1947, pp. 35-43.
- [17] Corum K. L., Corum J. F. RF coils, helical resonators and voltage magnification by coherent spatial modes // Microwave Review (IEEE). 2001. Volume 7(2). P. 36-45.

О необходимости учета радиофизических измерений при моделировании работы радиосистемы

Майнеллер Ксения Алексеевна

Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

Омский научно-исследовательский институт приборостроения

E-mail: nelyubova_ksenia@mail.ru

В зависимости от условий эксплуатации антенно-фидерные устройства (АФУ) могут размещаться в большей или меньшей степени вблизи поверхности земли. Земля с реальными электрическими параметрами (диэлектрическая проницаемость, проводимость) оказывает существенное влияние на электрические характеристики антенны. Изменение электрических характеристик АФУ в коротковолновом (КВ) диапазоне частот может существенно повлиять на качество радиосвязи, так как даже незначительные колебания в параметрах могут привести к потере сигнала или ухудшению его устойчивости (стабильности). Поэтому крайне важно заранее прогнозировать эти изменения, учитывая местоположения АФУ, чтобы обеспечить надежную и эффективную работы радиосистемы. Тщательный анализ условий размещения антенн и их электрических параметров позволяет минимизировать риски и оптимизировать работу радиосистем. Практика проектирования и использования АФУ говорит о необходимости решения задач комплексного характера, включающая в себя определение входных характеристик с учетом влияния свойств подстилающей поверхности. Об этом свидетельствует большое количество публикаций [1,2,3,4] в области исследования данного направления. Однако в этих работах не учтена частотная зависимость значений комплексной диэлектрической проницаемости (КДП), которая в большинстве случаев задается постоянной, а значения, приводимые в справочниках и картах диэлектрической проницаемости, являются среднестатистическими и не учитывают такие факторы как влажность почвы после сильных дождей, ее промерзание в зимний период, смену сезонов и т.д. В связи с чем была сформирована цель и задачи данной работы.

Целью данной работы является обоснование необходимости учета результатов радиофизических измерений при моделировании работы радиосистемы. Задачи, которые решаются для достижения данной цели заключаются в проведении сравнительного анализа данных – параметров радиосистемы, полученных с помощью предложенной в работе методики. При этом анализ проведен как с учетом частотной зависимости КДП, так и без, то есть для усреднённых значений КДП [5]. В работе использованы частотные зависимости КДП (рис.1, рис.2), которые получены впервые для КВ диапазона и соответствуют почве Омского региона [6]. Динамическое изменение действительной и мнимой части КДП почвы, наблюдаемое на рис.1 и рис.2 главным образом обусловлены изменением содержания влаги в верхнем слое почвы.

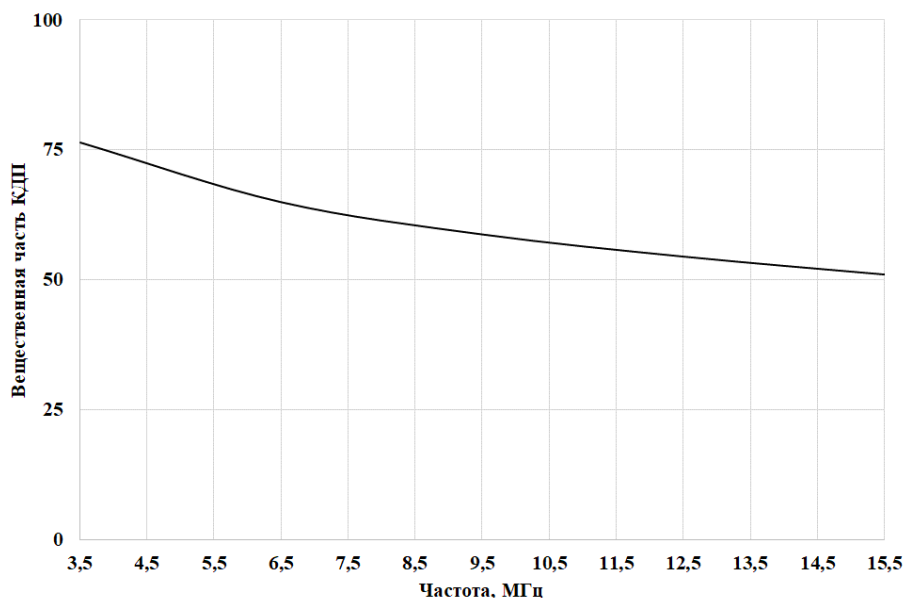


Рис.1 График зависимости вещественной части КДП от частоты

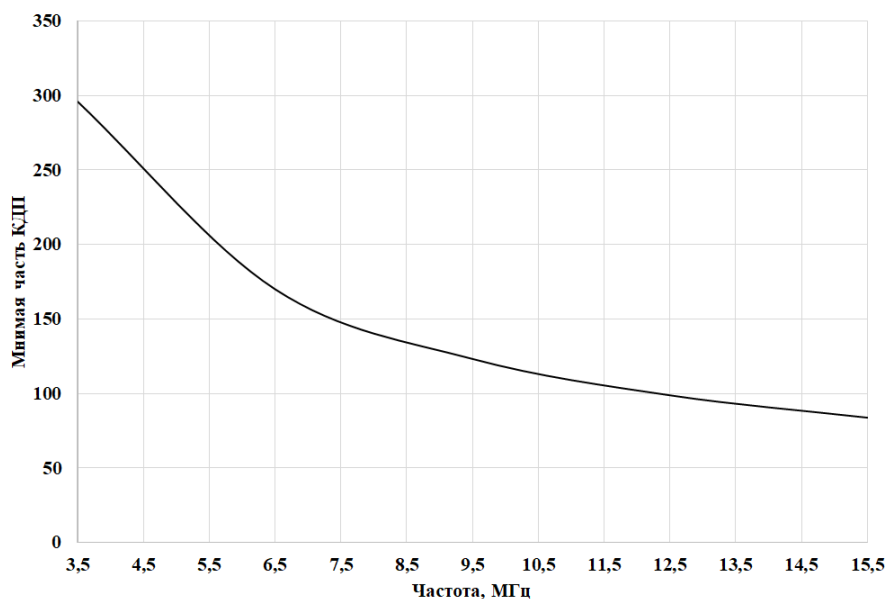


Рис. 2 График зависимости мнимой части КДП от частоты

Как видно из графиков, приведенных на рис.1 и 2, экспериментально полученные значения КДП проницаемости не только отличаются от средних значений КДП, приводимых в справочниках и картах диэлектрической проницаемости [5], но и имеют ярко выраженную частотную зависимость, исследование влияния которой, и вызывает наибольший интерес. В современном развитии радиосистем важное значение приобретает их точное прогнозирование. Одним из ключевых аспектов такого прогнозирования является учет радиофизических измерений КДП. Включение этого фактора в методики моделирования позволяет повысить точность расчетов и обеспечить более эффективное прогнозирование параметров радиосистемы.

Методика прогнозирования параметров функционирования КВ радиосистемы проводится следующим образом. На первом этапе начальными условиями при проектировании являются данные о расположении корреспондентов. По этим данным определяется расстояние между корреспондентами, для которых определяются углы прихода радиоволн, формирующие требование к форме диаграммы направленности (ДН) и, на основании которых, впоследствии выбирается тип АФУ. Далее для получения направленных характеристик выбранный тип АФУ моделируется с использованием электродинамических программных продуктов. При этом моделирование характеристик АФУ можно проводить двумя способами – используя в качестве подстилающей поверхности усредненные справочные значения или полученные экспериментальным путем и частотно зависимые данные КДП. Полученные характеристики АФУ используются при формировании условий функционирования радиосистемы с помощью программного комплекса ПК Трасса 2018 [7]. Примером, на котором будет представлена предлагаемая методика и показана необходимость учета радиофизических измерений для моделирования работы радиосистемы – является организация КВ радиосвязи между корреспондентами, находящимися в городе Омск и Санкт-Петербург. Расстояние между рассматриваемыми корреспондентами составляет 2578 км. В качестве антенны выбран несимметричный вертикальный вибратор, образованный двумя конусами, обращенными широкими частями друг к другу. Диаметр широкой части конусов 6 м и суммарная высота антенны 15 м. Учет влияния солнечной активности в расчетах учитывается «Числом Вольфа», которое характеризует количество групп и количество отдельных пятен на Солнце. При проведении расчетов число Вольфа достаточно задавать равным 150, 70 и 10, это соответствует высокому, среднему и низкому значению индекса солнечной активности. Учет сезонного изменения условий распространения радиоволн произведен путем проведения расчетов для четырех дат характерных периодов каждого года – весеннего равноденствия, летнего солнцестояния, осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния: 22 марта, 22 июня, 22 сентября и 22 декабря, соответственно. Сам расчет проводится по следующему алгоритму. Задается радиотрасса с учетом исходных требований: координаты корреспондентов, тип АФУ, мощность радиопередатчика, полоса пропускания радиоканала, число Вольфа. Далее для выбранной радиотрассы связи проводится расчет значения отношения сигнал/шум (ОСШ) для каждого часа и фиксировалось максимальное ОСШ наблюдаемое в течение суток. В первом случае расчет по описанной методике произведен для характеристики антенны размещаемой над подстилающей поверхностью, значения КДП которой является усредненным и соответствуют средней почве, во втором случае расчет проводится с использованием характеристик антенны, размещаемой над почвой Омского региона, КДП которой взяты из источника [6]. Результаты расчетов, отображающие зависимость ОСШ, для экспериментальных значений (ЭЗ) КДП, которые учитывают радиофизические измерения и от среднестатистических значений (СЗ) КДП средней почвы представлены на рис. 3, 4 и 5.

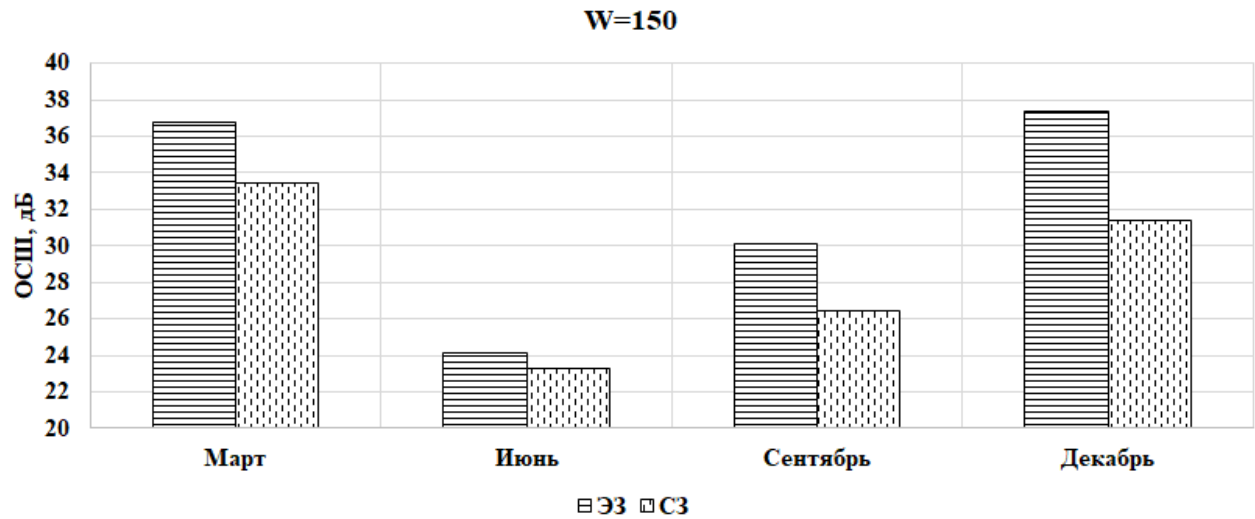


Рис. 3 Зависимость значений SNR от месяца года для ЭЗ, СЗ при высокой солнечной активности (число Вольфа $W=150$)

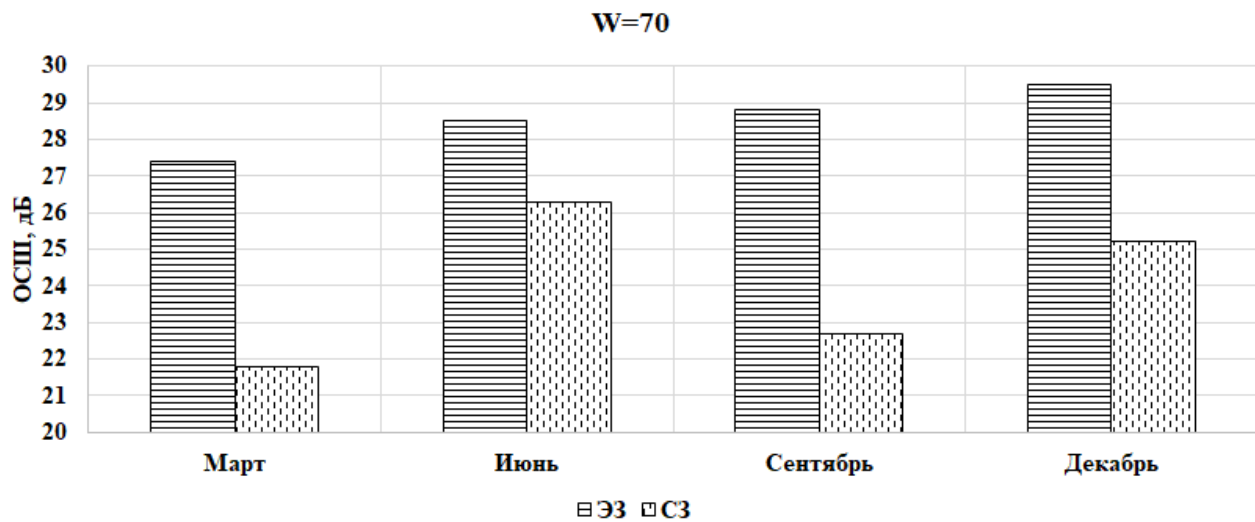


Рис. 4 Зависимость значений SNR от месяца года для ЭЗ, СЗ при средней солнечной активности (число Вольфа $W=70$)

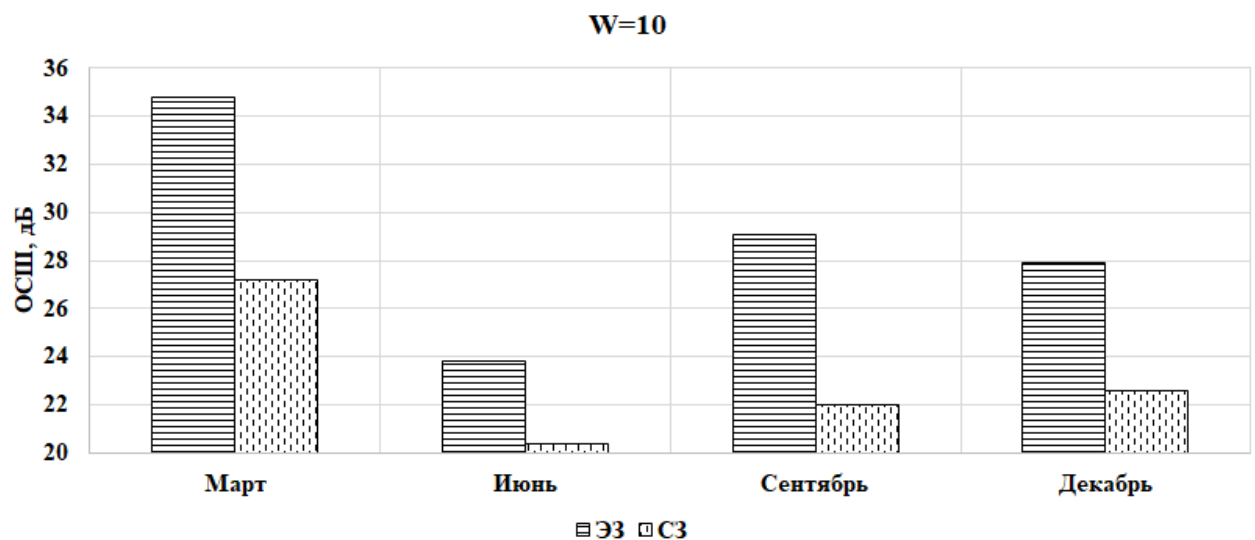


Рис. 5 Зависимость значений SNR от месяца года для ЭЗ, СЗ при низкой солнечной активности (число Вольфа $W=10$)

На основании представленных графиков очевидно, что учет зависимости КДП, полученной экспериментальным путем, существенно отличается от результатов, полученных при использовании усредненных значений КДП. Это особенно видно в периоды низкой солнечной активности, где разница в прогнозных расчетах может достигать 8 дБ. В тоже время в периоды высокой и средней солнечной активности также присутствует разница между значениями, полученными путем прогнозного расчета с учетом радиофизических измерений и без, и составляет величину 6 дБ. Предложенный подход позволяет более точно моделировать условия среды и способствует повышению надежности прогнозирования работы радиосистемы. В некоторых случаях это может повлиять на более оптимальный выбор антенн и снижает необходимость в избыточности запасов схемотехнических решений, что положительно сказывается на эффективности работы радиосистемы в целом. Дополнительно стоит отметить, что учет радиофизических измерений КДП при прогнозировании параметров функционирования КВ радиосистемы помогает адаптировать параметры системы под конкретные условия местности и минимизировать риски возможного потери радиосигнала.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Список публикаций

- [1] *Maurício H. C. Dias, Marinho A. K. Melo. A Field Assessment of HF/VHF Wire Antenna Impedance Changes in Rain Forests / 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP) P.934-938.*
- [2] *Лавров Г.А., Князев А.С. Приземные и подземные антенны. -М.: Советское радио, 1965. 472с.*
- [3] *И.Н. Пестовский. Метод моментов в применении к расчету электрических характеристик антенн в диссипативных средах // Радиотехника. №4, 2015. С.51-56.*
- [4] *Раишковский С.Л. Исследование антенн, расположенных вблизи границы раздела двух сред методом интегрального уравнения. //Известия Вузов. Радиофизика. 1981. Т.24, №4, С. 460.*
- [5] *Electrical characteristics of the surface of the Earth URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-4-201706-1!!PDF-E.pdf (дата обращения 27.01.2025)*
- [6] *Варнаков С.А, Яценко А.С., Кривальцевич С.В., Никифорова А.О. Влияние засоления на диэлектрические характеристики почв. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.1>*
- [7] *М.М. Анишин, Л.П. Радио. Программный комплекс для прогнозирования характеристик КВ-радиолоний «Трасса-2019» // Техника радиосвязи. №4, 2019. С.14-26.*

Импедансные характеристики грунта в приближении вертикально-неоднородного диэлектрика

Яценко Александр Сергеевич
Кривальцевич Сергей Викторович
Омский НИИ приборостроения,

Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН
E-mail: x_rays1@mail.ru

Процесс возникновения и дальнейшего распространения земной волны обусловлен взаимодействием электромагнитного поля, окружающего излучающую систему, с подстилающей поверхностью. В общем случае под подстилающей поверхностью понимают любой объект или структуру вблизи которых расположено антенно-фидерное устройство: почва, грунт, палуба судна, кровля здания и др. В данной работе под термином «подстилающая поверхность» будем понимать тот или иной тип почвы или грунта. Уровень напряженности поля земной волны является функцией двух переменных: расстоянием от излучателя и радиофизическими характеристиками подстилающей поверхности. Поскольку почвы и грунты являются слабыми магнетиками, то их радиофизические характеристики определяются комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП).

Существует совокупность решений электродинамической задачи распространения земной волны, позволяющих количественно определить уровень напряженности поля при известном расстоянии от источника и радиофизических характеристиках подстилающей поверхности, вблизи которой происходит процесс распространения. Так, в [1] приведено выражение, описывающее функцию ослабления земной волны вблизи однородного диэлектрика в приближении плоской Земли, известное как формула Шулейкина-ван-дер-Поля. Теоретическое обоснование влияния дифракции на распространение электромагнитных волн вблизи поверхности сферической Земли при условии однородности её диэлектрических свойств в пределах толщины скин-слоя, описано в [2]. В работе [3] рассмотрен процесс распространения земной волны над кусочно-однородной (в горизонтальном направлении) трассой. Теоретический анализ влияния вертикально-неоднородного диэлектрика на значения поверхностного импеданса (и функции затухания с ней связанной) приведён в [4]. В работе [5] приведены результаты расчётов напряженности поля электромагнитных волн декаметрового диапазона, распространяющейся как над открытой поверхностью моря, так и покрытой льдом конечной толщины. Известны работы [6, 7], в которых исследуется вид спектра поверхностного импеданса структуры «морская вода-лёд» при разной толщине морского льда. Однако вопрос влияния профиля КДП подстилающей поверхности на процесс распространения земной волны изучен недостаточно подробно.

В данной работе нами производилась оценка импедансных характеристик подстилающей поверхности на разных этапах процесса промерзания. Профиль диэлектрической проницаемости промерзающей почвы задавался в виде ломаной линии (см. рис. 1). Диэлектрические характеристики подстилающей поверхности соответствовали суглинку и песчаной почве в талом (при температуре +1 °С) и мёрзлом (при температуре -3 °С) состояниях при значении объёмной влажности близкой в 20% на частоте 3МГц. Значения КДП определялись экспериментально в лабораторных условиях и составляли: $\epsilon=4,5-13i$ и $\epsilon=5,5-29,5i$ для песчаной почвы в мёрзлом и талом состоянии соответственно, $\epsilon=30-28i$ и $\epsilon=81-113i$ для суглинистой почвы в мёрзлом и талом состоянии соответственно. Данные о КДП предоставлены сотрудниками Лаборатории диэлькометрии и петрофизики ОмГПУ. Введение переходного слоя между замёрзшей и незамерзшей почвой было обусловлено отсутствием чёткой границы фронта промерзания. Предполагалось, что значение диэлектрической проницаемости в пределах переходного слоя линейно увеличивается с глубиной от значений, соответствующих мёрзлой, к значениям, соответствующим талой почве.

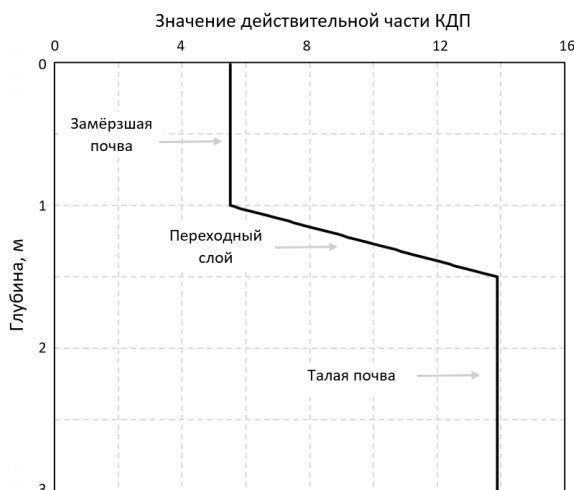
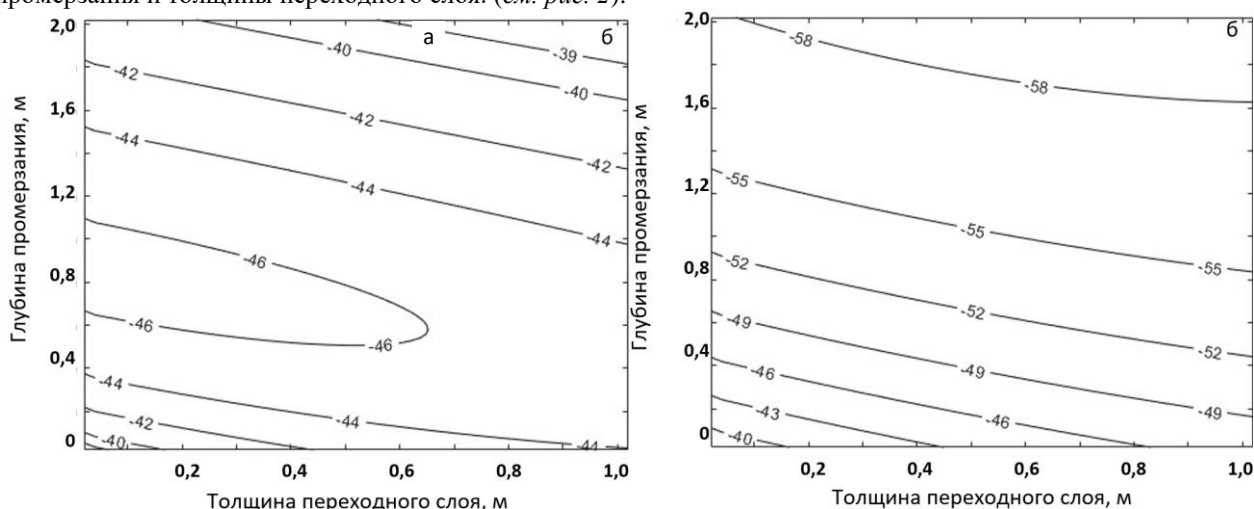


рис.1 Характерный вид профиля диэлектрической проницаемости промерзающей почвы

В начале процесса моделирования мы разбивали толщу почвы на отдельные плоско-параллельные слои с постоянным в пределах слоя значением КДП. В дальнейшем итерационно применялось выражение, позволяющее рассчитать поверхностный импеданс двухслойной среды [4]. Расчёт производился для значений глубины промерзания в диапазоне от 0 до 2 метров, и переходного слоя от 0 до 1 метра. Анализ полученных результатов показал, что наибольшие вариации значений поверхностного импеданса в процессе промерзания наблюдаются для песчаной почвы.

Поскольку значения действительной и мнимой части КДП суглинистой почвы в талом и мёрзлом состоянии были значительно больше единицы, то и изменения поверхностного импеданса при увеличении глубины промерзания были невелики. При этом значения фазы поверхностного импеданса суглинка принимает промежуточное значение между сильно и слабо индуктивной структурой при всех значениях глубины промерзания и толщины переходного слоя. (см. рис. 2).

*рис.2 Значения поверхностного импеданса*

Значения КДП песчаной почвы отличаются более низкими значениями по сравнению с суглинистой как в талом, так и в мёрзлом состояниях. По этой причине слой замёрзшей песчаной почвы оказывает «просветляющее» действие (в терминах оптики, описывающих интерференцию в двухслойной среде) для электромагнитных волн, что проявляется в уменьшении фазы поверхностного импеданса и его смещению в сильно индуктивную область. При этом, увеличение толщины переходного слоя так же приводит в дополнительному падению фазы поверхностного импеданса.

Результаты, полученные в ходе вычислений, свидетельствуют о необходимости учёта наличия промёрзшего слоя почв при прогнозировании распространения земной волны в дециметровом диапазоне волн над определёнными типами подстилающей поверхности. Полученные результаты могут найти применение при решении прикладных задач электродинамики и радиосвязи. Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Список публикаций:

- [1] B. Van der Pol and Niessen K.F. The Propagation of Electromagnetic Waves over a Plane Earth // *Ann. Phys.* Vol. 6, 1930, P.273-294.
- [2] Фок В. А. Проблемы дифракции и распространения радиоволн. - М: Сов. Радио, 1970, 517 с.
- [3] Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. - М: изд-во Наука. Физматлит, 1999. - 496 с.
- [4] Макаров Г. И., Новиков В. В., Рыбачек С. Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. - М., 1991. 196 с.
- [5] Mahmoud S. F. and Antar Y. M. M. High frequency ground wave propagation // *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 11, pp. 5841-5846, Nov. 2014.
- [6] Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г., Буянова Д.Г., Нагулаева И.Б., Аюров Д.Б. Поверхностные электромагнитные волны на трассах северного морского пути // *Техника радиосвязи*. 2019. № 1 (40). С. 7-18.
- [7] Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Хаптанов В.Б. Поверхностная электромагнитная волна над сильноиндуктивной средой лёд-солёная вода // *Известия вузов. Радиофизика*. 2021. Т. 64. № 8-9. С. 611-615.



Российский производитель
измерительной техники

НОВЫЙ векторный анализатор цепей серии «Компакт-М»

K201
K203
K204
K206
K209

Компактный. Доступный. Функциональный.

Диапазон рабочих частот: от 9 кГц до 1,5 / 3 / 4,5 / 6,5 / 9 ГГц

Динамический диапазон измерений: 137 / 135 дБ

Диапазон регулирования выходной мощности: от -55 до +5 дБм

До 16 логических независимых измерительных каналов

Время измерения: 24 мкс

**Предоставим демо прибор
по вашему запросу**



planarchel.ru

8 800 222 12 11

НОВЫЙ векторный анализатор цепей серии «Кобальт-М»

CM222
CM422
CM244
CM444

Точный. Быстрый. Универсальный.

Диапазон рабочих частот: от 10 МГц до 22/44 ГГц

Время измерения: 10 мкс на точку

Два независимых источника сигнала

Прямой доступ к приемникам

Опция измерений в импульсном режиме



planarchel.ru

8 800 222 12 11



РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СВЧ, КВЧ И ГВЧ

АПР 2025
16-18 сентября 2025
Томск, Россия

Поляризационная терагерцовая дефектоскопия анизотропных материалов

Кателина Дарья Сергеевна,

Бадьин Александр Владимирович, Пидотова Диана Андреевна, Дорожкин Кирилл Валерьевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: daryakatelina@gmail.com

Современные методы неразрушающего контроля (НК) позволяют осуществлять диагностику материала без нарушения его структурной целостности. НК широко используется во многих областях промышленности, включая оптимизацию производственных процессов, контроль качества выпускаемых изделий и конструкций [1], которые в ряде случаев обладают анизотропией электромагнитных свойств. Среди множества методов НК анизотропных материалов (визуальный осмотр, ультразвуковая дефектоскопия, инфракрасная термография и рентгеновский контроль) [2], особый интерес представляют бесконтактные радиоволновые методы НК с использованием поляризованного терагерцового (ТГц) излучения, обладающего способностью проникать сквозь оптически непрозрачные материалы [3].

В работе представлены результаты разработки и применения методов терагерцовой поляриметрии для анализа анизотропных материалов [4]. Первый метод основан на измерении угловой зависимости амплитуды прошедшего либо отраженного через образец поляризованного ТГц излучения. Проверка метода осуществлялась с использованием квазиоптического спектрометра с временным разрешением и ЛОВ-спектрометра, включающего монохроматический источник (лампа обратной волны), систему линз, модулятор и детектор (ячейка Голея). Исследуемый объект помещался в центр линзовой системы в механизированном держателе, с помощью которого проводилось автоматическое вращение образца с заданным шагом. Второй метод позволяет регистрировать матрицы распределения прошедшего излучения при двух взаимно ортогональных линейных поляризациях. Для реализации второго метода была собрана двухкоординатная система позиционирования на основе линейных трансляторов с программным управлением, которая располагалась также в центре линзовой системы квазиоптического тракта.

Объектами исследования были выбраны проволочные поляризаторы (ПП) с периодом решетки 30-100 мкм, шлиф горной породы и специально созданная методом аддитивного производства подложка толщиной 400 мкм с нанесенными полосами шириной 0,45 мм, длиной 16 мм и высотой 400 мкм, расстояние между которыми изменялось от 200 до 900 мкм.

Экспериментально установлено, что ПП демонстрируют выраженную частотную зависимость коэффициента отражения при ортогональной поляризации падающего излучения (направление вектора E перпендикулярно ориентации проводников). Максимальное значение коэффициента отражения 0,9 отн. ед. наблюдается на частоте 100 ГГц, при этом с ростом частоты до 1500 ГГц происходит снижение до 0,44 отн. ед. В исследуемом диапазоне коэффициент анизотропии снижается с 20 до 10 отн. ед. Исследование плоскопараллельного образца горной породы показало наличие анизотропных минералов, коэффициент анизотропии составил 1,02 – 1,07 отн. ед. Вторым методом на частоте 208 ГГц были измерены распределения коэффициента прохождения для массива поляризаторов, изготовленных 3D-печатью. Установлено, что периодичность нанесенной решетки напрямую влияет на коэффициент анизотропии. Полученный результат подтверждает, что бытовые двухэкструдерные 3D принтеры могут быть использованы для изготовления поляризаторов [5] квазиоптических ТГц трактов.

Измерения выполнены на оборудовании ЦКП “Центр радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов” Национального исследовательского Томского государственного университета.

Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-20174, <https://rscf.ru/project/25-29-20174/> и средств Администрации Томской области.

Список публикаций:

- [1] Budzik G., Woźniak J., Paszkiewicz A., Przeszlowski Ł., Dziubek T., Dębski M. Methodology for the quality control process of additive manufacturing products made of polymer materials // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 9. P. 2202.
- [2] Wang J., Zhang J., Chang T., Cui H. L. A comparative study of non-destructive evaluation of glass fiber reinforced polymer composites using terahertz, x-ray, and ultrasound imaging // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. Vol. 20. P. 963-972.
- [3] Nsengiyumva W., Zhong S., Zheng L., Liang W., Wang B., et al. Sensing and nondestructive testing applications of terahertz spectroscopy and imaging systems: State-of-the-art and state-of-the-practice // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. P. 1-83.
- [4] Berdugin A. I., Vigovskiy V. U., Badin A. V., Kuleshov G. E. Anisotropic materials based on magnetic microwires in EHF range // *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 743. P. 81-85.
- [5] Nieradka A., Kaluza M., Rudyk H., Komorowski P., Siemion A. 3D printed polarisers for THz spectral range // In *25th International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, IEEE. 2024. P. 238-240.

Электрофизические характеристики композитов на основе акриловой краски и углеродных нанотрубокКеда Инна Сергеевна¹Доценко Ольга Александровна,^{1,2}¹Томский государственный университет²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*E-mail: kedainna@mail.ru*

В настоящее время радиотехнические системы функционируют в расширенном спектре частот, что приводит к увеличению общего уровня электромагнитного фона в закрытых пространствах. Примерами могут служить системы сотовой связи (диапазон 900 МГц – 1200 МГц) и беспроводные сети WiFi (около 300 МГц) [1, 2]. Это требует разработки эффективных методов снижения уровня электромагнитного излучения. Существующие подходы включают экранирование излучающих элементов и ограничения на параметры работы устройств. Безэховые камеры представляют собой перспективное решение, однако традиционные конструкции на основе угольных отражателей отличаются большими размерами, а использование ферритовых поглотителей значительно увеличивает стоимость. В связи с этим, актуальным является поиск новых материалов. В работах [3, 4] исследуются разные типы нанотрубок для изготовления поглощающих материалов.

Углеродные нанотрубки (УНТ) обладают уникальными электрофизическими, механическими, термическими и оптическими свойствами [5-7], что представляет фундаментальный интерес и открывает ряд возможностей для прикладных применений. УНТ могут быть использованы в качестве зондов сканирующей микроскопии, чувствительных элементов различных датчиков, проводящих каналов транзисторов и наполнителей композиционных материалов [8]. Наибольший интерес представляет исследование свойств композиционных материалов с включениями УНТ для создания широкополосных поглощающих покрытий, что связано с возможностью модификации электрических характеристик путем внешнего воздействия различного рода. В качестве такого воздействия может быть использован ультразвук, ультрафиолетовое излучение, давление, электрическое и магнитное поля [9]. В ряде работ [9,10] показано, что наибольшее влияние на электрические свойства оказывает ультразвуковая обработка.

В данной работе исследованы и подробно описаны электрофизические свойства композиционных материалов различного состава с включениями УНТ в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц.

В качестве наполнителя для композитных материалов использовались УНТ, полученные методом каталитического газофазного осаждения этилена в присутствии катализатора FeCo/Al₂O₃ (Институт катализа СО РАН, г. Новосибирск). Нанотрубки имеют средний диаметр 9,4 нм, длину более 15 мкм, чистоту более 97,5%. В качестве дисперсионной среды использовалась акриловая краска (ООО «НПП «Рогнеда», ст. Купавна, Московская область). Были изготовлены композиты с концентрацией МУНТ 0,5 масс. %.

Для изготовления образцов подготавливаются компоненты, взвешиваются на аналитических весах SHIMADZU AUX320 с максимальной массой 320 г и минимальной 10 мг (с точностью до 4 знака после запятой). Образцы помещаются в стеклянную емкость и смешиваются механическим способом, а затем подвергаются ультразвуковой обработке для удаления воздушных включений, разрушения агломератов и равномерного диспергирования наполнителя по объему. Обработка проводилась ультразвуком мощностью 40 Вт на ультразвуковом аппарате Алена УЗТА0.1\28-О. В данном аппарате используется ультразвуковой излучатель погружного типа.

Время обработки ультразвуком составило от 0 до 5 минут. После обработки полученная смесь наносилась на поверхность. Далее слой высыхал «до отлипания» и наносился последующий слой. Действия повторялись до достижения необходимой толщины.

Частотные зависимости действительной (рис. 1) и мнимой (рис. 2) частей диэлектрической проницаемости при пяти временных режимах обработки ультразвуком показывают, что мнимая часть диэлектрической проницаемости всех образцов больше действительной части. Такое поведение указывает на наличие сквозной проводимости на переменном токе в рассматриваемой области частот у всех исследуемых образцов.

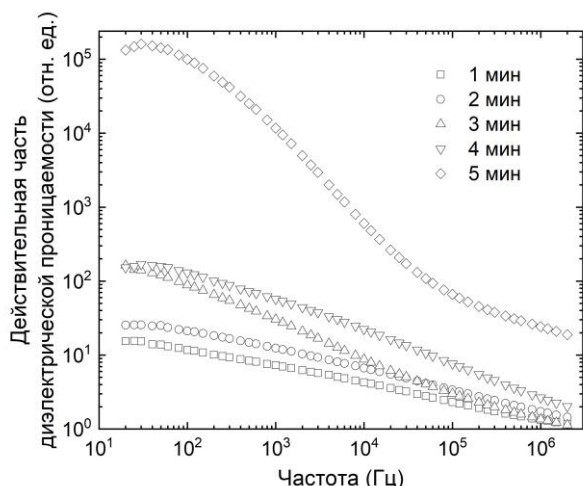


рис. 1. Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости от частоты

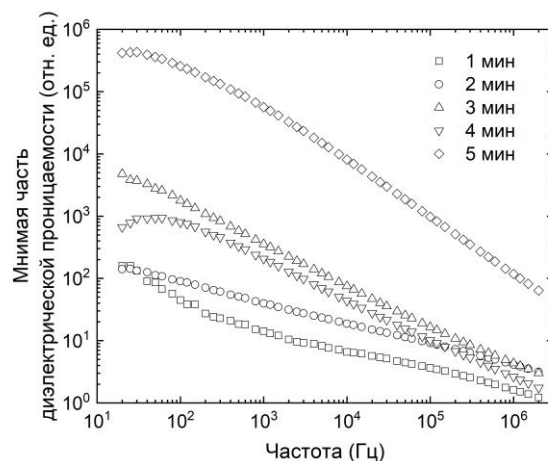


рис. 2. Зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости от частоты

Результаты исследования демонстрируют монотонное убывание комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) с увеличением частоты, что указывает на наличие релаксационной дисперсии в исследуемых композиционных материалах. Наблюдаемый максимум КДП при времени ультразвуковой обработки в 5 минут свидетельствует о значительной перестройке внутренней структуры материала под воздействием ультразвука.

В результате проведенного исследования были получены и проанализированы частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости композиционных материалов с включениями многослойных углеродных нанотрубок при разном времени обработки ультразвуком и одинаковой мощности. При ультразвуковой обработке менее 3 мин. влияние включения многослойных углеродных нанотрубок в состав смеси минимально, а оптимальным временем обработки является 5 мин.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 24-79-00048

Список публикаций:

- [1] Мурадян В. Е., Соколов Е. А., Пивень Н. П. // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – № 23. – С. 106–110.
- [2] Милейко С.Т. // Композиты и наноструктуры. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 12–26.
- [3] Суслиев В.И., Найденов Е.П., Коровин Е.Ю. // Пат. 2 382 804 РФ, МПК С 09 D 5/32. – № 2008142320.
- [4] Wu J., Kong L. // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. N 24. P. 4956–4958.
- [5] Елецкий А.В. // Успехи физических наук. – 1997. – № 167. – С. 945–972.
- [6] Кулешов Г.Е., Суслиев В.И. // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 1. – С. 84–87.
- [7] Salvat J.P., Bonar J.M., Tomson N.H. et al. // Nature. – 1996. – № 381. – С. 678.
- [8] Поливанова А.С., Доценко О.А. // Актуальные проблемы радиофизики. – 2019. С. 185–186.
- [9] Червинская А.С. // Труды материалов Четвертого Российско-Белорусского семинара «Углеродные наноструктуры и их электромагнитные свойства». – 2019. – С. 29–32.
- [10] Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д., Ткачев А.Г. и др. // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, № 3. – С. 475–483.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 24-79-00048

Исследование диэлектрических свойств углеродного волокна квазиоптическим резонаторным методом в СВЧ диапазоне

Комарова Анастасия Александровна

Дорофеев Игорь Олегович, Дунаевский Григорий Ефимович, Кателина Дарья Сергеевна,

Томилов Иван Михайлович

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: nastya_komarova_04@bk.ru

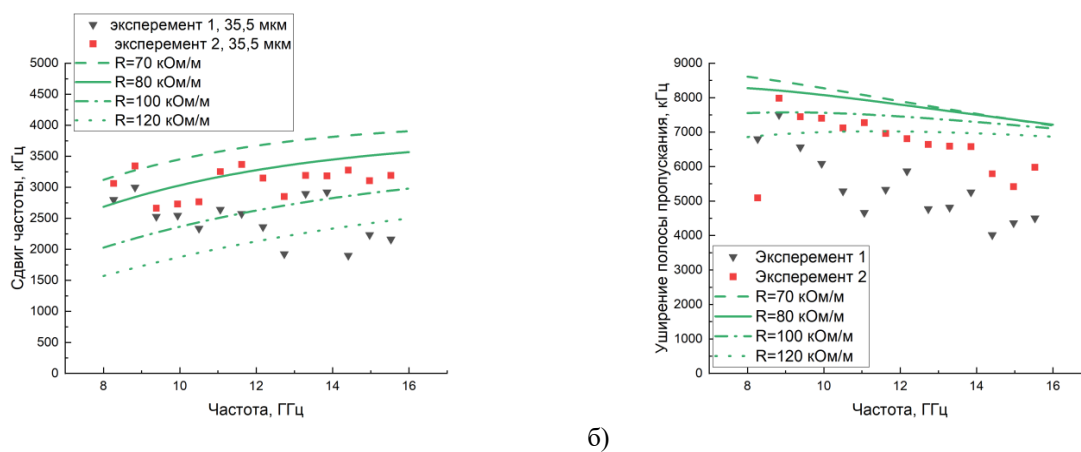
Углеродные материалы и структуры в СВЧ диапазоне обладают заметным поглощением электромагнитных волн. Поэтому они достаточно часто используются при создании композиционных материалов, которые служат для создания различных экранов и покрытий.

Одним из таких материалов является углеродное волокно марки А-49 12К (Акса, Турция), полученное из полиакрилонитрильного прекурсора. Производитель заявляет механические свойства волокон, такие как модуль упругости 250 ГПа, предел прочности 4900 МПа. Данное волокно используется в различных отраслях промышленности, серийно производится, и имеет низкую стоимость. Однако электромагнитные характеристики данного волокна неизвестны.

Из аналогичных структур можно отметить литой остеклованный микропровод, который при слабом скин-эффекте также хорошо поглощает электромагнитную энергию на сверхвысоких частотах, однако при сходных значениях диаметра проигрывает данным углеродным нитям по весовым характеристикам.

Поэтому целесообразно провести оценки проводимости такого углеродного волокна в СВЧ диапазоне. Для исследования микропровода с успехом применялся метод открытого квазиоптического резонатора [1,2]. Следуя данной методике, был выбран открытый резонатор для работы в диапазоне 8 – 16 ГГц со следующими геометрическими характеристиками. Два сферических отражателя диаметром 26 см, радиусом кривизны 40 см, расположенными на расстоянии 53,4 см друг от друга. Для измерения параметров открытого резонатора использовался векторный анализатор цепей Agilent 8363В. В резонаторе возбуждались 14 основных типов колебаний с нечетным значением продольного индекса. При этом в центре, где размещался образец, наблюдалась пучность электрического поля, вдоль вектора которого ориентировалось углеродное волокно.

Внесение в резонатор волокна приводит к смещению резонансной частоты и уширению полосы пропускания соответствующей моды. При заданном диаметре волокна значения этих параметров определяются проводимостью его материала. Частотные зависимости измеренных значений сдвигов резонансной частоты и уширений полос пропускания для образца диаметром 35,5 мкм приведены на рис. 1.



а)

б)

Рис.1 Графики зависимостей (а) сдвига частоты и (б) уширения полосы пропускания открытого резонатора от частоты для образца углеродного волокна диаметром 35,5 мкм.

Существует математическая модель открытого резонатора с тонким проводящим цилиндром [2]. По результатам расчетов на графиках показаны теоретические зависимости сдвигов и уширений для проводников с погонным сопротивлением на постоянном токе от 70 кОм/м до 120 кОм/м. Это позволяет провести оценку погонного сопротивления углеродного волокна, которое составляет величину от 80 до 100 кОм/м.

Список публикаций:

[1] Завьялов А.С., Дунаевский Г.Е. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах : учеб. пособие. Томск : Томский государственный университет, 1985 214 с.

[2] Дорофеев И. О. и др. Двухслойный тонкий цилиндр в открытом СВЧ-резонаторе. – 2013.

Корреляционная связь хаотических и порождающих синхронных колебаний системы связанных автогенераторов

Костерова Влада Сергеевна

Новиков Сергей Сергеевич

Томский государственный университет

E-mail: vsk727@yandex.ru, nss@mail.tsu.ru

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], области изменения переменных физически реальных динамических систем обладают свойством финитности, то есть фазовые траектории, независимо от начальных условий, не могут выходить за пределы указанных областей. Еще одно важное свойство динамических систем, определяющее виды и характеристики движения, связано с понятием устойчивости фазовых траекторий. Неустойчивость всех возможных траекторий приводит к их расхождению и перемешиванию – движение становится непредсказуемым, что формирует динамический хаос.

Из общих соображений ясно, что интенсивность расхождения фазовых траекторий зависит от степени их неустойчивости, которая определяется вполне конкретными физическими параметрами динамических систем – управляющими параметрами. В то же время, необходимо принимать во внимание, что список этих параметров может быть достаточно велик, а степени неустойчивости на локальных временных отрезках отдельных траекторий могут значительно варьироваться. При переходе к режиму динамического хаоса это порождает большое разнообразие форм движений и их статистических характеристик.

Указанная особенность характерна для систем со многими колебательными степенями свободы, в которых хаотический аттрактор формируется в результате потери устойчивости всеми базовыми когерентными движениями. Исходными образами этих базовых типов колебаний (мод) в фазовом пространстве являются предельные циклы, отличающиеся частотами и амплитудно-фазовым профилем-формой. По мере разрушения когерентности периодические движения становятся неустойчивыми, их форма и периодичность утрачиваются. Однако переход в режим динамического хаоса не отменяет свойств детерминизма, поэтому в динамике системы должны сохраняться признаки базовых движений. В данной работе исследуются корреляционные связи элементов хаотических колебаний с порождающими их синхронными типами колебаний в системе связанных автогенераторов.

2. СИСТЕМА ДВУХ СВЯЗАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

В данной работе путем модельного эксперимента исследовалась система двух транзисторных автогенераторов (рис.1), в которой может быть получен режим хаотических колебаний [2, 3]. Численные исследования выполнены с помощью программы Multisim. Автогенераторы собраны по схеме емкостной трёхточки. Резонансные частоты автогенераторов задаются резонансными контурами $L_1(L_2)$, $C_1(C_3)$, $C_2(C_4)$. Эмиттерные сопротивления R_e обеспечивают отрицательную обратную связь; их изменение позволяет регулировать напряженность режимов активных элементов. Цепь взаимной связи представляет собой последовательный резонансный контур C, L, r с симметричным включением общей нагрузки R_H . Резонансная частота цепи связи совпадает или близка к частотам автогенераторов; изменение r позволяет регулировать добротность цепи связи и управлять условиями разрушения когерентности.

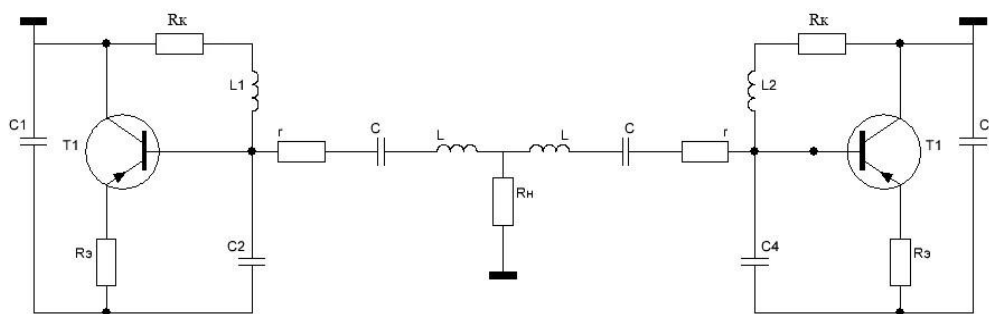


рис.1. Схема системы связанных автогенераторов с резонансной связью

Представленная на (рис.1) схема имеет три степени свободы. В этой схеме могут существовать три устойчивых синхронных типа колебаний (моды), отличающихся формой и частотами. Основным типом является синфазный режим, при котором колебания генераторов суммируются в общей нагрузке. Два других режима вырождены и характеризуются противофазностью колебаний; их частоты (f_n и f_b) расположены ниже и выше частоты синфазной моды f_0 .

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Итак, режим хаотических колебаний реализуется при условии одновременной неустойчивости перечисленных синхронных мод, т.е. путем разрушения когерентности [4]. Эти условия достаточно подробно обсуждались в ряде работ авторов [2, 3], кратко остановимся на них. Полная схема исследуемой системы обладает большим числом параметров, изменение которых в той или иной степени влияет на временные и спектральные характеристики динамического хаоса. Однако существует возможность выделить такие параметры, которые

воздействуют непосредственно на динамику хаотических колебаний в областях порождающих движений. В хаотическом спектре эти колебания представлены размытыми спектральными максимумами, локализованными вблизи частот собственных мод.

Как уже было сказано, основной синхронной модой является синфазная мода. Неустойчивость синфазного режима достигается при резонансной настройке цепи связи L , C , r и при условии сильных резонансных свойств [5]; последние регулируются путем изменения сопротивления r . При подавлении устойчивости только синфазной моды система обязательно переходит в режим генерации одной из противофазных мод (при условии их устойчивости). Противофазные моды теряют устойчивость при сильных перенапряженных режимах работы активных элементов-транзисторов [2, 3]. Управление напряженностью режимов осуществляется регулировкой усиления транзисторов путем изменения сопротивлений отрицательной обратной связи R_k .

Еще один эффективный способ управления хаотической динамикой реализуется путем введения диссипативных потерь в индуктивные ветви резонансных систем автогенераторов. Так, увеличение сопротивлений R_k за счет большего их включения в резонансную систему оказывает более сильное разрушающее действие на нижнюю противофазную моду. при этом хаотический спектр верхней противофазной моды имеет существенно большую интенсивность (рис.2а). Уменьшение R_k , наоборот, полностью разрушает верхнюю противофазную моду; при этом значительно возрастает интенсивность хаотического спектра нижней противофазной моды (рис.2б). Следует полагать, что интенсивность спектральных элементов хаотических мод отражает их корреляционную связь с порождающими синхронными типами колебаний.

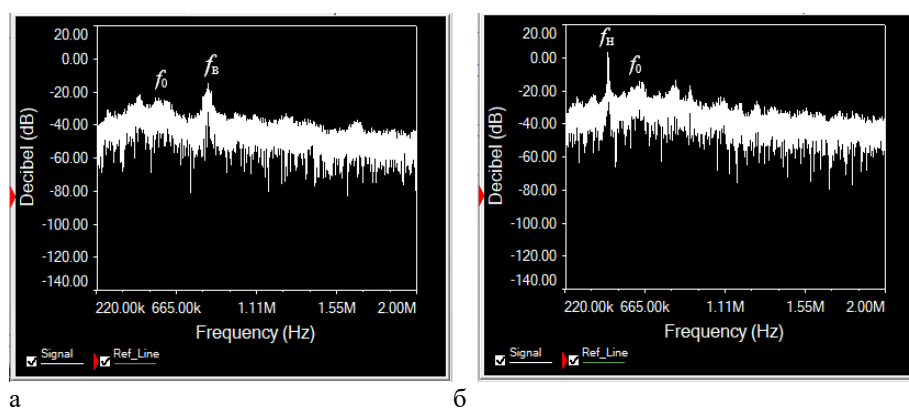


рис.2. Спектры колебаний в режиме динамического хаоса для а) $R_k=4,53$ Ом. б) $R_k=0,01$ Ом;

Определение корреляционных связей (коэффициентов корреляции) проводится на примере нижней противофазной моды следующим образом. Первоначально выбирается фрагмент осциллограммы периодической нижней противофазной моды; длительность выборки 280 точек. Затем методом корреляционного поиска [6] находится число подобных фрагментов в полной хаотической реализации; длительность реализации составляет 250 тысяч точек. Относительное значение суммарной длительности этих фрагментов, то есть коэффициент корреляции, описывает статистическую связь элементов хаотических траекторий с порождающими их синхронными типами колебаний. На (рис.3) приведена зависимость коэффициента корреляции K для нижней противофазной моды при изменении сопротивлений R_k в пределах 0.01-4.62 Ом. Действительно, по мере разрушения данной моды корреляционная связь становится слабее на порядок. Аналогичная статистика может быть получена также для верхней противофазной моды.

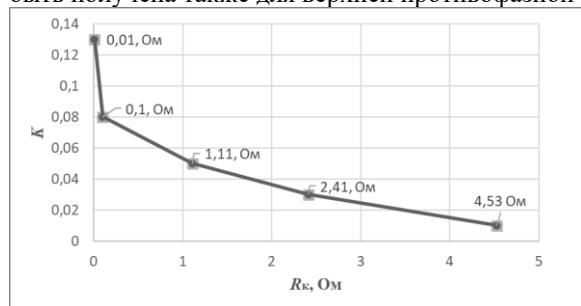


рис.3. График зависимости коэффициента корреляции K от сопротивления контуров автогенераторов R_k

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования однозначно указывают на существование в системе связанных автогенераторов корреляционных связей элементов хаотических колебаний с порождающими их синхронными типами колебаний. По мере разрушения когерентности эти связи ослабевают, и интенсивность возвратов к исходной периодической динамике резко падает. Полученные результаты демонстрируют возможности управления спектрально-временными характеристиками хаотических колебаний в системе связанных автогенераторов.

Список публикаций:

- [1] Карлов Н. В., Кириченко Н. А. Колебания, волны, структуры. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 496 с. - ISBN 5-9221-0205-2.
- [2] Новиков С. С., Костерова В. С. Устойчивые и неустойчивые динамические процессы в автоколебательной системе с тремя степенями свободы // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 2. С. 218—235. [3] Костерова, В. С, Новиков С. С., Верификация условий перехода системы связанных автогенераторов в режим динамического хаоса // Техника радиосвязи. – 2022. – № 4(55). – С. 108-117. – EDN FZUYGI.
- [4] Новиков С. С., Усюкевич А. А. Разрушение когерентного режима в системе двух автогенераторов при сильных резонансных взаимных связях // Известия вузов. ПНД. 2012. №5.
- [5] Новиков С. С., Усюкевич А. А. Неустойчивость синхронных режимов в системе двух связанных СВЧ - автогенераторов, // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 11. С. 51 – 56.
- [6] Гельгор А.Л. Общая теория связи. Проверка статистических гипотез. Оценивание параметров. Оптимальный приём сигналов : учеб. пособие / А.Л. Гельгор, А.И. Горлов, Е.А. Попов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 227 с.

Разрушение когерентности колебаний в системе связанных автогенераторов

Костерова Влада Сергеевна

Новиков Сергей Сергеевич

Морозов Егор Сергеевич

Томский государственный университет

E-mail: vsk727@yandex.ru, nss@mail.tsu.ru

Системы связанных автогенераторов могут работать не только в когерентном режиме, но и в хаотическом режиме [1, 2]. В последнем случае хаотическая динамика реализуется за счет неустойчивости всех возможных когерентных типов колебаний; данный эффект называется разрушением когерентности [1].

Целью настоящего сообщения является сопоставление результатов математического моделирования хаотической динамики и реального эксперимента для системы двух связанных автогенераторов.

На (рис. 1) приведена высокочастотная часть исследуемой схемы. Два транзисторных автогенератора собраны по трёхточечной схеме. Как в модельном, так и в реальном эксперименте использовались транзисторы типа 2N2222A. Генераторы идентичны и в автономном режиме генерируют стабильные одночастотные колебания на частоте вблизи $f_0=840$ кГц. Цепь связи автогенераторов представляет собой последовательный резонансный колебательный контур, r, L, C с общей нагрузкой R_H , настраиваемый на ту же частоту. Достаточно подробное описание роли элементов схемы приведено в сообщении, представленном на настоящей конференции «Корреляционная связь хаотических и порождающих синхронных колебаний».

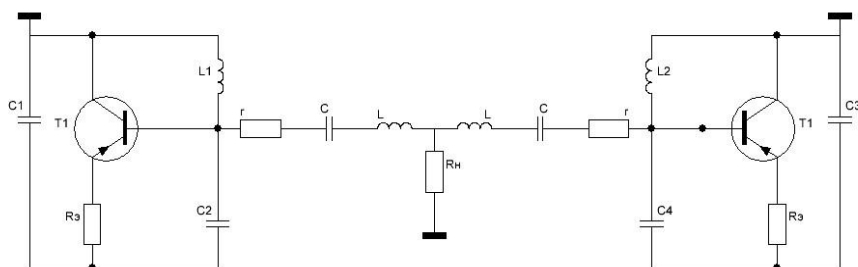


рис.1. Схема системы связанных автогенераторов с резонансной связью

Представленная схема подробно исследовалась в численном эксперименте в среде NI Multisim. Эти исследования показывают, что в системе могут существовать три синхронных типов колебаний-мод: синфазная мода и две вырожденные – противофазные моды; расчетные значения частот противофазных мод лежат ниже ($f_n=560$ кГц) и выше ($f_v=1300$ кГц) частоты синфазной моды ($f_0=840$ кГц). Условие неустойчивости синфазной моды (необходимое условие) реализуется при сильных резонансных свойствах связи [3]. При выполнении только этого условия система переходит в один из противофазных режимов. Достаточное условие разрушения реализуется при перенапряженном режиме работы активных элементов-транзисторов [2, 4]. Эффективная регулировка напряженностью режима осуществляется путем изменения сопротивлений токовой отрицательной обратной связи R_3 . Ширина спектра хаотической динамики определяется расстановкой модовых частот.

На рис.2 приведены спектры генерации синхронных мод в реальном эксперименте при соответствующих настройках сопротивлений резисторов R_3, r . Частота генерации синфазной моды (рис.2а) практически равна f_0 ; уровень второй гармоники примерно на 15 дБ ниже. Частота генерации верхней противофазной моды (рис.2б) несколько отличается от расчетной ($f_v=1117$ кГц). Частота нижней противофазной моды (ее спектр не показан) равна $f_n=540$ кГц.

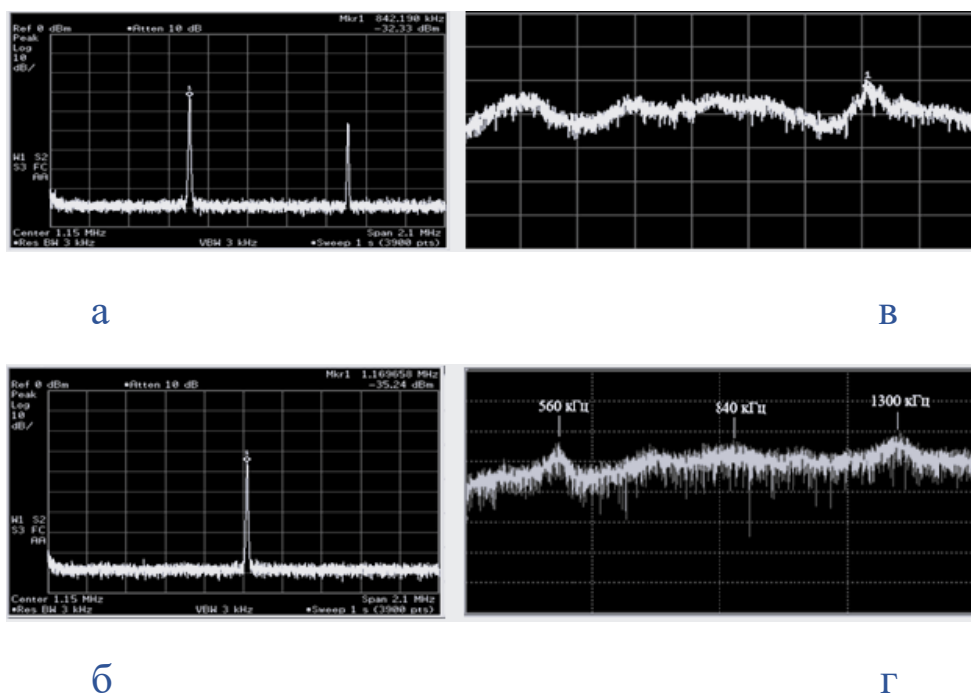


рис.2 Спектры колебаний автогенераторов в синхронных режимах:

а -синфазном; б – противофазном; в и г в режиме динамического хаоса: в – эксперимент, г – численное моделирование.

На (рис.2в) показан типичный спектр, генерируемый системой в режиме динамического хаоса. На (рис.2г) для сравнения приведен спектр, полученный в численном эксперименте в среде Multisim для той же схемы и аналогичных параметров; цифровые значения частот отражают расстановку частот синхронных мод. Полоса обзора анализаторов спектра выбрана одинаковой и составляет 0,35 – 1,5 МГц. Можно отметить хорошее качественное сходство спектров. Во всей полосе спектр имеет непрерывный характер. Синфазная (базовая) мода полностью разрушена, в окрестности ее частоты спектр имеет наиболее равномерный профиль. Пологие спектральные максимумы, соответствующие двум противофазным модам, сильно размыты, что говорит также о высокой степени их подавления. Некоторое различие характеристик может быть вызвано отклонением параметров транзисторов и разбросом параметров элементов экспериментального прототипа.

Наглядную иллюстрацию перестройки динамики системы от когерентных колебаний к хаотическим дает построение фазовых портретов при различных начальных условиях. В пакете Multisim такая возможность реализуется путем подачи униполярных или разнополярных ступенчатых напряжений на базы транзисторов. Фазовые портреты на (рис.3) построены в плоскости напряжений на контурах автогенераторов (u_1, u_2). Фазовые портреты на (рис.3а, 3б) соответствуют описанному варианту хаотической динамики. При синфазном возбуждении генераторов их колебания в течении первых 10-15 периодов происходят почти в фазе (рис.3а): фазовые траектории ориентированы вдоль линии $u_1=u_2$. Затем, в силу неустойчивости траектории перемешиваются и плотно заполняют сечение хаотического аттрактора (рис.3б). Фазовые портреты на (рис.3в, 3г) соответствуют настройке, когда неустойчивые синфазные траектории переходят в устойчивый противофазный предельный цикл.

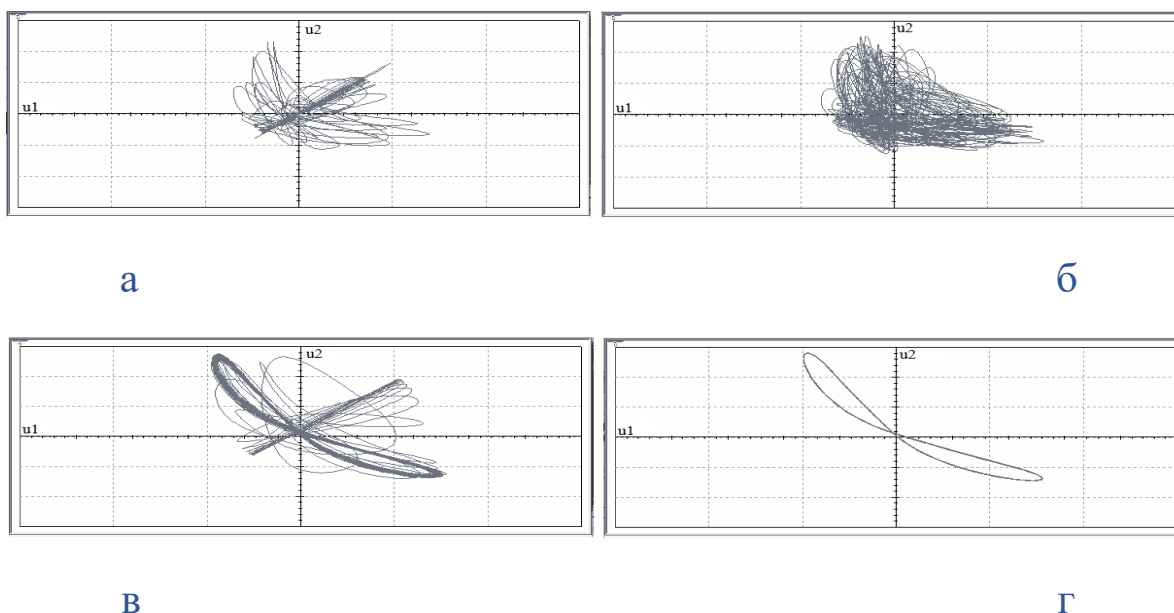


рис.3 Фазовые портреты системы двух автогенераторов в хаотическом (а, б) и когерентном (в, г) режимах

Проведенные численные и экспериментальные исследования показывают, что система двух связанных автогенераторов может служить источником шумовых колебаний с шириной спектра в несколько октав.

Список публикаций:

- [1] Новиков С. С., Усюкевич А. А. Разрушение когерентного режима в системе двух автогенераторов при сильных резонансных взаимных связях // Известия вузов. ПНД. 2012. №5.
- [2] Костерова, В. С, Новиков С. С., Верификация условий перехода системы связанных автогенераторов в режим динамического хаоса // Техника радиосвязи. – 2022. – № 4(55). – С. 108-117. – EDN FZUYGI.
- [3] Новиков С. С., Усюкевич А. А. Неустойчивость синхронных режимов в системе двух связанных СВЧ - автогенераторов, // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 11. С. 51 – 56.
- [4] Новиков С. С., Костерова В. С. Устойчивые и неустойчивые динамические процессы в автоколебательной системе с тремя степенями свободы // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 2. С. 218—235.

Проектирование и анализ параметров балансного смесителя частоты диапазона 75–110 ГГц

Билинский Кирилл Владимирович, Емельянов Евгений Витальевич, Бурмистрова Виктория Андреевна, Ланг Кристина Сергеевна

Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов

E-mail: bilinskiy_kv@niipp.ru, emelyanov_ev@niipp.ru, burmistrova_va@niipp.ru, lang_ks@niipp.ru

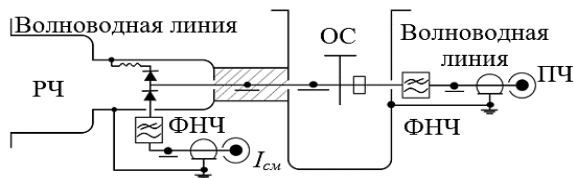
Развитие современных систем радиосвязи и радиолокации в миллиметровом диапазоне неразрывно связано с созданием устройств, позволяющих осуществить перенос частоты информационной составляющей радиосигнала из КВЧ-диапазона в область низких промежуточных частот (ПЧ), что упрощает обработку информационного сигнала и его последующее использование. Одним из таких преобразователей частоты является балансный смеситель, отличающийся малыми потерями преобразования и низким коэффициентом шума. В данной работе представлены результаты разработки балансного смесителя частоты диапазона 75–110 ГГц с нелинейным элементом (НЭ) в виде сборки диодов с барьером Шоттки (ДБШ).

Балансный смеситель имеет два волноводных входа (сечением $2,4 \times 1,2$ мм) для подачи радиосигнала (РЧ) и сигнала гетеродина (ОС) и два коаксиальных вывода для снятия промежуточной частоты и подачи тока смещения на нелинейный элемент (рис. 1 а). Микрополосковая часть конструкции выполнена на основе гибридной интегральной схемы (ГИС) и включает в себя микрополосково-волноводный переход (МВП) и два фильтра нижних частот (ФНЧ). Один из ФНЧ обеспечивает развязку сигналов ОС и ПЧ, другой – изоляцию цепи смещения нелинейного элемента от сигналов РЧ и ОС. Микрополосковая подложка расположена посередине широкой стенки радиосигнального и гетеродинного волноводов в центре E -плоскости. Нелинейный элемент (диодная сборка), на котором происходит сложение (вычитание) частот РЧ и ОС, смонтирован на ГИС так, чтобы он находился в пучности электромагнитного поля стоячей волны радиосигнала. Диодная сборка представляет собой два последовательно соединенных ДБШ со средним выводом.

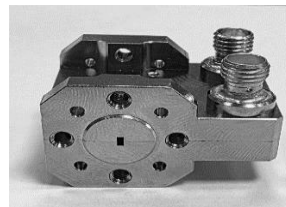
Электродинамический анализ смесителя заключался в расчете микрополосково-волноводного перехода и ФНЧ. Нелинейный элемент заменялся расчетной моделью, состоящей из полноразмерной модели НЭ, в которой каждый контакт металл-полупроводник заменен эквивалентной схемой ДБШ с эквивалентными параметрами, соответствующими рабочему режиму. Анализ ФНЧ показал, что коэффициент передачи в полосе высокочастотного сигнала (75–110 ГГц) составляет менее –60 дБ, а коэффициент отражения в полосе ПЧ (0–20 ГГц) – менее –20 дБ. Возвратные потери по волноводным входам РЧ и ОС (75–110 ГГц) не превышают 10 дБ и 20 дБ соответственно. Развязка между волноводными линиями ОС и РЧ составляет более 25 дБ. Результаты нелинейного анализа показали, что расчетные значения потерь преобразования на ПЧ равной 1 ГГц лежат в пределах 8 дБ.

Измерение электрических параметров, а именно потерь преобразования, коэффициента шума, возвратных потерь и развязок, было осуществлено в соответствии со стандартными методами измерений на современном измерительном оборудовании. Из результатов эксперимента следует: потери преобразования разработанного смесителя ($P_{ОС} = 3$ дБм, $P_{РЧ} = -20$ дБм, $I_{см} = 1,2$ мА) в РЧ-полосе 75–110 ГГц на ПЧ $f_{ПЧ} = 1$ ГГц составляют $6,8 \pm 1,7$ дБ, в диапазоне ПЧ 0,01–15 ГГц менее 10 дБ. Коэффициент шума в полосе РЧ составляет $8,2 \pm 1,8$ дБ, а в диапазоне ПЧ ($f_{ОС} = 90$ ГГц) – $8,5 \pm 3,5$ дБ, причем на частотах 2–7 ГГц принимает значения меньшие по величине, чем потери преобразования (менее 5 дБ). Возвратные потери по РЧ-входу составляют не более 8 дБ, а по ПЧ-выходу – не более 20 дБ. Развязка между трактами гетеродина и радиосигнала – более 25 дБ, изоляция выхода ПЧ от тракта гетеродина – более 40 дБ. Рабочий диапазон по мощности входного РЧ-сигнала – от минус 140 дБм до плюс 15 дБм. Динамический диапазон (линейный участок $P_{ПЧ}(P_{РЧ})$) составляет 115 дБ (–140 – –15 дБм).

Таким образом, в результате разработки получен балансный смеситель частоты диапазона 75–110 ГГц, реализованный на отечественной компонентной базе и по уровню своих характеристик не уступающий зарубежным аналогам.



а)



б)

рис. 1 Принципиальная схема балансного смесителя (а); внешний вид разработанного смесителя (б)

Электромагнитная герметизация с использованием аддитивно изготовленных композитных структур

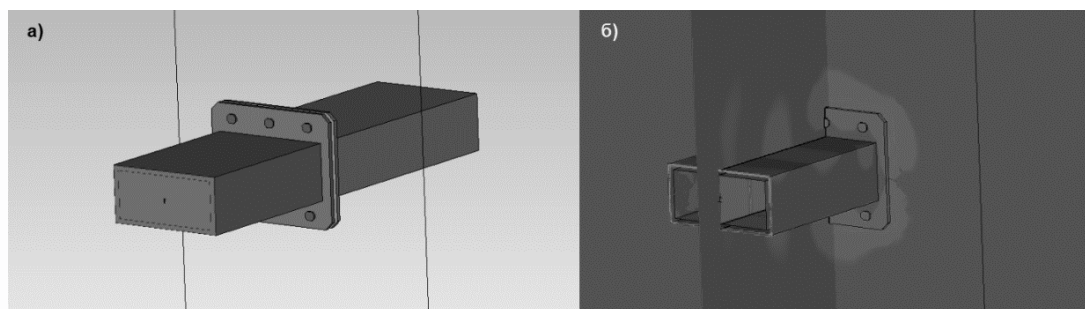
Пидотова Диана Андреевна,
Кулешов Григорий Евгеньевич, Бадьин Александр Владимирович, Дорожкин Кирилл Валерьевич,
Томилов Иван Михайлович, Трофимов Егор Александрович
Национальный исследовательский Томский государственный университет
E-mail: thzlab@mail.ru

Сегодня по всему миру непрерывно ведутся разработки радиоэлектронных систем и комплексов, использующих в своей работе электромагнитные волны микроволнового спектра. Устройства подобного типа используются во всех сферах жизни современного общества, начиная с медицинской и космической отраслей и заканчивая повседневной жизнью и сферой развлечений. При работе такой техники, может возникать ряд проблем, обусловленный как неидеальностью конструкции аппаратуры, так и природой самих электромагнитных волн. Одной из основных проблем является электромагнитная разгерметизация, как следствие неоправданный расход энергии, негативное влияние излучения на человека, а также на другую аппаратуру [1-4]. Обеспечить электромагнитную герметичность корпуса или СВЧ-тракта можно с помощью композиционных проводящих прокладок или уплотнителей, при этом последние должны обладать достаточной мягкостью для обеспечения полного контакта во всех точках соприкосновения и устранения волноводного эффекта. Многие фрезерованные корпуса СВЧ-техники имеют сложную форму; прокладка должна повторять конструкцию, иметь отверстия под крепления и внутренние стенки, разбивки на блоки. Использовать жгуты в данных случаях не всегда удобно, вырубка или резка прокладок суть затратные и трудоемкие процессы. Доступной, быстрой и простой в использовании альтернативой является 3D-печать [5].

Аддитивные технологии продолжают активно развиваться уже не первое десятилетие. Наибольшее распространение имеет FDM-технология послойного наплавления, использующая в качестве сырья полимерный филамент. Рынок 3D-нитей, как отечественный, так и зарубежный, изобилует различными материалами, однако композиционные проводящие [6] и радиопоглощающие [7] филаменты представлены довольно скудно. Это во многом обусловлено трудностями производства.

В данной работе проводится теоретическое исследование эффективности экранирования прокладок из полимерных электропроводящих материалов в программе для трехмерного моделирования электромагнитных полей CST MICROWAVE STUDIO.

Модель представляла собой сочленение двух волноводов с воздушным зазором на их фланцах (рис.1). Волноводы имели сечение 23x10 мм, стандартные рабочие частоты на данных каналах лежат в диапазоне от 8 до 12 ГГц, на этих же частотах и проводился расчет.



а) сочленение волноводов, б) визуализация распространения электромагнитных волн через щель
рис. 1. Модель сочленения двух волноводов с воздушным зазором на их фланцах

Рассматривалось 3 варианта величины зазора (0,1; 0,5; 1,0 мм) и 3 варианта прокладок толщиной 1 мм. При моделировании прокладок использовались электрофизические параметры токопроводящего пластика для 3D-печати на основе полилактида «PLA-Conductive» от фирмы «ProtoPasta» (США), токопроводящего термопластичного полиуретана марки «П60Д12И» производства ООО «МК-Полимер» (г. Северск, Россия), а также полимерного композита на основе термопластичного полиуретана и 40 масс. % карбонильного железа.

Напряженность электромагнитного поля измерялась на расстоянии 60 мм от края фланца волновода. В диапазоне частот от 8 до 12 ГГц экранировка сочленения при зазорах 0,1 мм; 0,5 мм; 1,0 мм составляет 50 дБ, 28 дБ и 11 дБ соответственно. Прокладка толщиной 1 мм полимерного композита на основе термопластичного полиуретана и 40 масс. % карбонильного железа обеспечивает экранирование на уровне 17 дБ. Токопроводящие прокладки из материалов «PLA-Conductive» и «П60Д12И» обеспечивают лучший результат: 48 дБ и 95 дБ соответственно.

Таким образом токопроводящие материалы на основе углеродных соединений могут применяться для герметизации микроволновой техники. Материал должен иметь максимально возможные значения действительных частей электрофизических параметров для обеспечения пространственного скачка волнового сопротивления и удержания электромагнитной энергии внутри тракта или аппаратуры. Из рассматриваемых

материалов наилучший результат показал полиуретановый композит «П60Д12И». Использование такой прокладки в рассматриваемой ситуации позволяет улучшить экранирование системы на 45 дБ в случае зазора 100 мкм между фланцами.

Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-20174, <https://rscf.ru/project/25-29-20174/> и средств Администрации Томской области.

Список публикаций:

- [1] Magisetty R.P., Shukla A., Kandasubramanian B. // Journal of Electronic Materials. 2018. V. 47(11), P.6335.
- [2] Huang Y., YuanX., Chen M., Song W.-L., Chen J., Fan Q., Tang L., Fang D // Carbon. 2019. V. 144. P.449.
- [3] Lu Z., Ma L., Tan J., Wang H., DingX. // 2D Materials. 2017. V. 4(2). 025021.
- [4] Bonato M., Dossi L., Chiaramello E., et al. // Single user EMF exposure assessment in a case of incoming 5G indoor scenario // Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2020. No 9245838
- [5] Ryan, K. R., Down, M. P., Hurst, N. J., Keefe, E. M., & Banks, C. E. (2022). Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications. eScience.
- [6] Trofimov E. A., Kuleshov G. E., Moskalenko V. D., Badin A. V., Dorozhkin K. V. // Actual Problems of Radiophysics International Conference 2021 (APR 2021), 2140 (2021) 012010
- [7] Badin A.V., Moskalenko V.D., Minin I.N., Pidotova D.A., et al. // Mathematical and computational physics, 66, № 5, 527-532, 2023

Частотный фильтр КВЧ диапазона на основе фотонных структур

Пфайф Анастасия Андреевна
Кулешов Григорий Евгеньевич
Томский государственный университет
E-mail: nastya.pfayff17@mail.ru

В последние годы происходит постепенный переход радиотехники и технологий связи на все более высокие рабочие частоты. Появляются первые массово выпускаемые устройства КВЧ диапазона [1]. Это приводит к необходимости разработки для новых диапазонов частоты эффективно работающих радиоматериалов и структур, которые позволили бы обеспечить информационную безопасность и помехозащищенность приемников сигнала [2]. В СВЧ и терагерцовом диапазонах частот для пространственной фильтрации сигналов хорошо зарекомендовали себя метаматериалы [3] и фотонные структуры [4]. Фотонные структуры представляют собой периодически расположенные элементы, размеры которых сравнимы с длиной волны проходящего через них электромагнитного излучения [5]. Их главной особенностью является наличие в спектре коэффициента пропускания запрещенных областей частот, где электромагнитные волны не могут распространяться. Нарушения периодичности или симметрии в фотонных структурах может приводить [6] к появлению узкой полосы пропускания в запрещенной зоне, превращая фотонную структуру в узкополосный фильтр.

Для создания частотно-избирательной фотонной структуры КВЧ диапазона было решено использовать модель одномерного фотонного кристалла на основе чередующихся слоев диэлектрика и воздуха четвертьволновой толщины.

В качестве слоев диэлектрика были использованы стандартные полиэтиленовые листы толщиной $d=0.34$ мм. Для рассмотренных образцов листов полиэтилена, а также для листов большей толщины $d=0.97$ мм, были проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости. Измерения проводились в диапазоне частот от 110 ГГц до 2 ТГц на спектрометре Teravil T-Spec 1000. Результаты измерений частотных зависимостей действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости представлены ниже (рис. 1). Полученные значения комплексной диэлектрической проницаемости для образцов полиэтилена различной толщины практически не отличаются. Данный факт свидетельствует об однородности, изотропности и одинаковой плотности полиэтилена в пластинах различной толщины. При этом диэлектрические потери в КВЧ диапазоне достаточно низкие ($\epsilon''=0.05$), что необходимо для получения эффективной резонансной структуры.

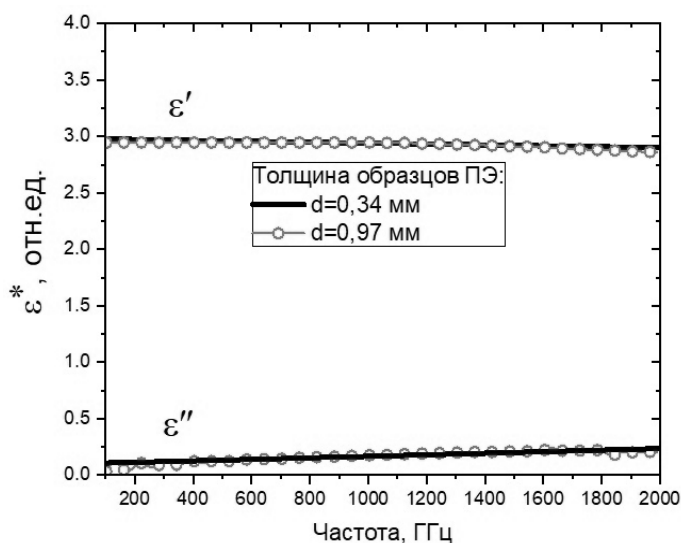


Рис.1 Измеренная комплексная диэлектрическая проницаемость полиэтиленовых пластин

Воздушные слои создаются за счет использования тонких плоских рамок, которые размещаются между слоями полиэтилена. Толщина рамок определяется требуемой толщиной воздушного слоя и рассчитывается по формуле (1):

$$d_{\text{возд}} = \sqrt{\epsilon'} \cdot d_{\text{д}}, \quad (1)$$

где ϵ' — действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости слоев диэлектрика фотонной структуры, $d_{\text{д}}$ — толщина диэлектрических слоев.

В итоге требуемая толщина воздушного слоя составила 0.54 мм.

Далее используя полученные значения комплексной диэлектрической проницаемости и толщины слоёв периодической структуры, в программе CST Studio было проведено моделирование электромагнитного отклика в диапазоне частот от 40 до 1000 ГГц для 5 слоев диэлектрика. Для этого у созданной модели были заданы граничные условия с помощью диалогового окна *Boundaries*. Для осей x , y был задан тип граничных условий *unit cell*. Это упрощенный вариант периодических граничных условий. Он может применяться только в плоскости

ХУ, тем не менее позволяет применить не ортогональную сетку, что приводит к уменьшению размеров и снижению времени на расчет. Для оси z заданы граничные условия *open* (*add space*), свободное пространство. Волны могут проходить через эту границу с минимальными отражениями. Добавка *add space* означает дополнительное пространство для расчета дальнего поля. С помощью опции *Floquet Boundaries* было задано число мод Флоке (1 мода), которые описывают поле. После чего во вкладке *Solver* был выбран решатель для электромагнитного моделирования *Frequency Domain Solver* (решатель на основе метода конечных элементов) [7] и запущено моделирование электромагнитного отклика от фотонной структуры. Для практической проверки полученных результатов моделирования был изготовлен экспериментальный образец фотонной структуры из 5 слоев диэлектрика. Воздушные прослойки создавались с использованием аддитивной технологии FDM 3D печати путем изготовления на 3D принтере плоских рамок заданной толщины (0.54 ± 0.02 мм), которые чередуются со слоями полиэтилена (рис.2а).

Измерение электромагнитного отклика образца было проведено на спектрометре Teravil T-Spec 1000 в диапазоне частот от 110 ГГц до 1 ТГц. Исследуемый экспериментальный образец, а также результаты моделирования и измерений представлены на рис.2.

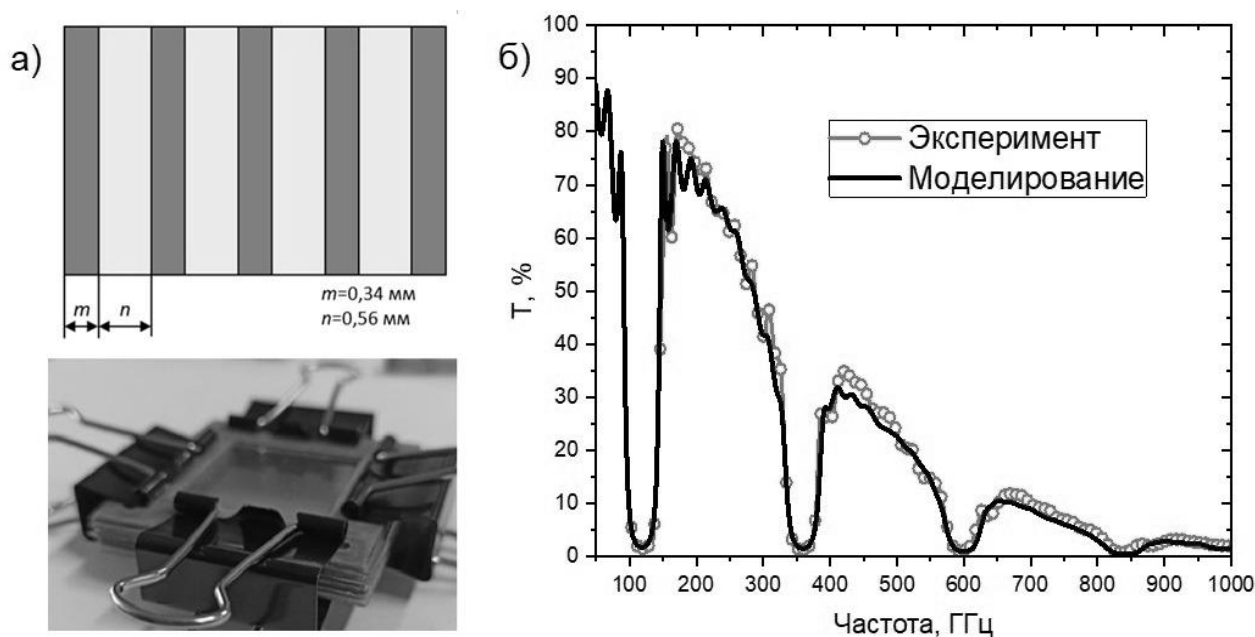


Рис. 2 Структура и изображение экспериментального образца (а), сравнение результатов моделирования и измерений коэффициента пропускания (б)

Результаты измерений практически полностью совпадают с экспериментальными данными, что говорит о корректности используемой модели и точно изготовленном экспериментальном образце.

Далее было проведено моделирование, где был введен дефект путем изменения толщины одного из воздушных слоев (рис. 3).

При ширине воздушного слоя 0,3 мм полоса заграждения находится в области частот от 112 до 156 ГГц и имеет ширину 44 ГГц, центр 134 ГГц. С увеличением толщины воздушного слоя область заграждения становится шире и в ней появляются явные новые пики пропускания. При ширине слоя 0,80 мм пик пропускания появляется в правой части полосы заграждения (в более высокочастотной области), на 143 ГГц, и достигает величины 62%. Но дальнейшее ее увеличение приводит к смещению пика в область более низких частот, 132 ГГц, и снижению пропускания до 52%. Таким образом, изменяя толщину одного из воздушных слоев, можно получить узкополосный фильтр КВЧ диапазона. Частотой пропускания подобного фильтра можно в некоторых пределах управлять изменяя толщину воздушного слоя.

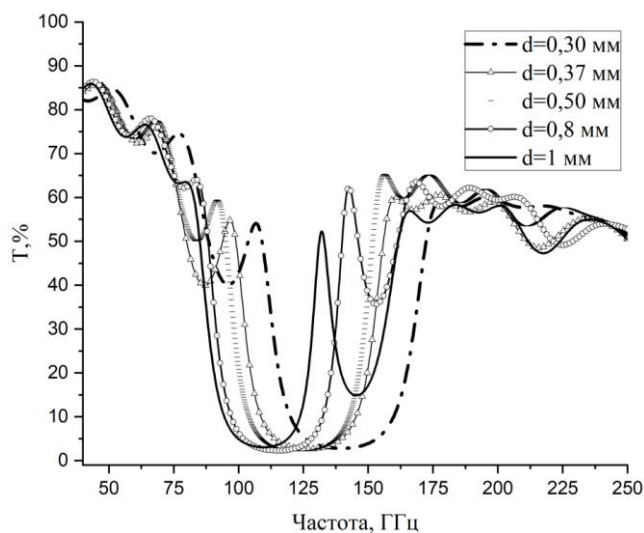


Рис.3 Спектр пропускания структуры для разной толщины одного воздушного слоя

В ходе работы было проведено моделирование частотного фильтра на основе фотонного кристалла. На основании результатов был изготовлен экспериментальный образец и получены его спектральные характеристики. Также проведено исследование влияния дефекта на спектр пропускания фотонной структуры. Данная структура исследовалась из-за возможности относительно просто ее реализовать на практике при помощи технологии 3D печати. Для этого одна из рамок фотонной структуры изготавливается из термопластичного материала и под действием внешнего давления меняет свою толщину в заданных пределах.

Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-20174, <https://rscf.ru/project/25-29-20174/> и средств Администрации Томской области.

Список используемой литературы:

1. [1] Wanga Y. et al. // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. 2023. Vol. 2. P. 1–18.
2. [2] Britto E. C. et al. // Brazilian Journal of Physics. 2024. Vol. 54, № 107. P. 1–17.
3. [3] Кулешов Г.Е., Дорожкин К.В., Бадьин А.В., Билинский К.В. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2023. № 5. С. 124–125.
4. [4] Zhang P. et al. // Optical and Quantum Electronics. 2023. Vol. 55, № 255. P. 1–12.
5. [5] Lv X. et al. // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2023. Vol. 36, № 39. P. 1–17.
6. [6] Усанов Д. А. и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, № 3. С. 26–34.
7. [7] Фатеев А. В. // Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. 2017. 115 с.

Генерация и детектирование импульсов терагерцового излучения в кристаллах GaSe и их применение во времяпролетной томографии

Саркисов Сергей Юрьевич

Березная Светлана Александровна, Редькин Руслан Александрович

Томский государственный университет

E-mail: sarkisov@mail.tsu.ru

Технологии терагерцового зондирования и построения изображений, как двухмерных, так и трехмерных, имеют множество применений в таких областях, как безопасность, медицина, исследование свойств полупроводников и диэлектриков, материаловедение, биохимическая, пищевая и фармацевтическая промышленность, исследование предметов археологии и искусства и т.п. [1]. Одним из самых мощных инструментов для получения спектроскопической информации, исследования быстропротекающих процессов и построения изображений является импульсная терагерцовая спектроскопия во временной области (THz-TDS) [2]. Эта методика, как в геометрии «на отражение», так и «на пропускание», широко используется для измерения диэлектрического отклика различных материалов, таких как полупроводники, диэлектрики и биологические ткани. Известно, что двумерные (2D) терагерцовые изображения легко получить путем поперечного сканирования образцов [1, 3]. В том числе имеются возможности спектроскопической визуализации, т.е. получения спектроскопической информации после взаимодействия зондирующего излучения с выделенной областью внутри образца. Известна ближнепольная терагерцовая наноскопия, которая позволяет получать такую информацию с пространственным разрешением выше дифракционного предела, но от участков на поверхности образца [4]. В геометрии «на отражение» могут быть измерены непрозрачные образцы с высоким содержанием воды или на металлической подложке. К настоящему времени известно, что импульсная терагерцовая спектроскопия во временной области может быть использована не только для спектроскопии, но и для томографии объектов [1, 3]. Возможна съемка как в режиме «времени пролета», так и в режиме «компьютерной томографии», где образец поворачивается для проведения серии сканирований [1]. Во времяпролетном режиме регистрируются отраженные от образца эхо-импульсы электрического поля, что возможно, так как в схеме импульсной терагерцовой спектроскопии во временной области электрическое поле субпикосекундных терагерцовых импульсов непосредственно измеряется при сканировании. Такая методика, в частности, перспективна для применений в промышленности, так как позволяет тестировать толщину слоев в многослойных красках в промышленных изделиях или покрытиях для таблеток [1, 3], которые не поддаются измерению методами томографии на основе источника света оптического диапазона. При этом осевое пространственное разрешение таких систем ограничивается несколькими десятками микрон из-за длительности используемых терагерцовых импульсов (как правило, несколько пикосекунд). С целью увеличения пространственного разрешения разрабатываются технологии сжатия импульсов и используются более короткоимпульсные лазеры (для генерации терагерцовых импульсов). Для лабораторных систем титан-сапфировый лазер стандартно является оптимальным вариантом источника фемтосекундных импульсов, поскольку он имеет высокие и стабильные характеристики и для генерации и детектирования терагерцовых импульсов. Следует отметить, что для применений вне лаборатории перспективы системы на основе волоконных лазеров. Альтернативой времяпролетным системам является компьютерная томография [1]. Терагерцовая томография открывает ряд новых возможностей, поскольку возможно получать информацию как об амплитуде, так и о фазе сигнала. Основное фундаментальное ограничение метода связано с поглощением, которое ограничивает толщину образца, подлежащего визуализации. Таким образом, требуется подбор оптимального спектрального диапазона для конкретного образца, чтобы обеспечить прозрачность, разрешение и получение наиболее полной информации об образце. Это делает актуальными исследование предельных характеристик (возможностей) терагерцовой томографии для исследования структурных, диэлектрических и химических свойств полупроводниковых структур в зависимости от параметров используемых источников и детекторов излучения, параметров сканирования, толщины образца и т.д. Актуальным является развитие алгоритмов обработки и реконструкции сигналов и изображений.

В настоящей работе импульсы титан-сапфирового лазера MaiTai SP (Spectra-Physics, США) длительностью около 30 фс использовались для генерации и детектирования терагерцовых импульсов в кристаллах GaSe толщиной около 1 мм. Схема установки импульсной терагерцовой спектроскопии была аналогична описанной, например, в [5]. Данная схема была преобразована для эксперимента по времяпролетной томографии образцов с небольшой оптической плотностью для излучения терагерцового диапазона. Образец представлял собой «слоистую структуру» (рис. 1), включающую пластину из тефлона толщиной около 1 мм, на которую устанавливались рядом две пластины, одна из полиэтилена, другая из поликарбоната, толщинами около 2 мм каждая, сверху на них укладывалась пластина из тефлона, аналогичная первой. Образец помещался на двухкоординатную подвижку, с помощью которой возможно было его прецизионное перемещение в горизонтальной плоскости. Фокусировка терагерцовых импульсов на образец и сбор отраженного излучения осуществлялись с помощью параболических зеркал как показано на рис. 1. Угол падения терагерцового излучения на образец составлял несколько градусов. Для получения опорного сигнала (рис. 2) вместо образца помещалось серебряное зеркало.

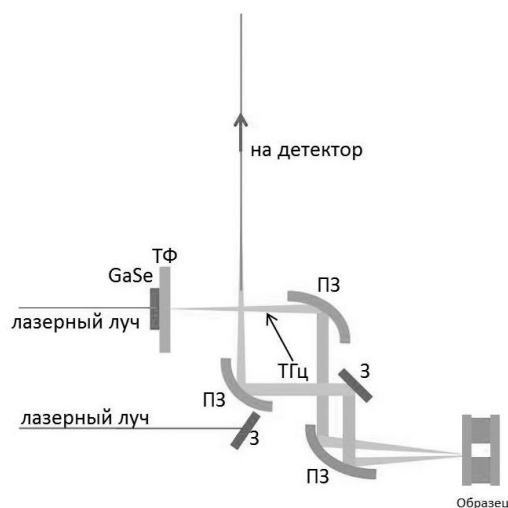


рис.1 Изображение участка оптической схемы, на котором осуществляется фокусировка терагерцовых импульсов на образец, сбор и фокусировка отраженного сигнала на детектор (ПЗ – параболлическое зеркало, З – зеркало, ТФ – тефлоновый фильтр)

Зарегистрированные временные формы сигнала, отраженные от образца, показаны на рис. 2. Видны эхо-импульсы, отраженные от границ раздела воздух/тефлон, воздух/поликарбонат, воздух/полиэтилен (отмечены черными стрелочками). Волновая форма отраженного от образца импульса $B(t)$ представляет собой свертку волновой формы опорного импульса $A(t)$ и функции отклика образца $g(t)$ [3]

$$B = A * g. \quad (1)$$

В случае импульсной терагерцовой спектроскопии волновые формы представлены набором дискретных значений (дискретизация определяется шагом сканирования; в настоящей работе 66 фс). Очевидно, временная задержка между приходом на детектор эхо-импульсов, отраженных от передней и задней грани плоскопараллельного объекта толщиной d_i , определяется, в случае если объект однороден и имеет показатель преломления n_i , формулой

$$\Delta t_i = \frac{2n_i d_i}{c}. \quad (2)$$

С учетом этого после выполнения численной процедуры обратной свертки можно найти коэффициенты g_k в выражении (1). В приближении малого поглощения и отражения по известным g_k можно восстановить показатели преломления по формуле [3]

$$n_j = \prod_{i=1}^j \frac{1-r_i}{1+r_i}, \quad (3)$$

Амплитудные коэффициенты отражения r_i находятся из выражения:

$$r_k = g_k \prod_{i=1}^{k-1} \frac{1}{(1-r_i)^2}, \quad (4)$$

Здесь $r_1 = g_1$, $n_0 = 1$.

Полученные с использованием описанной выше процедуры профили показателей преломления по толщине образца показаны на рис.2. Данные приведены для двух точек в горизонтальной полсотки, расположенных на поверхности тефлона, одна над поликарбонатом, другая – над полиэтиленом. Можно отметить наличие нечетких границ изменения показателя преломления и получение значений выше 1 для участков, соответствующих воздушным зазорам между пластинами тефлона и поликарбоната (полиэтилена). Это связано с наличием шумов на регистрируемых волновых формах, а также ограничениями процедур численной обработки сигналов, в том числе конечной длиной выборок.

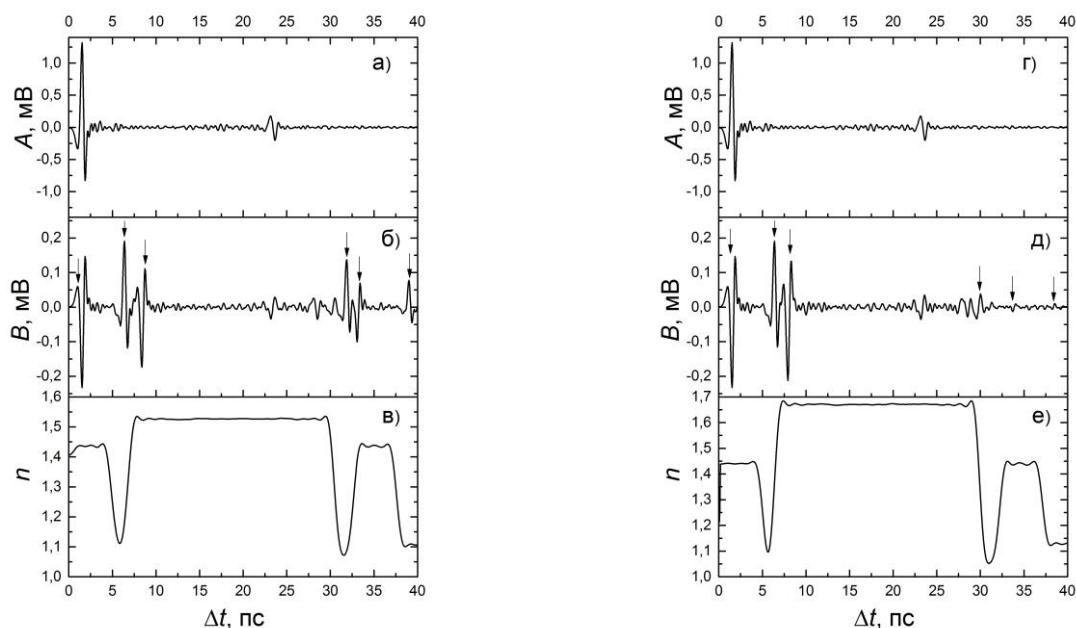


рис. 2 Временные формы опорных терагерцовых импульсов (а) и (г), импульсов, отраженных от образца (в) и (г), и восстановленные профили показателей преломления по толщине образца (в) и (е). Стрелки указывают на положения отражения импульсов от границ раздела воздух/тефлон и воздух/поликарбонат (полиэтилен)

Таким образом, была продемонстрирована возможность применения установки импульсной терагерцовой спектроскопии с генератором и детектором терагерцовых импульсов на основе кристаллов GaSe для времяпролетной томографии слабопоглощающих объектов. В дальнейшей работе предполагается оптимизировать алгоритм обработки данных, а также применить продувку спектрометра инертными газом для исключения влияния паров воды.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0014.

Список публикаций:

- [1] Guillet J.P., Recur B., Frederique L., Bousquet B., Canioni L., Manek-Hönninger I., Desbarats P., Mounaix P. J. *Infrared Millimeter Terahertz Waves*. 2014. V. 35. № 4. P. 382–411.
- [2] Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M. *Las. Phot. Rev.* 2011. V. 5. P. 124–166.
- [3] Mittleman D.M., Hunsche S., Boivin L., Nuss M.C. *Opt. Lett.* 1997. V. 22. № 12. P. 904–906.
- [4] Huber A.J., Keilmann F., Wittborn J., Aizpurua J., Hillenbrand R. *Nano Lett.* 2008. V. 8. № 11. P. 3766–3770.
- [5] Redkin R.A., Kobtsev D.A., Bereznaya S.A., Korotchenko Z.V., Sarkisov Y.S., Mihaylov T.A., Sarkisov S.Y. *Mater. Res. Express*. 2019. V. 6. № 12. P. 126201 (7 pp).

Электромагнитный отклик от композиционных материалов на основе эпоксидной смолы и стеклянных микросфер в суб-терагерцовом диапазоне

Томилов Иван Михайлович

Кулешов Григорий Евгеньевич, Пидотова Диана Андреевна

Томский государственный университет

E-mail: *nikobellik2004@gmail.com*

При переходе современной радиоэлектроники в КВЧ и суб-терагерцовый диапазон появляется необходимость в новых радиоматериалах с требуемыми электромагнитными характеристиками (коэффициенты отражения, поглощения и прохождения) на заданных частотах. Причем от величины электромагнитных характеристик зависит сфера практического применения материалов в радиоэлектронной промышленности. Например, материалы с низкими показателями коэффициента отражения и поглощения используются в качестве радиопрозрачных материалов для конструирования антенных систем космических и летательных аппаратов [1], а материалы с высокими коэффициентами поглощения и низким отражением для защиты радиоэлектронных устройств и человека от электромагнитных полей [2]. Поэтому разработка новых композиционных материалов, эффективно действующих в суб-терагерцовом диапазоне, является актуальной задачей.

В данной работе проводится исследование композиционных смесей с матрицей на основе эпоксидной смолы и добавлением стеклянных микросфер радиусом порядка 0.5 мкм в качестве наполнителя. Выбор данного наполнителя обусловлен тем, что в рассматриваемом диапазоне частот размер наполнителя становится сравнимым с длиной волны электромагнитного излучения и возможно появление резонансных эффектов в материале. Для измерений изготавливался набор экспериментальных образцов в виде плоских шайб диаметром 45 мм и толщиной $d=1.5\div 2.5$ мм с разным массовым содержанием наполнителя. После изготовления образцов были измерены электромагнитные характеристики композитов.

Исследования электромагнитного отклика от материалов проводилось методом тайм-доменной спектроскопии с помощью терагерцового спектрометра реального времени T-SPEC фирмы «TERAVIL» в диапазоне от 100 ГГц до 1 ТГц.

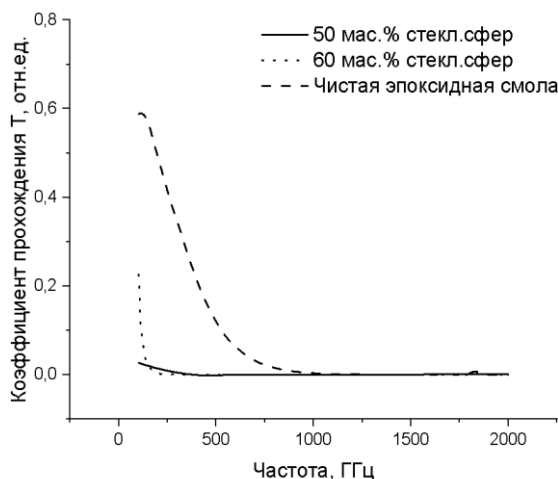


Рис. 1. График зависимости коэффициента прохождения T от частоты образцов с чистой эпоксидной смолой, 50 и 60 мас. % содержанием микросфер

Это позволяет получить материал с низким коэффициентом отражения и высокими потерями. Дешевизна компонентов, использующихся в изготовлении данных материалов, является преимуществом при массовом производстве устройств с данным материалом.

Измерения выполнены на оборудовании ЦКП «Центр радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов» Национального исследовательского Томского государственного университета. Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-20174, <https://rscf.ru/project/25-29-20174/> и средств Администрации Томской области.

Список публикаций:

[1] Русин М.Ю. // Обнинск: ГНЦ РФ ОАО «ОИПП «Технология»», 2014. С. 19-23.

[2] Li M., Hu W., Zheng Q., Yang X., Yi Z. // Microw. Opt. Technol. Lett. 2023. Vol. 65. P. 2108–2113

**Ферритосодержащий термопластичный материал для электромагнитной герметизации
с применением аддитивной технологии**

Фролова Дарья Андреевна,

Бадьин Александр Владимирович, Кулешов Григорий Евгеньевич, Пидотова Диана Андреевна, Дорожкин

Кирилл Валерьевич, Кателина Дарья Сергеевна, Москаленко Виктория Дмитриевна

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: frolova_d.a@mail.ru

Сегодня аддитивная технология послойного наплавлением (FDM) [1-5] стремительно развивается путем расширения базы наполнителей полимерных композиционных материалов, таких, как порошки гексагональных ферритов, открывая новые области применения. В ряде случаев необходимо, чтобы готовые изделия обладали способностью обратимой деформации. Этого можно достичь путем применения эластомеров (полимеров с высокими упругими свойствами).

В данной работе представлены результаты исследования электромагнитных свойств ферритосодержащего термопластичного материала на основе полиуретана и порошка гексагонального феррита в КВЧ диапазоне. Для исследования был выбран порошок поликристаллического гексаферрита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (Ba-M) со средним геометрическим размером частиц 11,65 мкм. В качестве основы для полимерной матрицы применялся термопластичный полиуретан с твердостью 60d производства компании «Bestfilaments» (Россия).

Изготовление экспериментальных образцов для исследования электрофизических свойств проводилось методом горячего смешивания в тигле при температуре 225 °С с последующим охлаждением расплава и его измельчением. Из полученного сырья методом горячего ручного экструдирования осуществлялась формовка филамента со средним диаметром 1,75 мм. Тестовые образцы изготавливались методом FDM 3D-печати при температуре сопла и стола 190 °С и 60 °С, соответственно.

Для измерения электромагнитного отклика от образцов материалов использовался квазиоптический спектрометр терагерцового диапазона СТД-21. Частотный диапазон измерений составил от 34 до 180 ГГц. По характеристикам аппроксимации интерференционной кривой была рассчитана комплексная диэлектрическая проницаемость.

Диэлектрическая проницаемость полимерного композиционного материала практически не зависит от частоты, и при этом он обладает низкими диэлектрическими потерями $\epsilon'' = 0,05 - 0,07$ отн. ед. Естественный ферромагнитный резонанс у композита с гексаферритом $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ находится на частоте порядка 49 ГГц. При этом мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости $\mu'' = 0,12$ отн. ед., что заметно проявляется на коэффициенте прохождения. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности использования исследованного магнитного полимерного композита для создания частотно-избирательных элементов КВЧ диапазона. Уровень ослабления электромагнитного излучения в области естественного ферромагнитного резонанса можно регулировать, изменяя соотношение масс активного компонента и связующего вещества.

Полученные результаты показывают перспективность применения термопластичного материала на основе полиуретана и порошка гексагонального феррита в FDM 3D-печати. Основными направлениями практической реализации данного материала в промышленности являются прототипирование и изготовление гибких частотно-избирательных конструкций и покрытий КВЧ техники. Благодаря наличию ярко выраженной резонансной области на частотной зависимости коэффициента прохождения исследуемые материалы могут быть востребованы в аддитивном производстве.

Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-20174, <https://rscf.ru/project/25-29-20174/> и средств Администрации Томской области.

Список публикаций:

- [1] Фархутдинов М. М., Фетисов Л. В. Проектирование электротехнических устройств с применением технологии 3д печати // Современные инновации. 2024. №. 2 (45). С. 14-16.
- [2] Михайлова А. К., Корчагина М. В. Эластомеры, их применение и переработка // Сборник научных статей 6-й Международной молодежной научной конференции Будущее науки. 2018 Т. 4. С. 58–60.
- [3] Ehrmann G., Blachowicz T., Ehrmann A. Magnetic 3D-printed composites – production and applications // Polymers. 2022. V. 14. No. 18. P. 3895.
- [4] Cheng Z. et al. 3D printed composites based on the magnetoelectric coupling of Fe/FeCo@C with multiple heterogeneous interfaces for enhanced microwave absorption // Chemical Engineering Journal. 2024. V. 480. P.148188.
- [5] Alarifi I. M. Revolutionising fabrication advances and applications of 3D printing with composite materials: a review // Virtual and Physical Prototyping. 2024. V. 19. No. 1. P. e2390504.

Влияние дифракционного отражателя на параметры излучения в многоволновом черенковском генераторе в верхнем КВЧ-диапазоне

Чазов Вадим Андреевич

Кошелев Владимир Ильич

Петкун Андрей Антонович

Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: vadim.chazov.2017@mail.ru

На основе гибридного численного метода [1], включающего PIC-модель и метод матриц рассеяния (на скачках радиуса неоднородности в круглом волноводе) исследовано влияние разных типов дифракционного отражателя на мощность излучения в многоволновом черенковском генераторе (МВЧГ) КВЧ-диапазона (260 – 270 ГГц). В генераторе используется сверхразмерная замедляющая структура диаметром $D = 36$ мм. Отношение длины волны излучения к диаметру структуры $D/\lambda \approx 32$ –33. Две секции МВЧГ разделены трубой дрейфа длиной $L_{dr} = 3.2$ мм. Диффрагмы в обеих секциях одинаковые с периодом $d = 0.46$ мм, высотой $h = 0.125$ мм и длиной $l = 0.22$ мм. Суммарное число диффрагм в обеих секциях – 40. Исследованы конфигурации, где по 20 диффрагм в 1-ой и во 2-ой секции; 16 диффрагм в 1-ой секции и 24 диффрагмы во 2-ой секции; 24 диффрагм в 1-ой секции и 16 диффрагмы во 2-ой секции. Для исследования повышения мощности излучения вперед рассмотрены несколько типов дифракционных отражателей с переменными расстояниями гладкой трубы L_r (между последней диффрагмой отражателя и первой диффрагмой 1-ой секции). Характерный случай взаимодействия электронного пучка вблизи поверхности замедляющей структуры (16+24 диффрагм) с полем резонансных ТМ-волн показан на (рис. 1) после 20 нс запуска тока пучка 5 кА при энергии электронов 300 кэВ.

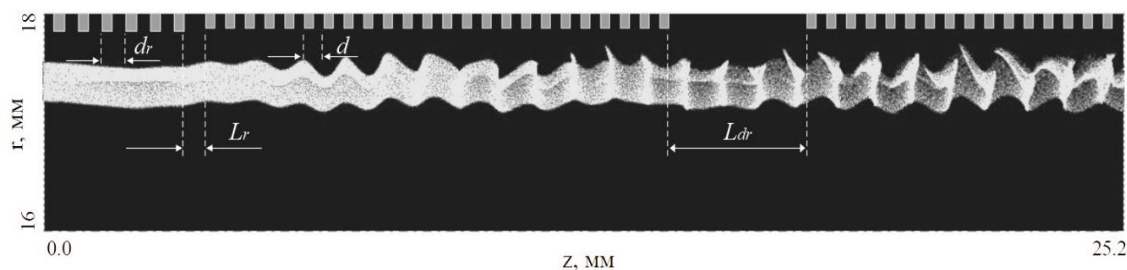


Рис.1 Замедляющая структура многоволнового черенковского генератора и дифракционный отражатель с тонким трубчатым электронным пучком

Во всех типах отражателей использовалось 6 диффрагм одинаковой длины $l_r = 0.26$ мм с высотой $H_r = 0.15$ мм, либо $H_r = h$, период d_r варьировался – 0.56, 0.62 и 0.66 мм. Различие выбора отражателей обусловлено относительно длинной трубой дрейфа ($L_{dr} > \lambda$), которая создает дополнительные дифракционные переотражения между секциями. В таком случае, условие Вульфа-Брегга на период диффрагмирования отражателя не является оптимальным для максимизации мощности излучения вперед в выходной секции, по сравнению с односекционной замедляющей структурой при $L_r < \lambda$. На (рис. 2) представлены дисперсионные характеристики мод TM_{01} бесконечных дифракционных отражателей и периодической замедляющей структуры, нормированные на период d .

Рассмотрено взаимодействие электронного пучка и поля нескольких продольных резонансов ТМ-волн при энергии 400 кэВ (соответствует $f_{\pi} = 269.44$ ГГц для TM_{01}) и 300 кэВ. Использовалось 4–6 резонансов (мод, где основной вклад в поле совершают поверхностные волны – TM_{011} , TM_{012} , TM_{013} , TM_{014} и объемные волны – TM_{0321} и TM_{0322}), отсчитываемых от π -вида моды TM_{01} бесконечной периодической структуры. Ток пучка составлял 5 кА при длительности импульса 10–20 нс с передним фронтом 0.5 нс. Внешнее магнитное поле равно 3 Тл. Для различных типов дифракционного отражателя и выбранной энергии электронов пучка исследовались небольшие изменения среднего радиуса (17.45–17.65 мм) тонкого пучка толщиной 0.3 мм.

Методика расчета мощности [2], применявшаяся ранее в предыдущих наших численных исследованиях черенковских генераторов, используется также в данной работе. Показано, что изменение среднего радиуса электронного пучка на 0.2 мм и энергии от 300 до 400 кэВ с различными отражателями приводят к переходу в различные режимы генерации мощности – стабильное излучение, регулярные или хаотические колебания мощности излучения. Возможен режим перехода от периодических колебаний мощности к стабильному излучению во времени для некоторых типов отражателей при изменении энергии электронов от 300 до 400 кэВ (рис. 3). Задержка импульса излучения относительно импульса тока пучка составляет 3–4 нс.

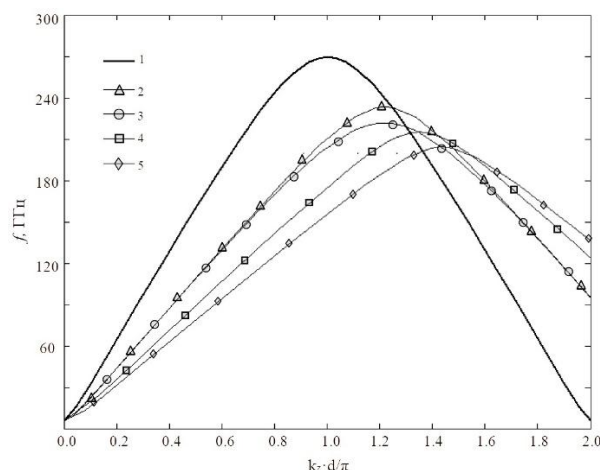


Рис.2 Дисперсионные характеристики мод TM_{01} дифракционных отражателей и замедляющей структуры: **1** - $d = 0.46$ мм, $h = 0.125$ мм и $l = 0.22$ мм; **2** - $d_r = 0.56$ мм, $H_r = 0.125$ мм и $l_r = 0.26$ мм; **3** - $d_r = 0.56$ мм, $H_r = 0.15$ мм и $l_r = 0.26$ мм; **4** - $d_r = 0.62$ мм, $H_r = 0.125$ мм и $l_r = 0.26$ мм; **5** - $d_r = 0.66$ мм, $H_r = 0.125$ мм и $l_r = 0.26$ мм

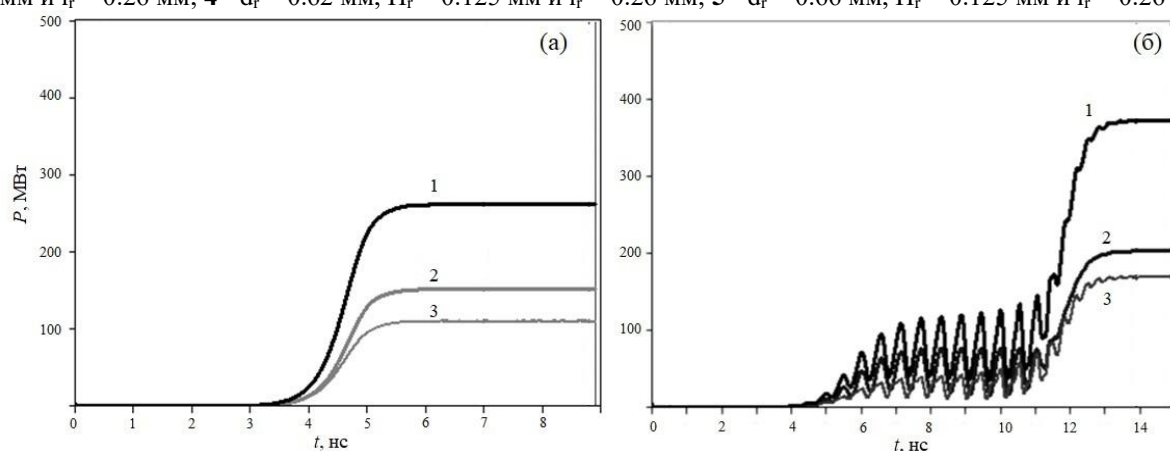


Рис.3 Осциллограммы мощности излучения для МВЧГ с замедляющей структурой 16+24 диафрагм с отражателем - $d_r = 0.56$ мм, $H_r = 0.15$ мм и $l_r = 0.26$ мм, $L_r = 1.72$ мм. 1 – суммарная мощность, 2 – мощность излучения вперед, 3 – мощность излучения назад. (а) – мощность излучения при энергии электронов 300 кэВ, (б) – мощность излучения при энергии электронов 400 кэВ

В ходе численных исследований показано, что в МВЧГ КВЧ-диапазона с трубой дрейфа длиной в несколько длин волн, дифракционный отражатель с шестью диафрагмами может участвовать в модуляции электронного пучка по скорости, существенно меняя режимы мощности излучения. Максимальная эффективность МВЧГ, определяемая как отношение суммарной мощности излучения к мощности пучка в диоде (произведение тока пучка на напряжение на диоде) может достигать 29 %. Отношение мощности излучения вперед к суммарной мощности излучения составляет в среднем около 64 %. Наиболее детально влияние четырех дифракционных отражателей на характеристики излучения исследовано для МВЧГ с замедляющей структурой 16+24 диафрагм. Найдены условия для получения максимальной стабильной мощности излучения и оптимальная геометрия дифракционного отражателя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2021-0002).

Список публикаций:

- [1] Дейчули М. П., Кошелев В. И., Петкун А. А., Чазов В. А. // Изв. вузов. Физика. 2023. Т. 66. № 6. С. 92.
- [2] Koshelev V. I., Chazov V. A., Petkun A. A. // Russ. Phys. J. 2025. V. 68. No. 1. P. 177.

Применение отечественной компонентной базы для разработки наземной системы мониторинга

Южаков Михаил Сергеевич, Казанин Владислав Александрович, Бадьин Александр Владимирович, Кулешов Григорий Евгеньевич, Берзин Артем Константинович
Томский государственный университет
E-mail: i@mikhailyuzhakov.ru

Актуальность.

В работе Эшпулатова Д.Б. [1] приведены определения цифровой модели (цифровая сущность без связи с физическим объектом), цифровой тени (модель с обратной связью от объекта) и цифрового двойника (копия с двунаправленной связью) сельскохозяйственного поля [2]. В настоящее время достижим уровень цифровой тени. Актуальной задачей является создание высокоточных цифровых моделей полей на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и наземного мониторинга. Такая модель включает географические параметры (положение, форма, рельеф), почвенные характеристики (влажность, температура, наличие удобрений), данные о растительности и климате (осадки, CO₂), а также прогнозирование состояния поля [3]. Для построения модели используются данные со спутников («Канопус-В», Landsat-8, Sentinel-2) для картографирования и мониторинга посевов, а также спутники с радиодиапазонной аппаратурой («Кондор-ФКА», Sentinel-1) для управления орошением и внесением удобрений [4]. Однако данные ДЗЗ требуют верификации наземными системами мониторинга, которые в настоящее время используют импортную элементную базу (Китай, США), что создает технологическую зависимость.

Описание системы.

Наземная система состоит из узлов мониторинга, шлюза и серверной части для хранения, обработки и визуализации данных [2]. Узлы мониторинга наиболее просто поддаются импортозамещению, так как представляют собой достаточно простые устройства. В свою очередь шлюз представляет собой устройство более сложной конструкции, требующее наличие беспроводных интерфейсов связи (GPRS, Wi-Fi) и мощного микроконтроллера для обработки и передачи данных. Серверная часть развернута в облаке на процессорах «Intel» и этот компонент заместить практически невозможно.

Узел мониторинга.

Узел мониторинга функционирует на основе микроконтроллера Atmega328P, для передачи данных используется приемопередатчик с LoRa модуляцией E19-868M20S (чип SX1276) или E22-900M22S (чип SX1262). Для обеспечения режима сна и отсчета периода передачи данных используются часы реального времени DS3231, для измерения атмосферного давления, температуры почвы и воздуха, влажности воздуха датчики BMP280, DS18B20, HTU21, соответственно. Также в устройстве узла мониторинга предусмотрен внешний АЦП ADS1115 и энергонезависимая память AT24C512. Для схемы питания устройства используется повышающе-понижающий преобразователь напряжения TPS63060 и контроллер заряда литий-ионных батарей TP4056. Питание узла осуществляется от двух АКБ форм-фактора 18650, а зарядка устройства осуществляется от солнечной панели. Также в устройстве реализована функция измерения тока заряда солнечной панели с помощью операционного усилителя AD623.

В качестве отечественного 8-ми битного микроконтроллера на замену Atmega328P был выбран K1946BM014 производства Воронежского НИИЭТ. Микроконтроллер обладает схожими характеристиками и интерфейсами подключения, за исключением меньшего объема Flash памяти 2048 КБ (Atmega328P) против 512 КБ у отечественного аналога и меньше частотой тактирования 8 МГц, однако для функционирования узла мониторинга этого вполне достаточно. Приемопередатчик второй по важности компонент в структуре устройства может быть заменен отечественным аналогом Вега RM868-UFL производства Новосибирского «Вега-Абсолют». Сравнительный анализ показал, что модули идентичны, за исключением интерфейса подключения SPI у китайского модуля, UART у отечественного аналога.

Был проведен поиск отечественных аналогов часов реального времени DS3231. В ходе анализа не было найдено вариантов замены, однако в некоторых отечественных микроконтроллерах есть встроенные часы реального времени, например, в МИК32 Амур. В качестве микросхемы памяти AT24C512 объемом 512 КБ возможно использовать аналог K1636PP4FI производства АО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград). У отечественного аналога память 2 Мб, а интерфейс подключения к микроконтроллеру SPI против I2C у AT24C512, по остальным параметрам микросхемы памяти схожи и позволят узлам мониторинга автономно логировать данные от 90 до 180 дней.

В качестве аналога внешнего аналого-цифрового преобразователя ADS1115 возможно использовать 1273ПВ19Т производства Воронежского НИИЭТ. Отечественный аналог представляет собой 16-ти битный АЦП с интерфейсом подключения UART, однако ADS1115 предоставляет доступ через интерфейс I2C и также 16-ти битный АЦП. В качестве замены операционному усилителю для схемы измерения тока заряда солнечной панели AD623 возможно использовать отечественный аналог K1496YA014. Отечественный аналог удовлетворяет требования по коэффициенту усиления и соответствует по характеристикам AD623.

Для обеспечения питания не составит труда найти аккумулятор и солнечные панели отечественного производства. Однако датчики BMP280, HTU21 и DS18B20, а также повышающе-понижающий DC-DC преобразователь не имеют отечественных аналогов.

На данном этапе было разработано схемотехническое решение узла мониторинга с использованием

отечественного микроконтроллера K1946BM014, а также спроектирована печатная плата устройства. Остальные компоненты на данный момент остаются иностранными для проведения тестирования устройства. Вместе со схемой электрической принципиальной была разработана печатная плата для узла мониторинга с использованием микроконтроллера K1946BM014. Стоит отметить, что при разработке печатной платы были учтены форм-фактор и расположения датчиков на печатной плате с контроллером Atmega328P.

Шлюз.

Шлюз функционирует на основе микроконтроллера ESP32, для приема данных используется аналогичный модуль на узле мониторинга E19-868M20S, для отправки данных на сервер используется GSM-модуль SIM800L. Конструкция шлюза предусматривает подключения тех же датчиков, что и на узел мониторинга.

В качестве отечественного микроконтроллера на шлюзе планируется использовать 32-битный микроконтроллер МИК32 Амур, производства Зеленоградского АО «Микрон». В отличие от ESP32 в МИК32 нет беспроводных интерфейсов, однако на данный момент основным беспроводным интерфейсом связи для шлюза является GSM, поэтому отсутствие Wi-Fi модуля не критично. Однако в схемотехническом решении будет предусмотрена возможность подключения внешнего Wi-Fi модуля ESP-01 или аналогичного ему. При такой конфигурации весь алгоритм работы шлюза не завязан на ESP32, однако доступ к беспроводному интерфейсу можно будет получить через внешний модуль ESP-01. Модуль LoRa приемопередатчика планируется использовать тот же отечественный аналог, что и на узле мониторинга – Вега RM868-UFL производства Новосибирского «Вега-Абсолют».

На данном этапе схемотехническое решение и печатная плата для шлюза на отечественных компонентах находятся в разработке.

Сервер.

На данный момент серверное программное обеспечение расположено на отечественном хостинге на процессорах «Intel». В России есть два семейства процессоров, разработанных в России, однако произведенных за рубежом – «Эльбрус» и «Байкал». Анализ рынка отечественных провайдеров показал, что облачные сервера на отечественных процессорах в настоящее время отсутствуют. Единственный провайдер, тестирующий сервера на процессорах «Эльбрус» это «Сбер», но пока в производство такие облачные сервера не поступили.

Всегда существует возможность приобрести персональную электронно-вычислительную машину на процессоре Эльбрус-8С и развернуть веб-приложения на ней. Материнская плата также отечественного производства (МЦСТ), оперативная память и твердотельный накопитель производятся в России.

На процессорах Эльбрус-8С используется архитектура VLIW и поддерживаются операционные системы на базе ОС Linux, также возможен запуск ОС Windows с помощью механизма бинарной трансляции. На данном этапе наиболее подходящей операционной системой является «Альт Линукс», разработанная в России и представляющая собой отдельную ветку развития «Linux». На ОС в связке с процессором Эльбрус-8С возможно запускать приложения на Python и Java, чего хватит для потребностей нашей системы.

Вывод.

Таким образом, разработка цифровых моделей сельскохозяйственных полей на основе данных дистанционного зондирования и наземного мониторинга представляет собой перспективное направление, способное повысить эффективность агропромышленного комплекса. Несмотря на существующие технологические вызовы, включая зависимость от иностранных компонентов, проведенный анализ демонстрирует возможность частичного импортозамещения ключевых элементов системы, таких как микроконтроллеры, радиомодули и датчики. Дальнейшее развитие проекта предполагает полную адаптацию шлюза и серверной части под отечественные аналоги, что позволит создать устойчивую и независимую систему мониторинга для точного земледелия.

Список публикаций:

- [1] Эшпулатов Д. Б. Возможности применения цифровых двойников в сельском хозяйстве / Д. Б. Эшпулатов // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 3(152). – С. 523-529.
- [2] Тикки Д. А. Цифровые двойники в сельском хозяйстве / Д. А. Тикки, Т. В. Сафонова, В. Д. Рускин // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2022. – № 4(44). – С. 49-53.
- [3] Stefano Cesco, Paolo Sambo, Maurizio Borin, Bruno Basso, Guido Orzes, Fabrizio Mazzetto, Smart agriculture and digital twins: Applications and challenges in a vision of sustainability, European Journal of Agronomy, Volume 146, 2023, 126809, ISSN 1161-0301.
- [4] Туганова Р. С. Создание нейронной сети для мониторинга состояния сельскохозяйственных земель на основе спутниковых снимков / Р. С. Туганова, Р. Ф. Юльметова // Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО: Пятьдесят вторая (LII) научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО – 2023. – С. 375-378.
- [5] Yuzhakov M. S. Hardware and Software Complex for Monitoring Soil and Climatic Parameters / M. S. Yuzhakov, D. I. Filchenko, A. K. Berzin, A. V. Badin // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. – 2021. – P. 483-488.

**Электромагнитные свойства термопластичных композиционных эластомеров
на основе карбонильного железа для применения в FDM 3D-печати****Бадын Александр Владимирович,***Кулешов Григорий Евгеньевич, Фролова Дарья Андреевна, Пидотова Диана Андреевна, Дорожкин Кирилл
Валерьевич, Кателина Дарья Сергеевна, Томилов Иван Михайлович**Национальный исследовательский Томский государственный университет**E-mail: thzlab@mail.ru*

В настоящее время технология 3D-печати послойным наплавлением (FDM) активно развивается в контексте применения новых композиционных материалов. За последние десятилетия исследования в области создания полимерных композитов для FDM 3D-печати сделали значительный рывок, появились коммерчески доступные электропроводные филаменты [1]. Это позволило создавать экранирующие слои и перегородки в изготавливаемых объектах, таких как корпуса радиоэлектронной аппаратуры [2]. В то же время, при прототипировании и производстве элементов радиоэлектронной аппаратуры требуется класс материалов, обладающих высоким значением возвратной деформации и имеющих магнитные свойства [3, 4].

В данной работе представлены результаты исследования электрофизических свойств композиционных полимерных материалов на основе термопластичного полиуретана для применения в FDM 3D-печати. Для исследования был выбран порошок карбонильного железа марки Р-10, обладающий следующими параметрами: относительная добротность 1,85; эффективная магнитная проницаемость не менее 2,84; относительная начальная магнитная проницаемость 14 отн. ед.; массовая доля углерода 0,7%; массовая доля азота 0,9%; массовая доля кислорода 0,2%; массовая доля железа 97,1 %. В качестве основы для полимерной матрицы применялся термопластичный полиуретан («Kingroon», Россия) с твердостью 60d.

Изготовление экспериментальных образцов производилось методом механического горячего смешения в тигле при температуре 170 °С. Полученный расплав охлаждался до комнатной температуры, подвергался измельчению до формирования фрагментов менее 3 мм в диаметре. Из полученного состава методом горячего экструдирования осуществлялась формовка филамента со средним диаметром 1,75 мм.

Для измерения комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости в СВЧ диапазоне использовалась коаксиальная волноводная ячейка и векторный анализатор цепей Р4М-18 («Микран», Россия).

Полученные экспериментальные результаты показали, что с увеличением концентрации карбонильного железа наблюдается небольшой рост значения как магнитной, так и диэлектрической проницаемости. На частотной зависимости комплексной магнитной проницаемости вплоть до 6 ГГц у полимерных композитов, содержащих карбонильное железо, наблюдается резкий спад действительной части магнитной проницаемости. При этом на мнимой части магнитной проницаемости имеются небольшие максимумы в районе 1-2 ГГц, а также выше 10 ГГц. Подобное поведение магнитной проницаемости обусловлено резонансными магнитными свойствами наполнителя в исследуемом материале. У частиц карбонильного железа проявляются резонанс доменных границ (в районе 1-2 ГГц) и естественный ферромагнитный резонанс, который растягивается на диапазон от 1 ГГц до десятков ГГц, при этом частично накладываясь на резонанс доменных границ.

На частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости никаких особенностей не наблюдается. При этом величина ϵ' достигает 3,5 отн. ед., а ϵ'' 0,25 отн. ед. Это обусловлено в значительной степени упругими типами поляризации полимерной матрицы ТПУ ($\epsilon' = 2,7$ отн. ед., $\epsilon'' = 0,15$ отн. ед.) и межслоевой поляризацией, которая возникает из-за различия в электропроводности и диэлектрической проницаемости частиц карбонильного железа и связующего вещества.

Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-20174, <https://rscf.ru/project/25-29-20174/> и средств Администрации Томской области.

Список публикаций:

- [1] Ryan K. R., Down M. P., Hurst N. J., Keefe E. M., Banks C. E. Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications // EScience. 2022. Vol. 2. No 4. P. 365-381.
- [2] Selivanov K. V., Yakimov A. O., Volkov G. A., Lyskov D. S. Prospects of Design of Electronic Equipment Enclosures by Means of Additive Technologies // In 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE. 2024. P. 1-5.
- [3] Zhang C., Li X., Jiang L., Tang D., Xu H., et al. 3D printing of functional magnetic materials: From design to applications // Advanced Functional Materials. 2021. Vol. 31. No. 34. P. 2102777.
- [4] Vertoprakhov I. A., Kuleshov G. E., Elyasov A. N., Badin A. V., Pidotova D. A., Frolova D. A. Composite Polymer Material Based on Hexaferrite with Selective Absorption in the EHF Range for 3D-Printing Technology // In 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, EDM. 2023. P. 210-214.

Моделирование патч-антенны дециметрового диапазона для возбуждения колебаний в камере СВЧ отогрева обморожений

Смыгалина Полина Павловна

Томский государственный университет

E-mail: polina.smygalina@stud.tsu.ru

Отморожение конечностей остается одним из массовых заболеваний, наблюдаемых не только в Арктической зоне и в странах с холодным климатом, но и в близких к экватору широтах в высокогорных районах и станциях [1, 2, 3]. Известна методика лечения обморожений, основанная на тепловом воздействии СВЧ поля на диэлектрические объекты с высоким тангенсом угла диэлектрических потерь, в частности на биологические объекты [4, 5].

Как вариант переносной установки для лечения обморожений ранее была представлена камера отогрева конечностей, в основу которой заложен резонатор, возбуждаемый на частоте ниже критической [6, 7]. В качестве элемента связи в данной камере использовалась петлевая антенна в виде объемной ленты. Недостатками данной антенны являются её громоздкие размеры и, что более важно, неудовлетворительный уровень согласования генератора с резонатором, о чем свидетельствовало значение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) больше двух [7]. Поэтому профессором Буяновым Ю.И. и профессором Дунаевским Г.Е. предложено использование конструкции патч-антенны для возбуждения основного типа колебаний в рассматриваемом резонаторе. Причем важным условием является то, что возбуждение устойчивых колебаний должно происходить только при помещении в камеру достаточно большого по объему диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости ϵ . В рассматриваемом случае в роли такого диэлектрика выступает конечность человека. Пустой же резонатор должен в свою очередь оставаться запертым для возбуждаемой частоты колебаний.

С целью рассмотреть эффективность возбуждения поля патч-антенной было проведено моделирование электромагнитных и тепловых полей в камере с помещенной внутрь неё конечностью в среде CST Studio Suite.

На рис. 1а представлен внешний вид камеры, на рис. 1б – внешний вид патч-антенны. Размеры камеры 17х34х50 см. Указанные размеры резонатора являются близкими к критическим для колебаний частотой 433 МГц (длина волны 69,2 см). Размеры патча 16,4х12,6 см, расстояние фидера от края патча 5,63 см. Толщина диэлектрической подложки патча составляет 3 см, ϵ материала подложки равняется 4.

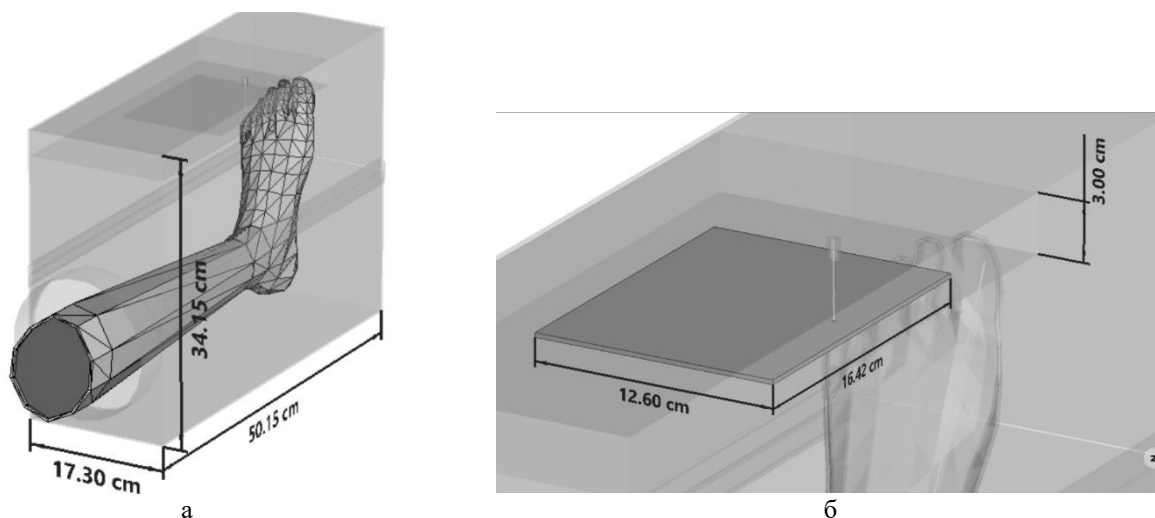


Рис. 1 Внешний вид камеры (а) и патч-антенны (б) с указанием габаритных размеров

В качестве отогреваемого объекта использовалась модель фантома ноги мужчины объемом 3,4 дм³. Биофизические параметры материала фантома, такие как диэлектрическая проницаемость, электропроводность, теплопроводность, плотность и другие, соответствуют таковым для мышечной ткани [8, 9]. Частота возбуждаемых колебаний 433 МГц, мощность генератора 20 Вт. Для пустой камеры КСВН составил 9,5, что подтверждает запертый характер резонатора для данной частоты. При помещении в камеру фантома мужской ноги КСВН уменьшается до 1,2, что демонстрирует улучшение согласования при помещении в полость камеры диэлектрического фантома.

Проекция электрической компоненты поля в среднем продольном разрезе камеры представлена на рис. 2. Данная картина поля позволяет оценить области наибольшей концентрации поля во время воздействия ДМВ полем. Хорошо видно поглощение энергии в области голени, пятки, в то время как в пальцах поглощения практически не наблюдается. Однако, поскольку пальцы часто подвержены перегреву, что может привести к изампутации [1, 4], такой результат является положительным.

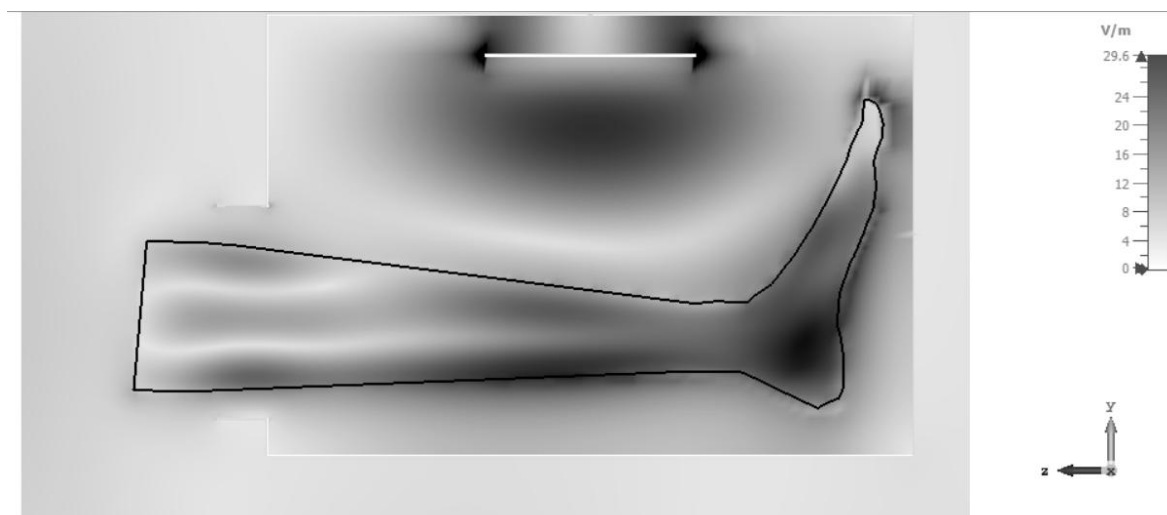


Рис. 2 Проекция электрической компоненты поля

На основе полученного распределения поля рассчитана мощность диэлектрические потери в объеме фантома, которая впоследствии использована для построения температурного поля. Начальная температура конечности 5 °С, температура окружающего воздуха 24 °С. Результаты расчета температурных профилей представлены на рис. 3.

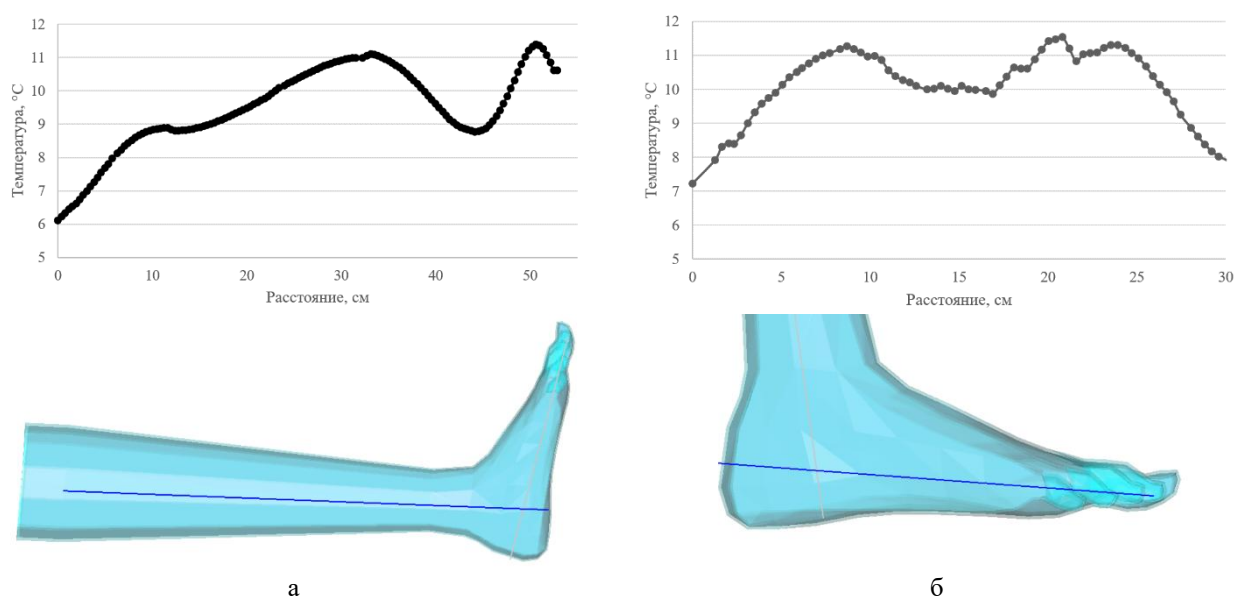


Рис. 3 Температурное распределение вдоль ноги (а) и вдоль стопы (б) после 15 минут СВЧ воздействия

Рассчитанные распределения температурного поля показывают, что за 15 минут наблюдается повышение температуры вдоль голени и вдоль стопы в среднем до 11,5 °С. При этом максимальная неоднородность температуры составляет около 5 °С. Возможным решением этой проблемы может стать нагрев сеансами, который позволит выровнять температуру вдоль конечности за счет собственных процессов теплопередачи.

- [1] Basit H, Wallen TJ, Dudley C. Frostbite. 2023 Jun 26. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. PMID: 30725599.
- [2] Harirchi I, Arvin A, Vash JH, Zafarmand V. Frostbite: incidence and predisposing factors in mountaineers. *Br J Sports Med*. 2005 Dec;39(12):898-901; discussion 901. doi: 10.1136/bjsm.2004.016097. PMID: 16306495; PMCID: PMC1725087.
- [3] Gavrilin E.V., Dunaevskiy G.E., Antipov V.B. Microwave treatment of cold injuries // *Journal of Emergencies, Trauma and Shock*. 2021. vol. 14, no. 2. pp. 108–110
- [4] Dunaevskiy G.E., Nechaev A.N., Smygalina P.P., Dorofeev I.O. Ch. 2. Microwave Rewarming of Limb Frostbite Injuries (Simulation of Modes) // *Microwave Technologies - Recent Advances and New Trends and Applications*. London, UK: IntechOpen Limited, 2023. Ch. 2.
- [5] Salsi B, Fusco I, Pieri L. Microwave Therapy for Frostbite Management: A Case Series. *J Med Cases*. 2023 Jun;14(6):213-216. doi: 10.14740/jmc4115. Epub 2023 Jun 29. PMID: 37435105; PMCID: PMC10332874.

- [6] Смыгалина П.П. Влияние СВЧ-нагрева на изменение внутренней температуры фантомов конечностей человека // Двадцать первая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов. Томск, 13–17 мая 2024 г. : сборник трудов. – Томск : STT, 2024. –134 с.
- [7] Smygalina P.P., Dunaevskiy G.E. VSWR of a Volumetric Resonator With Human Limb Phantoms of Various Sizes Placed in It // 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024): Abstracts. — Tomsk : Academizdat Publishing, 2024. — 684 p
- [8] Sasaki K, Porter E, Rashed EA, Farrugia L, Schmid G. Measurement and image-based estimation of dielectric properties of biological tissues -past, present, and future. *Phys Med Biol.* 2022 Jul 8;67(14). doi: 10.1088/1361-6560/ac7b64. PMID: 35732164.
- [9] Rossmann C, Haemmerich D. Review of temperature dependence of thermal properties, dielectric properties, and perfusion of biological tissues at hyperthermic and ablation temperatures. *Crit Rev Biomed Eng.* 2014;42(6):467-92. doi: 10.1615/critrevbiomedeng.2015012486. PMID: 25955712; PMCID: PMC4859435.

Некоторые факты истории и новые возможности активных антенных устройств в виде аппликаторов

Юрченко Василий Иванович

Беличенко Виктор Петрович

Томский государственный университет

Первая интегрированная антенна описана в книге Электрические волны Генриха Герца 1893 г в виде его передатчика. Наибольший импульс развитию активных микрополосковых антенн (АМПА) дала полупроводниковая электроника с 1960г, и особенно интегральная технология с 1980г.

В настоящее время опубликовано множество работ, связанных с разработкой, анализом, моделированием антенн, применительно к задачам радиометрии, выявлению злокачественных опухолей, прогнозированию инсультов. Основываясь на приведенных в статьях габаритных размерах антенн, используя принцип электродинамического подобия, можем оценить размеры каждой из рассмотренных антенн, если бы они были рассчитаны на требуемую частоту.

Поскольку функция антенны заключается в сборе излучения биологически активных точек (БАТ), желательно, чтобы антенна имела круговую, а не линейную поляризацию, для того, чтобы антенна принимала больше энергии излучения, которое по своей природе случайно поляризовано.

Методология создания АМПА может быть классифицирована по нескольким базовым, принципиальным схемно-конструктивным подходам. Эти методы обладают высокой эффективностью, однако, приводят к усложнению и удорожанию конструкций микрополосковых антенн. Вследствие этого обычно выбирается конструкция состоящая из простейших высокотехнологичных и дешевых при изготовлении однослойных планарных излучающих элементов, а именно простейших излучателей прямоугольной, дисковой, кольцевой, спиральной и треугольной форм.

Практическая реализация АМПА используется в аппликаторах медицинского назначения наиболее развитых в Томске в фирме Спинор (Кожемякин АВ), Фрязино ФИРЭ (Девятков Н.Д.), в Саратове СГУ (Усанов). Как правило, источник и приемники зондирующих сигналов размещаются в антенне, а системы обработки полученных сигналов находятся во внешней аппаратуре. АМПА также реализуется в автодином режиме.

Несмотря на большое разнообразие исследований (не менее 15 диссертаций и сотни работ) конструкций зондов, в том числе АМПА проблема **количественного** измерения характеристик БАТ до сих пор остаётся нерешённой задачей для диагностики. Это обусловлено необходимостью учета многих физических факторов:

- геометрические размеры и материал подложки;
- характеристика активного элемента;
- паразитная реактивная составляющая контактов с активным элементом;
- возбуждение поверхностных волн в диэлектрике;
- многомодовое взаимодействие между элементами.

Для вычисления полей электрически малых апертур не применима классическая теория дифракции Кирхгофа т. к. с уменьшением апертуры до размеров порядка λ неточность теории из-за нарушения граничных условий на окружающей апертуру поверхности значительно искажает решение, из-за того что большая часть энергии, проникающей из антенны, остаётся в ближней зоне. Это означает, что значительную долю в пространственном спектре поля составляют не распространяющиеся (квазистатические) компоненты, хотя в литературе описаны и иные механизмы поведения поля в ближней зоне, высшие многочастотные типы волн локализованные в ограниченном объеме, поверхностные волны, плазмонные волны, интерференционные потоки энергии.

Наиболее интересные направления развития

- Получение распределения полей в диаграммах комбинаторных антенн, в том числе при различных конфигурациях и размерах в поперечном направлении
- Выбор облика и оптимизация АМПА с расчетом всех элементов АМПА
- Моделирование функций кристалла квазипланарного типа диода Ганна
- Электродинамика переходных процессов установления взаимодействия ЭМИ и объекта



ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

АПР 2025
16-18 сентября 2025
Томск, Россия

Цифровое моделирование текстурированных кремниевых двухсторонне-чувствительных солнечных элементов

Алиев Райимжон Усманович,
Мирзаалимов Авазбек Алишерович, Алиев Сухроб Райимжонович
Андижанский государственный университет
E-mail: alievuz@yahoo.com

Использование возобновляемых источников энергии для удовлетворения энергетических потребностей становится актуальным. Среди возобновляемых источников энергии большую долю занимает солнечная энергия. Солнечные элементы в основном используются для преобразования солнечной энергии в электричество. В настоящее время электроэнергия от солнечных элементов составляет 4,5% от мировой электроэнергии [1].

Повышение эффективности солнечных элементов и снижение их стоимости является одной из основных задач сегодняшнего дня. Максимальный КПД солнечных элементов достиг 39,5% [2]. В промышленности 96% солнечных элементов изготавливаются из кремния [3]. Поскольку кремний является одним из самых распространенных материалов на Земле, КПД солнечного элемента на основе кремния составляет 29% по теории Шокли-Квайцера [4], а в эксперименте [5] равен 26,8%. Оптимальная толщина солнечного элемента на основе кремния в промышленности составляет 175 мкм [6]. Для дальнейшего снижения стоимости солнечного элемента лучше использовать материалы с высоким коэффициентом поглощения в тонких слоях. Одним из таких материалов является перовскит. Перовскитные солнечные элементы очень легко синтезировать, а их эффективность выше, чем у солнечных элементов на основе кремния. Но их стабильность очень низка, поэтому они не производятся на промышленном уровне.

Поскольку почти все заводы по производству солнечных элементов основаны на кремнии, ученые заинтересованы в создании tandemных солнечных элементов на основе кремния. В солнечных элементах в основном есть 3 типа потерь: оптические, электрические и тепловые. Оптические потери включают отражение света от поверхности, паразитное поглощение, спектральные рассогласования. Для уменьшения количества света, отраженного от поверхности, используются оптические слои из SiO_2 , а SiN_x , MgF_2 и TiO_2 , а также текстуры. При создании текстуры также уменьшается глубина поглощения света, что позволяет уменьшить толщину солнечного элемента. Спектральное рассогласование устраняется путем формирования tandemных структур различных полупроводников в порядке уменьшения ширины запрещенной зоны. Согласно теории, эффективность tandemного солнечного элемента с бесконечным слоем может достигать 68,7%. Tandemные структуры также предотвращают паразитное поглощение. Поскольку высокоэнергетические фотоны поглощаются в слое с большой шириной запрещенной зоны, более вероятно, что высокоэнергетические электроны достигнут контактов без термализации. Кроме того, спектральное несоответствие также было уменьшено путем введения металлических наночастиц в p-область солнечной ячейки. Наночастица поглощает инфракрасный свет и излучает свет в видимом диапазоне, то есть она изменяет световой спектр. Поэтому спектр поглощаемого солнечной ячейкой света расширяется. Чтобы уменьшить количество рекомбинации в солнечных элементах, передняя и задняя стороны покрываются пассивирующими материалами. Поскольку поверхность солнечной ячейки становится активной из-за оборванных связей, скорость рекомбинации высока. Когда солнечный элемент нагревается, эффективность и напряжение разомкнутой цепи резко уменьшаются. Было рекомендовано множество конструкций охлаждения для предотвращения перегрева. Солнечный свет, падающий на солнечную панель, в основном делится на два спектра: прямой и рассеянный. Рассеянный свет образуется за счет рассеяния солнечного света в молекулах воздуха и его отражения от земли. Промышленно производимые солнечные элементы в основном односторонние, а задняя сторона покрыта сплошным металлическим контактом. Выполнив задний контакт в виде сетки и покрыв его оптическим слоем, можно сформировать двусторонний солнечный элемент. Поскольку инфракрасные лучи в основном поглощаются металлическими контактами, тепловые свойства солнечного элемента можно улучшить, выполнив задний контакт в виде сетки. Кроме того, прямой свет в основном падает на переднюю сторону солнечного элемента, а рассеянный свет - на заднюю. То есть, есть возможность преобразовать рассеянный свет в электричество. Кроме того, нет большой разницы между стоимостью односторонних и двусторонних солнечных элементов. Следовательно, важно исследовать и оптимизировать двусторонние солнечные элементы. Поэтому в этой работе двусторонний текстурированный солнечный элемент был исследован путем цифрового моделирования для геометрической оптимизации (текстуры).

Четыре инструмента программы Sentaurus TCAD были использованы для изучения двусторонней солнечной ячейки: Sentaurus Device, Sentaurus Structure Editor, Sentaurus Visual или Sentaurus Workbench. Для создания геометрической модели в Sentaurus Structure Editor код написан на Tool Command Language (TCL). Чтобы обеспечить одинаковую интенсивность света на передней и задней стороне, на дне солнечного элемента был установлен серебряный отражатель с углом 90° . Свет, падающий на открытую поверхность шириной L , направляется перпендикулярно задней стороне солнечного элемента с помощью серебряного отражателя. В качестве источника света были выбраны прямой AM1.5 и диффузный AM1.5 спектр. Для пассивации передней и задней стороны солнечного элемента и уменьшения коэффициента отражения обе стороны покрыты слоем SiO_2 толщиной 100 нм. Толщина эмиттерной и базовой областей модели солнечного элемента составляет 1 мкм и 18,35 мкм соответственно. Ее ширина составляет 20 мкм. Атомы фосфора с $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и атомы бора с $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$

легированы в эмиттерную и базовую области соответственно. Толщина 200 нм высоколегированной n^{++} ($1 \times E18 \text{ см}^{-3}$) на верхней части эмиттера и p^{++} ($1 \times E16 \text{ см}^{-3}$) слой на нижней части основания были сформированы для обеспечения хорошей транспортировки электронов и дырок к контактам. Текстуры создавались на передней и задней сторонах одновременно. Ширина текстур составляет 1 мкм и не изменялась во время исследования. Высота текстуры изменяется от 0,1 мкм до 1,9 мкм с шагом 0,1 мкм для изменения угла на основе текстур. Кроме того, случай, когда высота текстуры составляет 0 мкм, рассматривался как плоский солнечный элемент. Система была разбита на сетки 2 разных размеров для повышения эффективности вычислений и достижения сходимости. Сначала все области были разбиты на сетки с одинаковым размером 0,5 мкм в направлениях x и y . Области p - n -перехода, контакта и высоколегированной примеси были сшиты в направлениях x и y с более мелким размером 0,05 мкм и 0,01 мкм соответственно.

Путем построение расчетных ВАХ и вычисления основных фотоэлектрических параметров кремниевых солнечных элементов с различными геометрическими размерами текстуры при условиях освещения фронтальной, тыльной и одновременно двух сторон оптимизированы текстуры. Затем сравниваются фотоэлектрические параметры оптимально текстурированного и планарного солнечного элемента в условиях фронтального, тыльного и двухстороннего освещения. На рис. 1 показаны ВАХ фронтально-, тыльно- и двухсторонне освещенных планарных (b) и оптимально текстурированных (a) солнечных элементов. Почти во всех случаях качество функциональной кривизны ВАХ одинаково. На качество кривой ВАХ в основном влияют последовательное сопротивление и параллельное сопротивление.

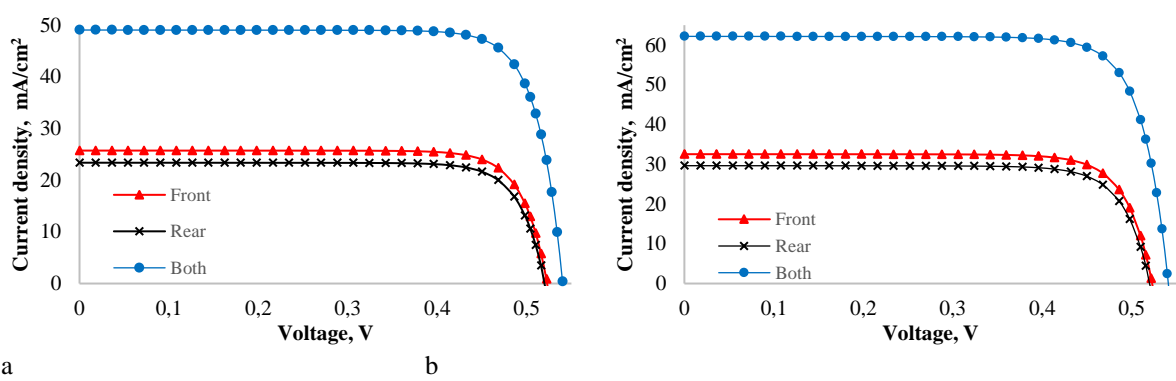


Рис. 1. ВАХ солнечного элемента с оптимальной текстурой (a) и с планарной конструкции (b) при фронтальной, тыльной и двухсторонней освещении

Таким образом, последовательное и параллельное сопротивления не изменялись существенно, когда свет падает спереди, сзади и с обеих сторон. Солнечный элемент можно сравнивать качественно на основе ВАХ, но не количественно. Поэтому, используя I - V характеристики, изображенные на рис. 1, были определены фотоэлектрические параметры, перечисленные в таблице 1. Напряжение разомкнутой цепи планарного и текстурированного солнечного элемента изменялось почти на одинаковую величину при различных условиях освещения. Коэффициент заполнения также уменьшался для планарного и текстурированного солнечного элемента в порядке условий переднего, заднего и двухсторонних освещений. Однако коэффициент заполнения планарного солнечного элемента был выше при всех условиях освещения.

Таблица 1.

Основные фотоэлектрические параметры солнечного элемента с оптимальной текстурой (a) и с планарной конструкции (b) при фронтальной, тыльной и двухсторонней освещении

	Фронтальное освещение		Тыльное освещение		Двустороннее освещение	
	Planar	Tekstura	Planar	Tekstura	Planar	Tekstura
$J_{sc}, \text{mA/cm}^2$	25.73	32.54	23.38	29.64	49.06	62.18
U_{oc}, V	0.528	0.528	0.522	0.522	0.546	0.546
FF, %	79.55	78.44	79.96	78.78	79.83	79.05
η , %	17.07	21.29	15.42	19.26	16.89	21.20

Поскольку солнечный элемент текстурирован, его активная поверхность увеличивается, поэтому увеличивается поверхностная рекомбинация. Поскольку коэффициент заполнения указывает на качество поверхности, на него отрицательно влияет увеличение поверхностной рекомбинации. Самый высокий коэффициент заполнения 79,96% был достигнут планарным солнечным элементом при заднем освещении. Поскольку концентрация входных атомов в области эмиттера и базовой области в 100 раз отличается. Поверхностная рекомбинация также является типом рекомбинации Шокли-Рида-Холла (SRH), которая зависит от исходной концентрации. Поэтому активность передней поверхности, то есть величина поверхностной рекомбинации, выше, чем задней поверхности.

В данной работе исследовался двусторонний солнечный элемент. Передняя и задняя стороны двустороннего солнечного элемента покрыты текстурами одинакового размера. Оптимальное значение угла основания текстур составляет 580. Влияние диффузии и прямого света на плоскую и оптимально кремния в солнечном элементе

увеличивается, что приводит к увеличению общего внутреннего сопротивления солнечного элемента. Следовательно, напряжение разомкнутой цепи уменьшается. Коэффициент заполнения уменьшился в среднем на 1,65% в плоском солнечном в среднем на 3,48% в текстурированном солнечном элементе.

Коэффициент заполнения - это величина, тесно связанная с поверхностной рекомбинацией и концентрацией поглощенных фотонов. Поскольку активная поверхность текстурированного солнечного элемента больше, чем у плоского солнечного элемента, количество поверхностной рекомбинации пропорционально площади поверхности. Поэтому коэффициент заполнения текстурированного солнечного элемента на 2% ниже, чем у плоского солнечного элемента. Эффективность плоского солнечного элемента при освещении рассеянным светом была в 1,29 раза ниже, чем при освещении прямым светом во всех условиях освещения. Эффективность текстурированного солнечного элемента была в 1,34 раза ниже. Даже в этом случае снижение эффективности в текстурированном солнечном элементе до большего значения можно объяснить разницей между поверхностной рекомбинацией. Последние два столбца таблицы 2 можно принять за фотоэлектрические параметры плоского и текстурированного двустороннего солнечного элемента в пасмурный день. Ток короткого замыкания в случае, когда обе стороны были освещены диффузным светом, был в 1,9 раза выше, чем ток короткого замыкания в случае, когда была освещена только передняя сторона. В некоторых работах последних лет [7-9] было установлено, что выходная мощность двустороннего солнечного элемента на 20,1-68,1% выше, чем у традиционного солнечного элемента.

Список публикаций:

- [1] Renewable electricity capacity additions by technology and segment, 2016-2028 – Charts – Data & Statistics – IEA (2024).
- [2]. R.M. France, J.F. Geisz, T. Song, W. Olavarria, M. Young, A. Kibbler, M.A. Steiner, *Joule* 6 No 5, 1121 (2022).
- [3] Renewables 2023 – Analysis – IEA (2023).
- [4] A. R. Zanatta, *Results in Optics* 9, 100320 (2022).
- [5] M. A. Green, E.D. Dunlop, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, G. Siefer, X. Hao, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 31 No 7, 651 (2023).
- [6] D. Rached, H.M. Yssaad, W.L. Rahal, J. Nano- Electron. Phys. 10 No 5, 05012 (2018).
- [7] Rayimjon Aliyev, Oybek Bozarov, Dilshod Kodirov, Jamshid Kaxxorov, Dilnoza Xonbutayeva Study on photovoltaic characteristics of bifacial solar panels. // 01016 (2024). E3S Web of Conferences. 497. ICECAE 2024, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449701016>
- [8] R. Aliev, M. Komilov, N. Mirzaalimov, A. Mirzaalimov, S. Alive, I. Gulomova, J. Gulomov Textured Bifacial Silicon Solar Cells Under Various Illumination Conditions. // JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS. Vol. 16 No 5, 05025(10pp) (2024). [https://doi.org/10.21272/jnep.16\(5\).05025](https://doi.org/10.21272/jnep.16(5).05025).
- [9] Aliev, R., Komilov, M., Aliev, S., & Gulomova, I. (2024). Comparative analysis of conventional and bifacial solar cells under various illumination conditions. // *Physics and Chemistry of Solid State*, 25(4), 844–852. <https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.844-852>

Приемный модуль для беспроводной УФ-связиАлмаев Дмитрий Александрович^{1,2}Копьев Виктор Васильевич¹, Цымбалов Александр Вячеславович¹¹Томский государственный университет²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: almaev001@mail.ru

Беспроводная ультрафиолетовая связь (УФС) обладает высокой пропускной способностью, которая позволяет передавать большие объемы данных на высоких скоростях. Коротковолновое излучение может эффективно рассеиваться и отражаться частицами и аэрозолями в воздухе за счет рэлеевского рассеяния. Дальность передачи данных с использованием УФС может достигать нескольких км и не зависит от особенностей рельефа местности. УФС защищена от фоновых помех благодаря тому, что излучение в диапазоне длин волн $\lambda = 200\text{--}280\text{ нм}$ не достигает поверхности Земли из-за поглощения озоновым слоем в верхних слоях атмосферы. УФС обеспечивает конфиденциальность и защиту передаваемых данных [1–5].

Есть ряд широкозонных полупроводниковых материалов, которые могут быть использованы в качестве чувствительного элемента приемного модуля для УФС, но наиболее оптимальным считается оксид галлия [6–8]. Ga_2O_3 является ультраширокозонным ($E_g = 4.4\text{--}5.3\text{ эВ}$) полупроводником n -типа проводимости, который имеет уникальные физико-химические свойства, удовлетворяющие требованиям современной электроники. В настоящее время Ga_2O_3 находит широкое применение в различных областях: силовая электроника, газовая сенсорика, прозрачные электроды, фотоприемники и т.д. [9]. Наибольший интерес представляет исследование и разработка солнечно-слепых фотоприемников УФ-излучения, что обусловлено наиболее подходящим значением E_g , селективностью и внутренним усилением [6–8].

Пленки Ga_2O_3 были получены методом ВЧ-магнетронного распыления мишени Ga_2O_3 (99.999%) на гладкие сапфировые подложки на установке AUTO-500 (Edwards) в газовой смеси Ar/O_2 . Напыление пленок происходило в течение 40 мин. Концентрация кислорода в смеси поддерживалась равной $56.1 \pm 0.5\text{ об. \%}$. Расстояние между мишенью и подложкой составляло 70 мм. Давление в камере во время напыления поддерживалось равным 7×10^{-6} бар. Преднамеренного легирования пленок в процессе роста не проводилось. На следующем этапе подложка с пленкой отжигалась в аргоне при температуре 900 °С в течение 30 мин. Далее на поверхности пленок Ga_2O_3 формировались Pt-контакты со встречно-штыревой топологией с межэлектродным расстоянием 30 мкм.

Значения постоянных времени характеризуются как температурной, так и полевой зависимостью. Сумма постоянных времени не превышает 300 мс для всех значений температур T и напряжений. Данная величина характеризует быстродействие фотоприемника и определяет максимальную частоту приема импульсов без учета вспомогательной электроники. Стоит отметить, что при $T = 350\text{ К}$ наблюдается максимум фоточувствительности, при той же температуре сумма постоянных времени минимальная. В таком случае, можно говорить о наличии оптимальных температурных условий работы фотоприемника на основе $\text{Pt}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$. С напряжением зависимость обратная и его следует подбирать из заданных требований. Более подробно характеристики данной структуры будут рассмотрены в других работах.

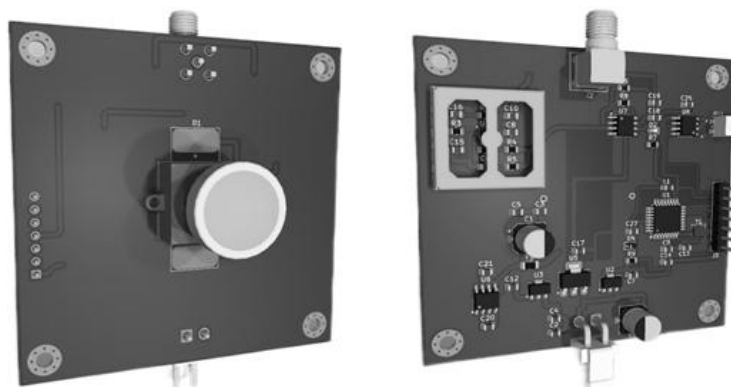


Рис.1 Макет приемного модуля для УФС на основе Ga_2O_3

Разработан приемный модуль для УФС (рис.1), который включает в себя четыре основных блока: контроля питания, чувствительного элемента ($\text{Pt}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$), связи «усилитель-компаратор» и контроллера для управления уровнем компаратора. При использовании данного чувствительного элемента в приемном модуле для УФС удается получить выходные импульсы напряжения с частотой до 100 кГц (рис.2).

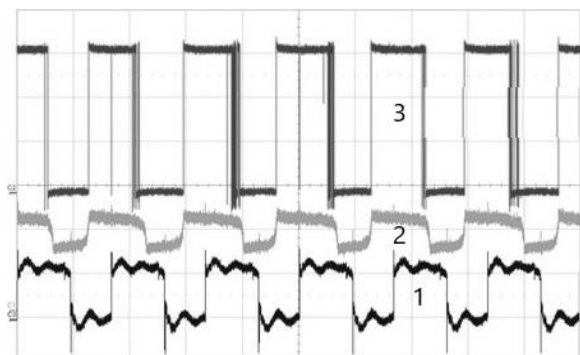


Рис.2 Осциллограммы приемного модуля для УФС на основе Ga_2O_3 . 1 – импульсы на светоизлучающем диоде; 2 – сигнал на выходе усилителя; 3 – сигнал на выходе компаратора. Масштаб – 10 мкс на клетку.

В работе рассмотрены основные достоинства беспроводной УФ-связи, показан перспективный материал для ее реализации и описана технология его получения. Исследована фоточувствительность и быстродействие структур $\text{Pt}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ в широком интервале температур и напряжений. Показана возможность подбора оптимальных внешних параметров для эффективной работы фотоприемника. Разработан и протестирован приемный модуль для беспроводной УФ-связи. При использовании данного модуля удастся получить выходные импульсы напряжения с частотой до 100 кГц.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0021.

Список публикаций:

- [1] Xu Z., Sadler B. M. // IEEE Communications Magazine 2008, Vol. 46, № 5, pp. 67-73.
- [2] Vavoulas A., Sandalidis H. G., Chatzidiamantis N. D., Xu Z., Karagiannidis, G. K. // IEEE Communications Surveys & Tutorials 2019, Vol. 21, № 3, pp. 2111-2133.
- [3] Yuan R., Ma J. // China Communications 2016, Vol. 13, № 6, pp. 63-75.
- [4] Guo L., Guo Y., Wang J., Wei T. // Journal of Semiconductors 2021, Vol. 42, № 8, P. 081801.
- [5] Kedar D., Arnon S. // Optical Engineering 2009, Vol. 48, № 4, P. 046001.
- [6] Chen X., Ren F., Gu S., Ye J. // Photonics Research 2018, Vol. 7, № 4, pp. 381-415.
- [7] Hou X., Zou Y., Ding M., Qin Y. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020, Vol. 54, P. 043001.
- [8] Kaur D., Kumar M. // Adv. Opt. Mater. 2021, Vol. 9, № 9, P. 2002160.
- [9] Pearton S.J., Yang J., Cary P.H. // Appl. Phys. Rev. 2018, Vol. 5, P. 011301.

Экспериментальная проверка работоспособности макета бесконтактного энкодера на основе эффекта Доплера

Карлова Гелия Фёдоровна

Егунов Михаил Серафимович, Белозерова Екатерина Алексеевна

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: karlovagf@yandex.ru, ekaterina.a.belozerova@tusur.ru

Введение. Для измерений перемещений различных объектов разработаны электронные устройства - энкодеры. Их принцип работы заключается в преобразовании механического перемещения в электрические сигналы, обычно в цифровой форме, которые позволяют узнать точное положение объекта в пространстве, скорость или угол его поворота. Большая часть этих приборов работает при механическом соединении энкодера с объектом наблюдения, что существенно ограничивает область применения. В нашей работе [1] показана возможность разработки бесконтактного энкодера на основе эффекта Доплера [2].

В предлагаемой статье приведены результаты расчётных и экспериментальных исследований макета бесконтактного энкодера на основе эффекта Доплера. Разработка бесконтактного (не имеющего механического контакта с объектом наблюдения) энкодера на основе эффекта Доплера предполагает в качестве опорного сигнала использование СВЧ колебания достаточно высокой частоты, чтобы обеспечить необходимую точность измерения.

Основные расчётные формулы бесконтактного СВЧ энкодера. Если приёмно-передатчик находится в опорной неподвижной системе координат K , а подвижный объект исследования (цель), находится в подвижной системе координат K_1 , то излученный передатчиком сигнал в направлении цели с опорной частотой F_0 воздействует на цель и отражается с частотой, равной F_d , отличной от переданной частоты F_0 (рис 1).

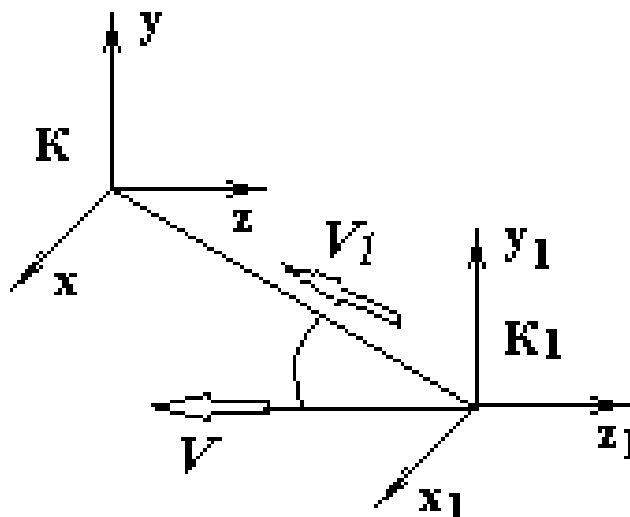


Рис.1. Взаимное расположение приёмопередатчика и цели

Изменение частоты обусловлено движением цели с некоторой скоростью V , что объясняется эффектом Доплера. Хорошо известна зависимость Доплеровской частоты от скорости движения приёмника или передатчика относительно друг друга. Релятивистская зависимость Доплеровской частоты для электромагнитных волн описывается формулой:

$$F_d = F_0 \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{(1-\beta)}, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{v}{c}$, c - скорость света в вакууме [2].

Таким образом, на цель будет воздействовать сигнал с частотой F_d . Отразившись от цели, он попадет на антенну приёмника, размещенного в неподвижной системе координат K . В соответствии с эффектом Доплера приёмник зарегистрирует сигнал с частотой $F = F_d \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{(1-\beta)}$. Подставляя значение F_d из (1) и учитывая, что при отражении фаза отраженного сигнала изменится на 180° , а также проведя несложные математические преобразования, получим, что:

$$F = F_0 \frac{(1+\beta)}{(1-\beta)}. \quad (2)$$

Если цель неподвижна, получим нулевые биения, т. е. частота F будет равна 0. Если цель движется, то на выходе смесителя приёмника будем наблюдать сигнал с частотой $F_r = F_0 - F$ или, подставляя значение F из (2), получим соотношение: $F_r = F_0 - F_0 \frac{(1+\beta)}{(1-\beta)}$, из которого следует, что:

$$F_r = \frac{-2F_0\beta}{(1-\beta)}. \quad (3)$$

Решая уравнение (3) относительно β , получим:

$$\beta = \frac{F_r}{(F_r - 2F_0)} \quad (4)$$

Так как $\beta = \frac{V}{c}$, получим выражение для скорости:

$$V = \frac{cF_r}{(F_r - 2F_0)} \quad (5)$$

Как следует из приведенных выше выражений, чем выше опорная частота F_0 , тем больше частота на выходе приемника Доплера и больше скорость перемещения цели. Для обеспечения надёжной работы устройства на расстояниях до 10 – 15 метров достаточна мощность излучения передатчика 10 – 20 мВт.

Экспериментальная проверка работоспособности макета бесконтактного энкодера на основе эффекта Доплера. Для определения координат объекта в двух направлениях необходимы 2 приёмо-передатчика. Использование для энкодера приёмо-передающего модуля (ППМ) СВЧ – диапазона на частоте 60 ГГц обсуждалось в работе [3]. В ней показано, что излучающая частота генератора может меняться от 59,5 до 63,5 ГГц в зависимости от напряжения на варикапе. Возможно использование передатчиков и приёмников ИК – диапазона. Структурная схема макета энкодера состоит из доплеровского передатчика и прибора, вычисляющего расстояние, погрешность измерения и отображающего результаты на графическом жидкокристаллическом дисплее. Принципиальная схема прибора для измерения перемещения объекта представлена на рис. 2.

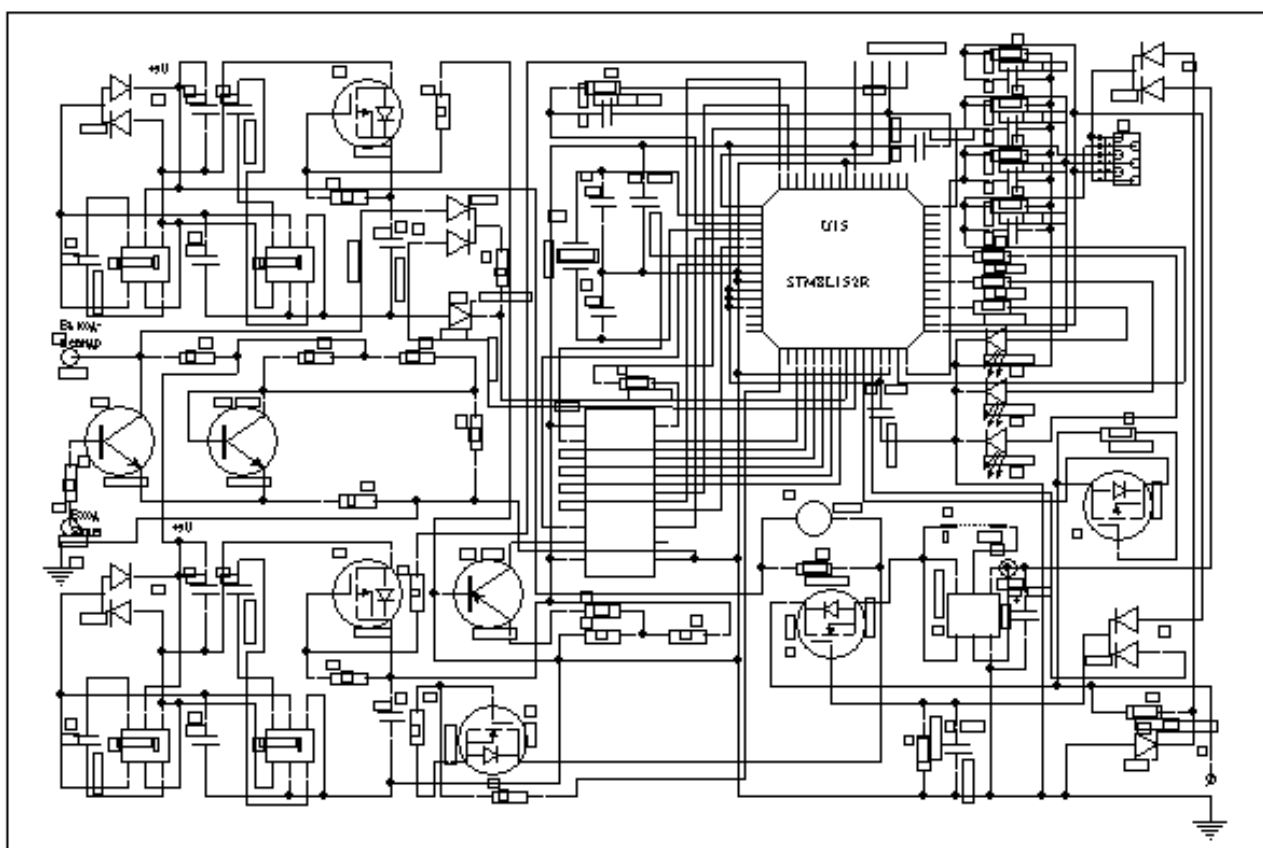


Рис.2 Принципиальная схема бесконтактного энкодера

Разработана плата для реализации принципиальной схемы. Сделан монтаж этой платы. Рисунок печатной платы представлен на рис. 3.

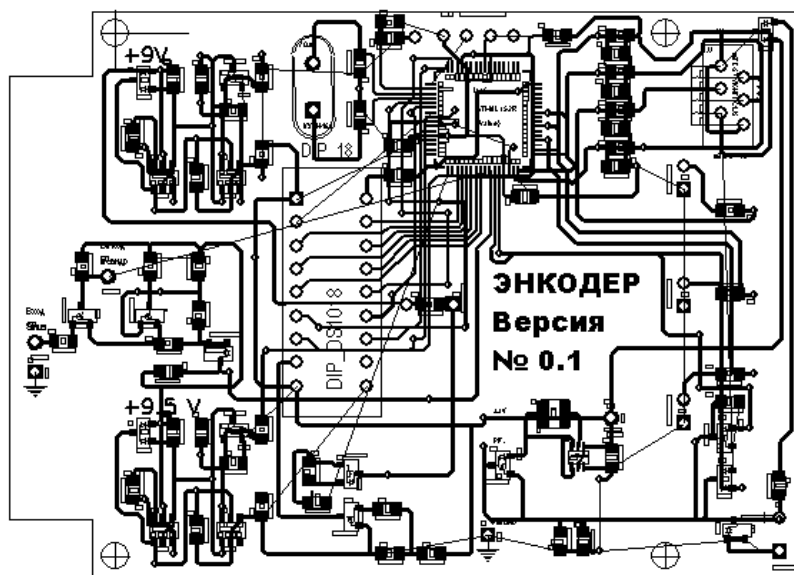


Рис.3 Печатная плата бесконтактного энкодера

Блок обработки сигнала представляет собой электронную схему, преобразующую периодический синусоидальный сигнал от ППМ (сигнал частоты Доплера) в прямоугольный сигнал той же частоты и вычисляющую по длительности прямоугольного импульса значение принятой частоты для передачи его через последовательный порт (порт USB) в ПК. Для оценки работоспособности схемы (независимо от типа приемо-передающего модуля) разработан источник периодического сигнала, находящийся внутри прибора (эмулятор), и разработана программа для расчёта скорости объекта и величины его перемещения с помощью эмулятора. Эмулятор работает на частоте 100 МГц. Нажимая на кнопку прибора и произвольно прекращая контакт, мы видим на дисплее время и соответственно скорость распространения. Меняя время воздействия (1,5; 3 и 5 с) мы считываем с дисплея расстояние L , которое равно 11,2 м, 22,5 м и 35 м. Скорость цели при этом будет равна $7,5 \pm 0,001$ м/с.

В работе получены с помощью моделирования расчетные данные скоростей цели по заданной частоте F_r , равной 1 ГГц. Эти данные позволили оценить погрешность энкодера на эффекте Доплера. В статье [1] показано, что от момента начала движения скорость нарастает и постепенно приближается к стационарной, а в момент остановки скорость начинает спадать до нуля. Очевидно, что на этих участках скорость мала. Однако, если осуществить предварительную калибровку прибора для определения стационарной скорости, то нарастание и спад скоростей на этих участках времени можно представить экспоненциальными функциями стационарной скорости. Определив частоту принятого сигнала, легко определить скорость движения цели по формуле (5). Ошибку определения перемещения цели в процентах определим как разницу между истинным перемещением цели и расстоянием, вычисленным умножением скорости, вычисленной по формуле (5), на время. Например, для микроконтроллера с частотой 1 МГц длительность, через которую делаются вычисления, равна 10^{-6} с. Истинное перемещение цели $S = 75$ м, а вычисленное - $S_z = 75,003$ м. Следовательно, ошибка в процентах составит 0.004 %. Эта ошибка вычислена для участка, где цель движется со стационарной скоростью. Программные вычисления показали, что при частоте 1 ГГц погрешность определения расстояния, составляет 5 мкм, если учитывать скорость только на стационарном участке. Добавки на участках роста и спада скоростей вследствие малой средней скорости дают прибавку порядка 5%.

Заключение.

1. Разработана принципиальная схема энкодера.
2. Разработана и изготовлена печатная плата энкодера.
3. Изготовлен макет энкодера.
4. Проведённые экспериментальные исследования макета СВЧ-энкодера на основе эффекта Доплера показали, что существует реальная возможность его построения, поскольку погрешность определения расстояния не превышает единиц микрон.

Список публикаций

- [1] Г.Ф. Карлова, Б.И. Авдоченко, М.С. Егунов, Е.А. Белозерова. // Бесконтактный энкодер на основе эффекта Доплера. Сборник трудов 10-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023» 26-29 сентября 2023 года, г. Томск, с.153
- [2] Сервотехника: Энкодеры // <https://www.servotechnica.ru/catalog/type/index.pl?id=118>
- [3] G.F. Karlova, M.S. Yegunov and E.A. Belozyorova. // "Using the EHF Transceiver Module for Designing Contactless Encoder," 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCT62929.2024.10874956. url: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10874956>.

КМОП микросхема фотоумножителя с зарядочувствительным усилителем**Копьев Виктор Васильевич***Прудаев Илья Анатольевич, Огородников Дмитрий Николаевич, Космачев Павел Владимирович**Томский государственный университет**E-mail: viktor.kopev@gmail.com*

Кремниевые фотоумножители (SiPM – silicon photomultiplier) являются высокочувствительными приемниками оптического диапазона. Они нашли свое применение в физике высоких энергий, где используются в составе с конверторами ионизирующего излучения в излучение видимого диапазона. За последнее десятилетие SiPM стали широко использоваться в схемах измерения времени пролета фотонов импульсных дальнометров и лидаров для беспилотного транспорта.

Благодаря внутреннему лавинному усилению SiPM обладают крайне высокой фоточувствительностью. Однако в схемах, применяемых на практике, всегда есть необходимость в использовании дополнительного усиления, что позволяет реализовать счетчик одиночных фотонов. В настоящей работе описан проект КМОП микросхемы, содержащей SiPM и зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) в одном кристалле. Интегрирование данных устройств в одну микросхему позволяет снизить размеры конечных устройств и расширить полосу пропускания за счет уменьшения паразитных реактивностей. Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW».

Микросхема разрабатывалась с использованием комплекса средств проектирования для технологии КМОП HCMOS8D 0.18 мкм. Фоточувствительная часть микросхемы представляла собой матрицу SPAD-детекторов 10x10 с размером единичной чувствительной области (пикселя) 54x57 мкм². SPAD-элемент содержал диод на основе *p-n*-перехода, конденсатор и гасящий резистор. Все SPAD-элементы включены параллельно для суммирования вклада в общий фототок от каждого пикселя на выходе SiPM.

Зарядочувствительный усилитель имеет в своем составе блок активной обратной связи, реализованный по схеме Krummenacher. Данный блок обеспечивает две функции. С одной стороны, он создает высокоомную разрядную цепь для емкости обратной связи ЗЧУ, с другой – реализует компенсацию тока утечки, поступающего на вход ЗЧУ. В усилителе предусмотрено два канала управления: первый (REF) задает выходной потенциал ЗЧУ, второй (IKR) – задает длительность выходного сигнала ЗЧУ. Компенсация тока утечки на входе усилителя составляет до 20 нА; предусмотрена плавная регулировка длительности выходного импульса напряжением на IKR в пределах 0.4-1.8 В; максимальная частота следования усиленных сигналов в схеме с обратной связью не менее 1 МГц.

Напряжение питания усилителя составляет +1.8 В, коэффициент усиления: не менее 0.8 В/пКл в полосе частот 350 МГц. Диапазон рабочих температур: +27°C ... +85°C. Результаты моделирования отклика усилителя на входной токовый импульс при различных условиях представлены на *рис. 1*. Моделирование проводилось для схемы, включающей паразитные параметры (т.е. после их экстракции из топологического представления микросхемы).

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект №2.5.4.25 МЛ.

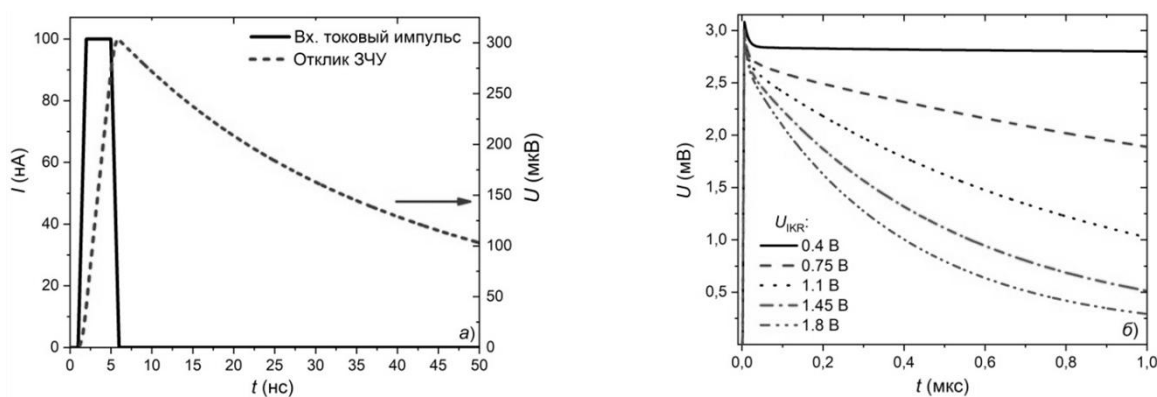


рис.1 Отклик усилителя на входной токовый импульс при $R_n = 100$ кОм и $U_{IKR} = 1,8$ В (а), отклик при различных напряжениях на канале управления IKR (б)

Частотная зависимость напряжения переключения S-диода*Кривоносова Виктория Евгеньевна**Прудаев Илья Анатольевич, Копьев Виктор Васильевич, Олейник Владимир Леонидович, Скакунов Максим Сергеевич, Сотникова Анна Сергеевна**Томский государственный университет**E-mail: krivonosovew@yandex.ru*

Настоящая работа посвящена исследованию характеристик силовых импульсных приборов, работающих на принципе замыкания электрической цепи в режиме лавинного пробоя — лавинных S-диодов. Интерес к коммутаторам подобного типа возник в связи с необходимостью создания импульсных источников тока, способных генерировать серии импульсов с короткими фронтами нано- и субнаносекундного диапазона. Основное их применение связано с разработкой лазерных дальномеров и лидаров, в которых передатчик генерирует мощный оптический импульс при накачке полупроводникового лазера токовым импульсом, а приемник измеряет время прихода отраженного от цели оптического импульса.

Метод импульсной дальнометрии предполагает многократное измерение расстояния с последующим усреднением результатов. В ходе измерений важно знать характер частотной зависимости амплитуды токовых импульсов, которые задаются напряжением переключения коммутатора и его сопротивлением в открытом (замкнутом) состоянии. В настоящей работе представлены результаты исследования частотных зависимостей напряжения переключения лавинного S-диода. Хотя в литературе и имеются сведения о данных частотных зависимостях, условия проведения измерений изложены недостаточно полно для их использования на практике или проведения физического анализа. Прежде всего это связано с применением ранее непрерывной генерации токовых импульсов, при которой обязательно должен наблюдаться нагрев приборного кристалла с ростом частоты коммутации. В современных системах дальнометрии генерация токовых импульсов производится в режиме пачек, когда кристалл не успевает значительно нагреться относительно окружающей среды.

В эксперименте использовались S-диоды из арсенида галлия с глубокими акцепторными центрами железа. Структуры из трех партий (№1, №2 и №3) получали методом газовой эпитаксии и диффузии железа. Кроме этого проводили измерение напряжения переключения лавинного биполярного транзистора без глубоких центров. На рис. 1 а показана схема проведения измерений. Управляющий импульс поступал на затвор высоковольтного полевого транзистора VT, что приводило к резкому росту напряжения (за 20-30 нс) на лавинном S-диоде SD (до $+HV = 200-300$ В). При достижении напряжения переключения S-диод переходил в открытое состояние, что сопровождалось резким снижением напряжения на конденсаторе C1. Таким образом, напряжение переключения в данной схеме соответствует амплитуде импульса напряжения на конденсаторе C1. На рисунке 1 б показаны экспериментальные зависимости напряжения переключения от частоты следования импульсов в пачке. Установлено, что с ростом частоты напряжение переключения начинает снижаться при достижении порогового значения 20-40 кГц. Данный эффект не связан с разогревом полупроводникового кристалла и объясняется перезарядкой глубоких центров железа. Анализ результатов показал, что после включения в локальной области S-диода (токовом шнуре) происходит быстрый захват лавинных дырок на отрицательно заряженные глубокие центры. Захват электронов, обуславливающий переход структуры к равновесному состоянию, происходит гораздо медленней и занимает от 0.1 до 1 мс. Таким образом, частотная зависимость напряжения переключения S-диодов обусловлена инерционностью процесса захвата неравновесных электронов в локальной области на нейтральные центры железа. В структуре без глубоких центров (лавинных биполярных транзисторах из арсенида галлия) значительное изменение напряжения переключения при увеличении частоты отсутствует вплоть до 500 кГц (рис. 1 б).

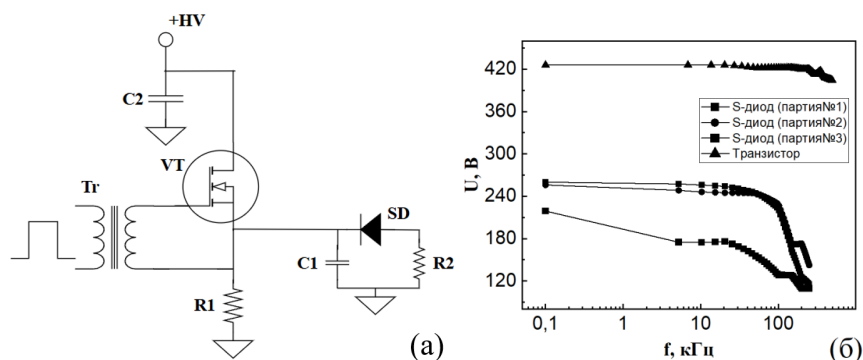


рис.1 Схема измерения напряжения переключения S-диода (а); зависимость напряжения переключения от частоты для диодов из различных партий и лавинного транзистора (б)

Частотная зависимость напряжения переключения S-диода**Кривоносова Виктория Евгеньевна**

Прудаев Илья Анатольевич, Копьев Виктор Васильевич, Олейник Владимир Леонидович, Скакунов Максим Сергеевич, Сотникова Анна Сергеевна
 Томский государственный университет
 E-mail: krivonosovew@yandex.ru

Настоящая работа посвящена исследованию характеристик силовых импульсных приборов, работающих на принципе замыкания электрической цепи в режиме лавинного пробоя — лавинных S-диодов. Интерес к коммутаторам подобного типа возник в связи с необходимостью создания импульсных источников тока, способных генерировать серии импульсов с короткими фронтами нано- и субнаносекундного диапазона. Основное их применение связано с разработкой лазерных дальномеров и лидаров, в которых передатчик генерирует мощный оптический импульс при накачке полупроводникового лазера токовым импульсом, а приемник измеряет время прихода отраженного от цели оптического импульса.

Метод импульсной дальнометрии предполагает многократное измерение расстояния с последующим усреднением результатов. В ходе измерений важно знать характер частотной зависимости амплитуды токовых импульсов, которые задаются напряжением переключения коммутатора и его сопротивлением в открытом (замкнутом) состоянии. В настоящей работе представлены результаты исследования частотных зависимостей напряжения переключения лавинного S-диода. Хотя в литературе и имеются сведения о данных частотных зависимостях, условия проведения измерений изложены недостаточно полно для их использования на практике или проведения физического анализа. Прежде всего это связано с применением ранее непрерывной генерации токовых импульсов, при которой обязательно должен наблюдаться нагрев приборного кристалла с ростом частоты коммутации. В современных системах дальнометрии генерация токовых импульсов производится в режиме пачек, когда кристалл не успевает значительно нагреться относительно окружающей среды.

В эксперименте использовались S-диоды из арсенида галлия с глубокими акцепторными центрами железа. Структуры из трех партий (№1, №2 и №3) получали методом газовой эпитаксии и диффузии железа. Кроме этого проводили измерение напряжения переключения лавинного биполярного транзистора без глубоких центров. На рис. 1 а показана схема проведения измерений. Управляющий импульс поступал на затвор высоковольтного полевого транзистора VT, что приводило к резкому росту напряжения (за 20-30 нс) на лавинном S-диоде SD (до $+HV = 200-300$ В). При достижении напряжения переключения S-диод переходил в открытое состояние, что сопровождалось резким снижением напряжения на конденсаторе C1. Таким образом, напряжение переключения в данной схеме соответствует амплитуде импульса напряжения на конденсаторе C1. На рисунке 1 б показаны экспериментальные зависимости напряжения переключения от частоты следования импульсов в пачке. Установлено, что с ростом частоты напряжение переключения начинает снижаться при достижении порогового значения 20-40 кГц. Данный эффект не связан с разогревом полупроводникового кристалла и объясняется перезарядкой глубоких центров железа. Анализ результатов показал, что после включения в локальной области S-диода (токовом шнуре) происходит быстрый захват лавинных дырок на отрицательно заряженные глубокие центры. Захват электронов, обуславливающий переход структуры к равновесному состоянию, происходит гораздо медленней и занимает от 0.1 до 1 мс. Таким образом, частотная зависимость напряжения переключения S-диодов обусловлена инерционностью процесса захвата неравновесных электронов в локальной области на нейтральные центры железа. В структуре без глубоких центров (лавинных биполярных транзисторах из арсенида галлия) значительное изменение напряжения переключения при увеличении частоты отсутствует вплоть до 500 кГц (рис. 1 б).

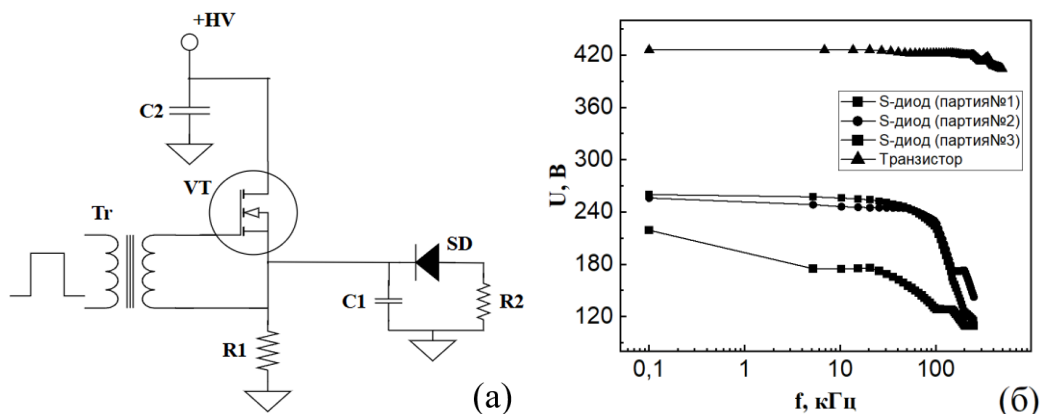


рис.1 Схема измерения напряжения переключения S-диода (а); зависимость напряжения переключения от частоты для диодов из различных партий и лавинного транзистора (б)

Распространение волн пространственного заряда в полупроводниковых структурах с плавной продольной электрической неоднородностью

Алексей Александрович Левицкий
Павел Сергеевич Маринушкин
Сибирский федеральный университет
E-mail: ALevitskiy@sfu-kras.ru

Интерес к исследованию волновых эффектов в тонких слоях полупроводников с междолинным переносом горячих электронов обусловлен возможностью создания на их основе распределенных устройств, обеспечивающих как усиления, так и обработку СВЧ-сигналов [1-5]. Активные свойства тонкопленочных структур на основе полупроводников типа АЗВ5 обусловлены видом зависимости средней дрейфовой скорости носителей заряда от напряженности электрического поля. В условиях отрицательной дифференциальной проводимости, проявляющейся в полупроводниках с междолинным переносом горячих электронов в области сильных электрических полей, возможна реализация эффекта нарастания квазистатических волн пространственного заряда.

В данной работе представлен анализ особенностей распространения волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах (рис. 1) с неоднородными продольным распределениями статического электрического поля $E_{0z}(z)$ и концентрации носителей заряда $n_0(z)$. Для упрощения будем полагать, что основным является электронный тип проводимости, а вклад собственной проводимости пренебрежимо мал. На практике, такая структура реализуется, как правило, когда полупроводниковый эпитаксиальный слой расположен на изолирующей подложке. Направление распространения волн будем полагать совпадающим с направлением дрейфа носителей (вдоль оси z).

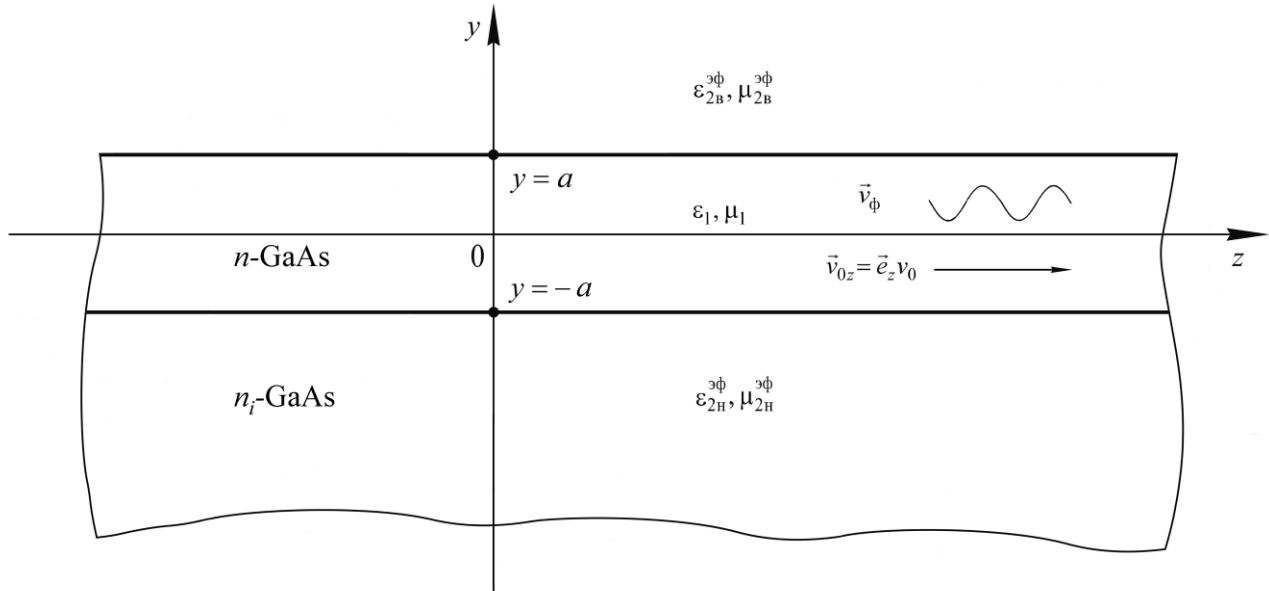


Рис. 1 Модель тонкопленочной полупроводниковой структуры

Масштаб продольной неоднородности статических величин полагается существенно превышающим длину волны пространственного заряда $\lambda_e = 2\pi v_{0z}(z)/\omega$ (где v_{0z} – скорость дрейфа носителей заряда, ω – частота) и толщину пленки $d = 2a \sim \lambda_e$. При этом выполняется критерий плавной неоднородности, который для $E_{0z}(z)$ и $n_0(z)$ имеет вид

$$\frac{1}{E_{0z}(z)} \frac{\partial E_{0z}(z)}{\partial z} \ll \frac{1}{\lambda_e} \sim \frac{1}{d}, \quad \frac{1}{n_0(z)} \frac{\partial n_0(z)}{\partial z} \ll \frac{1}{\lambda_e} \sim \frac{1}{d}. \quad (1)$$

Данный критерий аналогичен используемому в методе геометрической оптики условию малости длины волны по сравнению с наименьшим из всех характерных размеров задачи. При этом для описания пространственной зависимости переменных вводится эйконал $\Psi(z)$, соответствующий решению в виде $\exp[-\Psi(z)]$.

Поиск решений, описывающих распространение волн пространственного заряда в структуре с плавными продольными неоднородностями, удобно проводить, принимая зависимость переменных от координаты z в виде $\exp[-\gamma(z)z]$, где $\gamma(z) = \Psi(z)/z = \alpha(z) + i\beta(z)$ – комплексная постоянная распространения. Такое представление дает возможность в дальнейшем опираться на известные результаты анализа [1], выполненного

для однородной в продольном направлении структуры.

Анализ проводится в рамках квазиэлектростатического приближения ($\vec{E}_1 = -\nabla\varphi_1$). При этом приближении исходными для описания распространения волн пространственного заряда в полупроводниковой плазме являются уравнения Пуассона $\nabla^2\varphi_1 = \rho_1/\varepsilon_1$ и непрерывности $i\omega\rho_1 + \text{div}\vec{j}_1 = 0$, связывающие с учетом уравнения плотности тока $\vec{j}_1 = \hat{\sigma}_d \cdot \vec{E}_1 - D_e \text{grad}\rho_1 + \vec{v}_0\rho_1$ основные физические переменные – потенциал φ_1 и плотность заряда ρ_1 . На основании этих соотношений можно получить уравнение, связывающее φ_1 и ρ_1 :

$$D_e \nabla^2 \rho_1 - \left(v_{0z} - \frac{\partial D_e}{\partial z} \right) \frac{\partial \rho_1}{\partial z} - \left(\omega_m + i\omega + \frac{\partial v_{0z}}{\partial z} \right) \rho_1 = (1 - \kappa_0) \sigma_e \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} - \frac{\partial(\kappa_0 \sigma_e)}{\partial z} \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \quad (2)$$

где $\nabla^2 = \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$, D_e – коэффициент диффузии носителей заряда, v_{0z} – дрейфовая скорость носителей, $\omega_m = \sigma_e/\varepsilon_1 = en_0\mu_e/\varepsilon_1$ – максвелловская частота релаксации, ε_1 – диэлектрическая проницаемость полупроводника, $i = \sqrt{-1}$, $\kappa_0 = (dv/dE)/(v/E)$ – коэффициент анизотропии дифференциальной подвижности носителей заряда при напряженности поля E_0 в полупроводнике с полескоростной характеристикой $v(E)$, $\hat{\sigma}_d$ – диагональный (в выбранной системе координат) тензор дифференциальной проводимости полупроводника, $\sigma_e = qn_0\mu_e$ – статическая проводимость полупроводника, q – элементарный заряд, μ_e – статическая подвижность носителей заряда.

В соотношении (2) и далее для удобства записи не указано обозначение зависимости статических величин v_{0z} , D_e , σ_e и других переменных от продольной координаты z . В (2) также опущены слагаемые, содержащие частные производные $\partial\sigma_e/\partial y$ и $\partial D_e/\partial y$ на основании того, что величины σ_e и D_e полагаются не зависящими от координаты y .

С учетом принятой зависимости динамических переменных и записанного выше условия плавности изменения статических величин (1) исходные уравнения и граничные условия дают возможность получить дисперсионные соотношения, аналогичные по виду дисперсионным соотношениям для однородных в продольном направлении структур [1] при замене в последних постоянной распространения $\gamma = \alpha + i\beta$ на модифицированную величину $\tilde{\gamma} = \tilde{\alpha} + i\tilde{\beta}$, а также замене постоянных статических параметров (E_{0z} и n_0 и других) на локальные значения соответствующих статических плавно изменяющихся величин.

Таким образом, дисперсионное уравнение для волн пространственного заряда в структуре с плавной продольной электрической неоднородностью может быть записано в общей форме

$$\tilde{\gamma}^2 D_e + \tilde{\gamma} v_{0z} - \kappa_0 \bar{\omega}_m - i\omega = 0, \quad (3)$$

$$\tilde{\gamma}(z) = \gamma(z) + z \frac{\partial \gamma(z)}{\partial z} = \psi(z)$$

где

Найденное с учетом краевых условий на верхней и нижней границах полупроводникового слоя (рис. 1) решение (3) позволяет определить интегральный коэффициент усиления G_L и набег фазы волн пространственного заряда $\Delta\varphi_L$ на длине L структуры с продольными неоднородностями

$$G_L, \text{дБ} = 20 \lg \exp\{\text{Re}[-\psi(L)]\} = -8,68 \exp \int_0^L \tilde{\alpha}(z) dz, \quad \Delta\varphi_L = \text{Im}[-\psi(L)] = \text{Im} \int_0^L \tilde{\beta}(z) dz \approx \int_0^L \frac{\omega}{v_{0z}(z)} dz. \quad (4)$$

На первом этапе анализа влияния неоднородностей на распространение волн продольное электрическое поле принималось линейно изменяющимся вдоль структуры. Соответствующее распределение концентрации носителей определялось из уравнения Пуассона. Другие статические величины находились с помощью выражения, аппроксимирующего зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля $v(E)$ для арсенида галлия. Расчеты проводились для структур с асимметрией внешней среды по разные стороны активного слоя $n\text{-GaAs}$: $\varepsilon_{2в}^{\text{эф}} \neq \varepsilon_{2н}^{\text{эф}}$, $\mu_{2в}^{\text{эф}} \neq \mu_{2н}^{\text{эф}}$.

Расчеты показывают, что значительное влияние на высокочастотные характеристики тонкопленочных полупроводниковых структур оказывают области полупроводника с напряженностью статического

электрического поля $E_{0z}(z)$ меньшей пороговой напряженности E_t , соответствующей началу падающего участка на полескоростной характеристике $v(E)$ полупроводника.

Возрастание градиента поля может приводить не только к уменьшению, но и к увеличению интегрального коэффициента усиления и предельной частоты усиления. Последнее возможно при средней напряженности электрического поля в полупроводнике выше удвоенного порогового значения. Кроме того, увеличение градиента электрического поля вызывает смещение максимума усиления в область больших напряжений на образце. При этом может наблюдаться снижение чувствительности коэффициента усиления зарядовых волн к изменению приложенного напряжения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что неоднородное распределение статического электрического поля может быть более предпочтительно по сравнению с однородным с точки зрения повышения устойчивости структуры.

Дальнейший анализ проводился с использованием численного моделирования статических распределений. Распределения $E_{0z}(z)$ и $n_0(z)$ определялись с помощью одномерной локально-полевой модели для структуры прямоугольной формы без управляющих электродов на поверхности полупроводника. В качестве дополнительных условий использовались соотношения для напряженности поля на границах рассматриваемой области полупроводника при $z=0$ и $z=L$. При этом вид зависимостей $E_{0z}(z)$ и $n_0(z)$ однозначно определяется начальной напряженностью поля E_{0z}^0 в образце при $z=0$ и приложенным напряжением U . Задача нахождения $E_{0z}(z)$ и $n_0(z)$ решалась численно с использованием явной схемы.

На основании проведенных расчетов построены линии постоянного усиления ($G_L = \text{const}$) в координатах E_{0z}^0 и U . Полученные кривые позволяют определить область максимального усиления волн пространственного заряда, а также режим, обеспечивающий наименьшую чувствительность G_L к изменению E_{0z}^0 и U . Анализ полученных результатов показывает соответствие между расчетными и экспериментальными зависимостями коэффициента усиления волн от напряжения на полупроводниковом образце.

Расчеты зависимости фазового сдвига волн пространственного заряда в тонкопленочной полупроводниковой структуре от приложенного напряжения показывают, что эта зависимость имеет линейный участок, ограниченный с одной стороны напряжением, соответствующим средней напряженности электрического поля, близкой к пороговому значению, а с другой – напряжением, при котором устанавливается равномерное распределение поля. Диапазон линейной перестройки фазы напряжением расширяется при увеличении начального значения напряженности статического электрического поля E_{0z}^0 в полупроводнике.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Список публикаций

- [1] Барыбин, А.А. Волны в тонкопленочных полупроводниковых структурах с горячими электронами / А.А. Барыбин. – М. : Наука, 1986. – 288 с.
- [2] Барыбин, А.А. Параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах / А.А. Барыбин, А.И. Михайлов // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – С. 48-52.
- [3] Kogan A. Microwave Monolithic Selective Tunable Amplifiers Using Space-Charge Waves in the GaAs Films // Pros. IEEE, vol. 1, 2001. – P. 190-194.
- [4] Брыксин В.В., Петров М.П. Электрические токи, обусловленные волнами пространственного заряда в высокоомных полупроводниках // Физика твердого тела, 2006, том 48, вып. 7. – С. 1167-1176.
- [5] Дадоев Ю.С., Золотовский И.О., Паняев И.С., Санников Д.Г. Моделирование режимов генерации оптического излучения в полупроводниковом волноводе с распределенной обратной связью, создаваемой волной пространственного заряда // Компьютерная оптика, 2020, том 44, № 2. – С. 183-188.

Приемо-передающий модуль для наносекундного импульсного дальномера на основе отечественной компонентной базы

Прудаев Илья Анатольевич

Копьев Виктор Васильевич, Олейник Владимир Леонидович, Скакунов Максим Сергеевич

Томский государственный университет

E-mail: funcelab@gmail.com

Импульсные дальномеры и лидары находят широкое применение в системах навигации беспилотного транспорта, визуализации объектов и построения трехмерных карт окружающего пространства, контроля трафика и масса-габаритного контроля. В лидарах нового поколения используются источники укороченных оптических импульсов (до наносекундной длительности) и квантово-чувствительные приемники, работающие в режиме счетчика Гейгера (SPAD – single photon avalanche detectors). Такой подход позволяет значительно упростить техническую реализацию систем и повысить их разрешение по дальности. При этом разработка приемников и передатчиков оптических импульсов наносекундной длительности требует перехода на новую компонентную электронную базу.

Для генерации оптических импульсов в 3D-лидарах традиционно используются резонансные схемы накачки полупроводниковых лазеров. Импульсы наносекундной длительности получают за счет перехода к быстродействующим электронным ключам — полевым транзисторам на основе нитрида галлия. Такие транзисторы позволяют замыкать резонансную цепь с напряжением питания 100-200 В за время порядка 1 нс и проводить разрядку накопительного конденсатора в течение 2-3 нс. В настоящей работе использован альтернативный электронный ключ — лавинный S-диод. В силовоточной цепи он позволяет эффективно коммутировать напряжения до 100-500 В за время 0.15-0.35 нс и проводить разрядку накопительного конденсатора в течение 1 нс. На рис. 1 а представлена фотография разработанного передатчика на длину волны 905 нм. Передатчик сформирован на плате с размерами 4x4 см², имеет постоянное напряжение питания от +14 до +24 В, вход для запуска электронной схемы генерации оптического импульса и синхровыход для запуска микросхемы измерения времени (ToF-микросхемы). На рис. 2 б представлены зависимости оптической мощности излученного импульса и напряжения на синхровыходе от времени. Многочисленные эксперименты показали, что использование лавинного S-диода позволяет реализовать надежную непрерывную генерацию оптических импульсов с мощностью 40-110 Вт (в зависимости от постоянного напряжения питания передатчика и напряжения переключения S-диода) на частотах 10-25 кГц (рис. 1 в). В области данных частот работает подавляющее большинство коммерческих 3D-лидаров. В условиях генерации оптических импульсов пачками, когда средний ток в резонансной цепи не превышает определенного порогового значения и в схеме не наблюдается саморазогрев S-диода, возможна генерация до частот 160 кГц. Непрерывная генерация оптических импульсов на частотах до 500 кГц возможна при использовании принудительного охлаждения резонансной цепи, включающей лавинный S-диод и полупроводниковых лазеров.

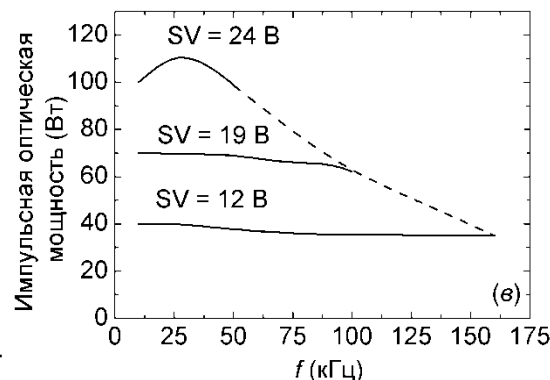
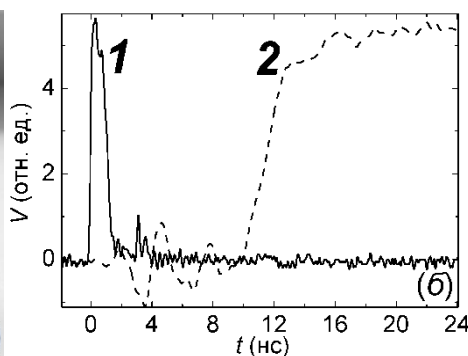


рис.1 Фотография разработанного передатчика (а); зависимость оптической мощности (1) и напряжения на синхровыходе (2) от времени (б); частотные зависимости мощности оптических импульсов при различном напряжении питания SV передатчика (в)

Структурная схема приемника представлена на рис. 2 а. Чувствительным элементом является кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiPM – silicon photo-multiplier), представляющий собой матрицу SPAD-пикселей. Для выделения квантов, отраженных от цели, предусмотрены собирающая линза с диаметром 3 см и фильтр с полосой 40 нм. Для повышения эффективности система регистрации квантов реализована в режиме счетчика Гейгера. В этом случае питание складывается из постоянной составляющей, не превышающей напряжение лавинного пробоя р-п-переходов SPAD-пикселей, и импульсного напряжения. Запуск импульсов питающего напряжения осуществляется одновременно с запуском ToF-микросхемы (с синхровыхода передатчика). Для исключения детектирования ложных сигналов, вызванных дифференцированием питающих импульсов SiPM-приемником, введена эквивалентная RC-цепь (фиктивная), сигнал с которой поступает на второй вход дифференциального усилителя. Усиление сигнала до уровня напряжения 3.3 В реализовано с использованием усилителя-компаратора. С выхода компаратора сигнал поступает на второй вход (Stop) ToF-микросхемы. На рис. 2 б представлен результат измерения — гистограмма измеренных расстояний до объекта (цели), построенная для

1000 импульсов на частоте 10 кГц. Объект представлял собой поверхность с коэффициентом отражения не более 10%, измерения проводились в помещении при уровне освещенности 400 лк (условия indoor).

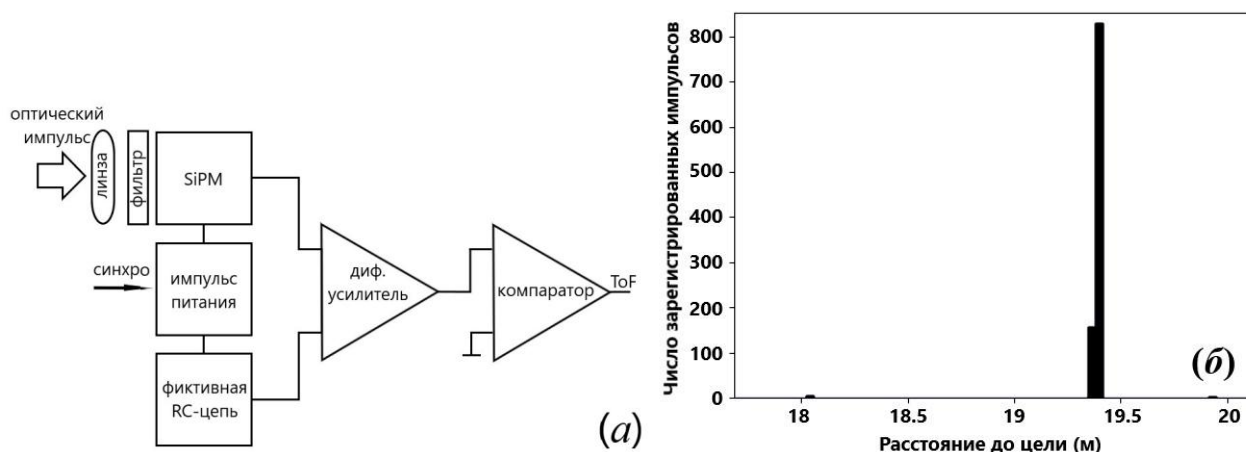


рис.2 Структурная схема разработанного приемника (а); гистограмма распределения измеренного расстояния до цели с коэффициентом отражения $\leq 10\%$ для 1000 импульсов в условиях indoor (б);

В настоящей работе предложена отечественная микросхема SiPM, обладающая характеристиками, аналогичными исходно протестированному зарубежному аналогу (рис.2 а). Микросхема разрабатывалась с использованием комплекса средств проектирования для технологии КМОП HCMOS8D 0.18 мкм. Фоточувствительная часть микросхемы представляла собой матрицу SPAD-детекторов 10×10 с размером единичной чувствительной области (пикселя) 54×57 мкм². SPAD-элемент содержал диод на основе р-п-перехода, конденсатор и демпфирующий резистор (рис. 3 а). Для повышения удельной электрической емкости в качестве конденсатора использована МОП-структура полевого транзистора. Все SPAD-элементы включены параллельно для суммирования вклада в общий фототок от каждого пикселя на выходе SiPM. Топология SPAD и SiPM представлены на рис. 3 б и 3 в. Пассивные элементы SPAD-пикселя были расположены по периметру фоточувствительной области, площадь которой составляла 52% от общей площади детектора. Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW». Разработка приемо-передающего модуля выполнена по инициативе авторов.

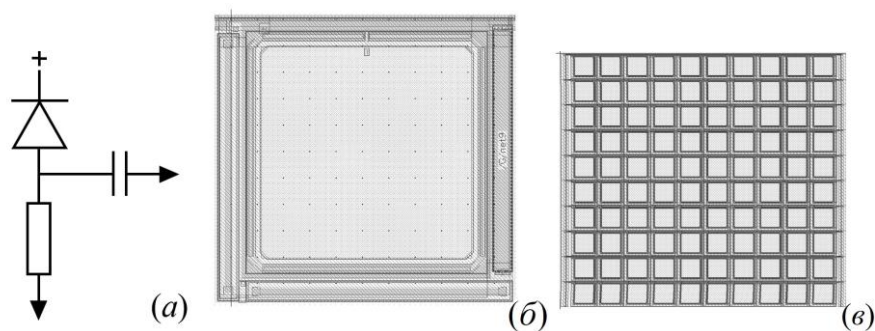


рис.3 Электрическая схема SPAD-пикселя (а); топологическое представления SPAD-пикселя (б); топологическое представление SiPM-матрицы (в)

Электромагнитные свойства ферритов, полученных экструзионной печатью

Свирков Александр Сергеевич

Лысенко Елена Николаевна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: svirkov@tpu.ru

В последние годы наблюдается стремительное развитие аддитивных технологий, активно применяемых для изготовления изделий сложной геометрии из полимеров, металлов и их сплавов. Прогресс в этой области открывает перспективы и для производства керамических материалов, обеспечивая высокую эффективность и производительность при снижении затрат. Ряд исследований уже подтвердил возможность аддитивного формирования ферритов на основе NiZn, Sr и Ba [1–5].

Целью данной работы является изучение электромагнитных свойств и структуры ферритовой керамики, полученной методом экструзионной печати ферритовой пастой с последующим термическим спеканием. В качестве методов исследования использованы дилатометрия, сканирующая электронная микроскопия, магнитометрия и измерение электропроводности.

Объектом исследования выбран литий-цинковый феррит состава $\text{Li}_{0.4}\text{Fe}_{2.4}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_4$, применяемый в электронике и биомедицинских устройствах. Технологическая последовательность изготовления керамики включает: твердофазный синтез ферритового порошка при 900 °С из исходных компонентов (Li_2CO_3 , Fe_2O_3 и ZnO); введение в порошок Bi_2O_3 в количестве 1 и 2 вес.%; приготовление пасты (феррит/связующее = 80/20 по массе) на шаровой мельнице; формование образцов методом экструзии в виде таблеток; термическое спекание при 1100 °С в дилатометре.

В качестве связующего применяли раствор этилцеллюлозы в терпинеоле (ЭЦТ). Печать производилась с использованием 3D-принтера Voltera V-one, функционирующего по принципу непрерывного дозирования материала через тонкое сопло с помощью поршневого механизма. Координатное перемещение дозатора позволило формировать заданную структуру на подложке согласно цифровой модели.

Рентгенофазовый анализ образцов проводился с помощью рентгеновского дифрактометра ARLX'TRA. Изменение геометрических размеров при нагреве оценивалось посредством дилатометра Netzsch DIL 402C. Микроструктура полученных образцов анализировалась с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000. Измерения магнитных свойств проводились с помощью вибрационного магнитометра VSM Lakeshore 7400 System. Удельное электрическое сопротивление образцов оценивалось из измерений температурных зависимостей тока электрической проводимости с помощью двухзондового метода сопротивления растекания.

Рентгенофазовый анализ подтвердил, что все образцы являются монофазными и соответствуют химической формуле ферритов исследуемых составов. Дилатометрические исследования показали, что температура и скорость интенсивной усадки зависят от содержания легкоплавкой добавки Bi_2O_3 в ферритовом порошке (рис.1.).

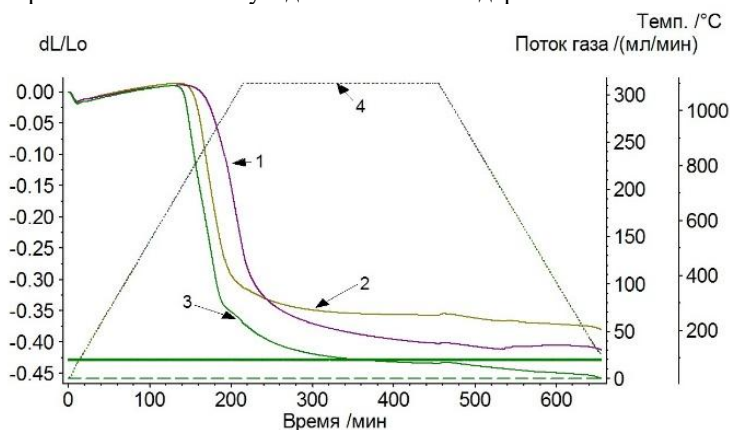
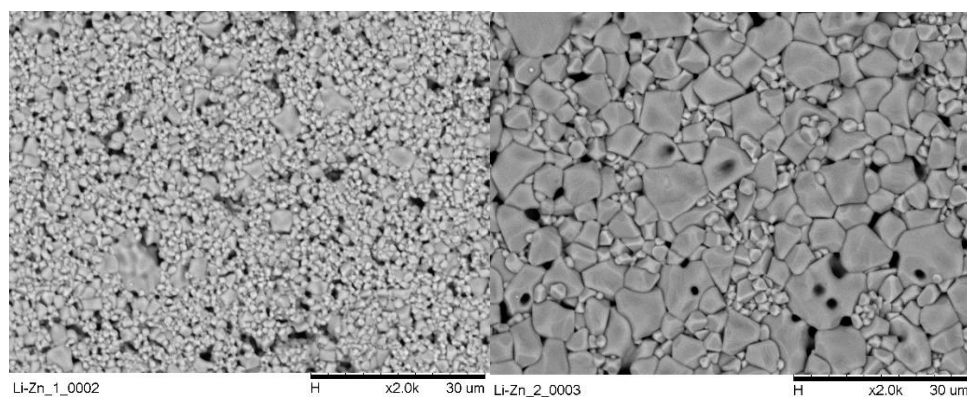


рис.1 Дилатограммы спекания образцов, изготовленных из Li-Zn ферритовой пасты, включающей добавку Bi_2O_3 и этилцеллюлозу в терпинеоле: 1 – без добавки Bi_2O_3 , 2 - с добавкой Bi_2O_3 в количестве 1 вес.%, 3 - с добавкой Bi_2O_3 в количестве 2 вес. %, 4 – температурная программа.

При увеличении концентрации Bi_2O_3 наблюдается рост плотности и снижение пористости. Согласно данным СЭМ, максимальная плотность достигается при содержании 2 вес.% Bi_2O_3 — относительная плотность составляет 85,5% (рис.2).



а)

б)

рис.2 СЭМ изображения ферритовой керамики с содержанием оксида висмута 0 вес.% (а) и 2 вес.% (б), полученного методом термического нагрева при температуре 1100 °С

Полученные ферриты характеризуются удельной намагниченностью насыщения 73–75 Эме/г, температурой Кюри 502–506 °С, коэрцитивной силой 9–18 Э, удельным электрическим сопротивлением 10^6 – 10^8 Ом·см в зависимости от количества оксида висмута в напечатанном феррите. Результаты измерений магнитных и электрических характеристик ферритовой керамики, спеченной при 1100 °С из ферритовой пасты со связующим (этилцеллюлоза в терпинеоле) приведены в таблице:

Образец	T_C , °С	σ_s , Гс·см ³ /Г	M_S , Эме/г	H_C , Э	ρ , Ом·см	E_A , эВ
$Li_{0.4}Fe_{2.4}Zn_{0.2}O_4$	502	80.7	75	18	$2.78 \cdot 10^7$	0.394
$Li_{0.4}Fe_{2.4}Zn_{0.2}O_4 + Bi_2O_3$ (1 вес.%)	506	77.6	73	12	$9.94 \cdot 10^6$	0.414
$Li_{0.4}Fe_{2.4}Zn_{0.2}O_4 + Bi_2O_3$ (2 вес.%)	504	74.3	73	9	$2.8 \cdot 10^8$	0.605

Полученные результаты показали перспективность дальнейшего развития аддитивного метода получения ферритовой керамики, основанного на экструзионном нанесении ферритовых заготовок. В результате измерения электромагнитных характеристик можно утверждать о конкурентоспособности и применимости полученных ферритов в различных областях промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00183).

Список публикаций:

- [1] An, T. Extrusion-based 3D direct ink writing of NiZn-ferrite structures with viscoelastic ceramic suspension / T. An, K. Hwang, J. Kim // *Ceramics International*. – 2020. – V.46. – P.6469-6476.
- [2] Bissannagari, M. Inkjet printing of NiZn-ferrite films and their magnetic properties / M. Bissannagari, J. Kim // *Ceramics International*. – 2015. – V.41. – P.8023-8027.
- [3] Wei, X. 3D printing of NiZn ferrite architectures with high magnetic performance for efficient magnetic separation / X. Wei, Y. Pan, Z. Chen // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2022. – V.42. – P.1522-1529.
- [4] Yang, F. 3D gel-printing of Sr ferrite parts / F. Yang, X. Zhang, Z. Guo // *Ceramics International*. – 2018. – V.44. – P.22370-22377.
- [5] Wei, X. Net-shaped barium and strontium ferrites by 3D printing with enhanced magnetic performance from milled powders / X. Wei, Y. Liu, D. Zhao, X. Mao, W. Jiang, S. Ge // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2020. – V.493. – P.165664.

Динамика поляризации сенсоров на основе арсенида галлия, компенсированного хромом, при воздействии субнаносекундного импульсного инфракрасного излучения

Трофимов Михаил Сергеевич
Щербаков Иван Дмитриевич, Копьев Виктор Васильевич
Томский государственный университет

E-mail: mihant1999@yandex.ru

В настоящее время в синхротронных исследованиях широко используются многоэлементные полупроводниковые детекторы на основе широкозонных полупроводниковых материалов с высоким значением атомного номера. Одним из таких материалов является арсенид галлия. Как было показано ранее, в сенсорах на основе SI-GaAs структур (где SI – Semi-insulating), компенсированных глубокими донорными E12-центрами, при приложении напряжения происходит поляризация активной области. Электроны в процессе дрейфа захватываются на ионизованные E12-центры, что приводит к спаду их времени жизни до 0.5 нс, уменьшению толщины активной области и неоднородному распределению поля [1, 2]. Это приводит к значительному снижению эффективности сбора заряда и энергетического разрешения SI-GaAs детекторов, что сильно ограничивает их применение в науке и технике.

В разработанных томскими учеными сенсорах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом (HR-GaAs:Cr, где HR – high resistivity), при приложении напряжения электрическое поле в объеме распределяется практически однородно, а время жизни электронов находится в пределах (10 – 100) нс [3,4]. Удельное сопротивление HR-GaAs:Cr сенсоров составляет в среднем 10^9 Ом·см, что на 1 – 2 порядка выше, чем у сенсоров на основе SI-GaAs структур. В работе [5] показано, что при воздействии интенсивного непрерывного потока рентгеновских квантов на HR-GaAs:Cr сенсоры, в их активной области возникает поляризация вследствие захвата дырок на отрицательно заряженные центры хрома. Это приводит к искажению поля в объеме сенсора и снижению эффективности сбора заряда.

В рамках данной работы проводилось экспериментальное исследование динамики поляризации HR-GaAs:Cr сенсоров при воздействии импульсного инфракрасного (ИК) излучения. Эксперимент проводился на установке, подробно описанной в работе [6], которая была дополнена системой термостабилизации, состоящей из температурного датчика и элемента Пельтье, позволяющего нагревать образцы до +80 °С. В эксперименте исследовались сенсоры толщиной 500 мкм с верхним сетчатым контактом для пропускания ИК излучения. К сетчатому облучаемому контакту прикладывалось напряжение в диапазоне (100 – 500) В, что создавало напряженность электрического поля в активной области сенсоров в диапазоне (2 – 10) кВ/см. Длина волны ИК-излучения составляла 830 нм, вследствие чего поглощение происходило вблизи поверхности сенсора, на глубине $L \approx 1$ мкм, что сопоставимо с поглощением рентгеновского излучения с энергией квантов до 1 кэВ. В результате приповерхностного поглощения и приложения напряжения отрицательной полярности, регистрировались импульсы электронного фототока. Частота повторения ИК-импульсов изменялась в диапазоне от 32 кГц до 40 МГц, а их длительность составляла 300 пс. Таким образом, в эксперименте моделировалось воздействие синхротронного рентгеновского излучения на HR-GaAs:Cr сенсоры с энергией квантов 1 кэВ.

Результаты данной работы показали, что с ростом частоты повторения ИК-импульсов, амплитуда импульсов фототока и величина собранного заряда HR-GaAs:Cr сенсоров начинает снижаться, что свидетельствует о возрастании динамики поляризации сенсоров. При частоте повторения ИК импульсов равной 40 МГц амплитуда импульсов фототока и величина собранного заряда HR-GaAs:Cr сенсоров падает более чем на 80%. Установлено, что с ростом напряженности электрического поля спад амплитуды импульсов фототока и величины собранного заряда HR-GaAs:Cr сенсоров происходит более слабо. При $E = 4$ кВ/см, величина собранного заряда при частоте повторения ИК импульсов равной 10 МГц составляет менее 30%, тогда как при $E = 10$ кВ/см данное значение составляет порядка 50%. Установлено, что увеличение температуры нагрева HR-GaAs:Cr сенсоров приводит к возрастанию амплитуды импульсов фототока и величины собранного заряда, что предположительно свидетельствует о деполяризации их активной области.

Благодарности

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0021.

Список публикаций

- [1] McGregor D. S. et al. // Journal of Applied Physics. 1994. 5(12). P. 7910 – 7915
- [2] Rogalla M., Runge K. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 434. P. 44–56.
- [3] A. V. Tyazhev et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2003. V. 509. № 1. P. 34 – 39
- [4] I. Chsherbakov et al. // JINST. 2017. V. 12 C02016.
- [5] Zambon P. // AIP Advance. 2021. V. 11. №7. P. 75006
- [6] М. С. Трофимов, И. Д. Щербаков // Известия вузов. Физика. 2024. Т. 67, № 12. С. 7-1

Солнечно-слепые детекторы на основе тонких пленок Ga_2O_3 Цымбалов Александр Вячеславович, Копьев Виктор Васильевич, Алмаев Алексей Викторович, Яковлев Никита Николаевич, Алмаев Дмитрий Александрович

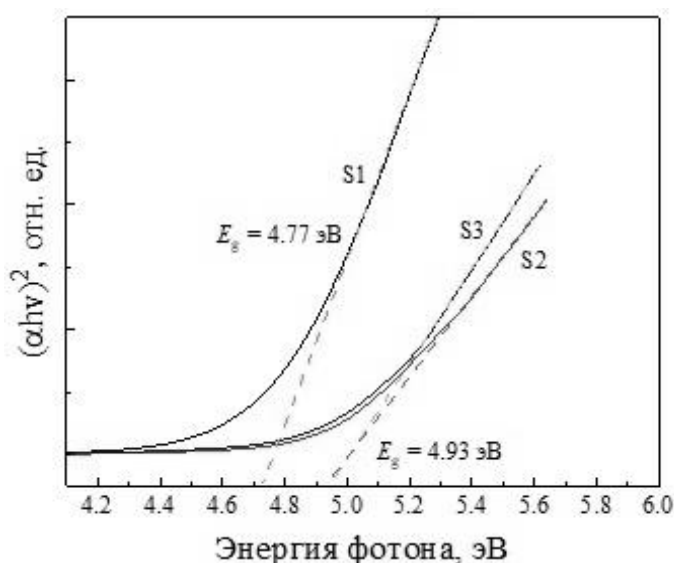
Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: Zoldmine@gmail.com

Оксид галлия (Ga_2O_3) является наиболее подходящим материалом для создания солнечно-слепых детекторов ультрафиолетового (УФ) излучения благодаря своим уникальным оптическим, электрическим и фотоэлектрическим свойствам [1–3]. Большинство современных детекторов являются матричными, что позволяет формировать изображения в ультрафиолетовом диапазоне [4, 5]. Однородность среди пикселей фоточувствительной матрицы реализуется путем применения качественных методов роста активной области устройства, одним из которых является атомно-слоевое осаждение (ALD). Метод ALD позволяет наносить атомарно-тонкие слои с высокой однородностью, предоставляя уникальные возможности для создания пленок оксида галлия с заданными свойствами [6, 7].

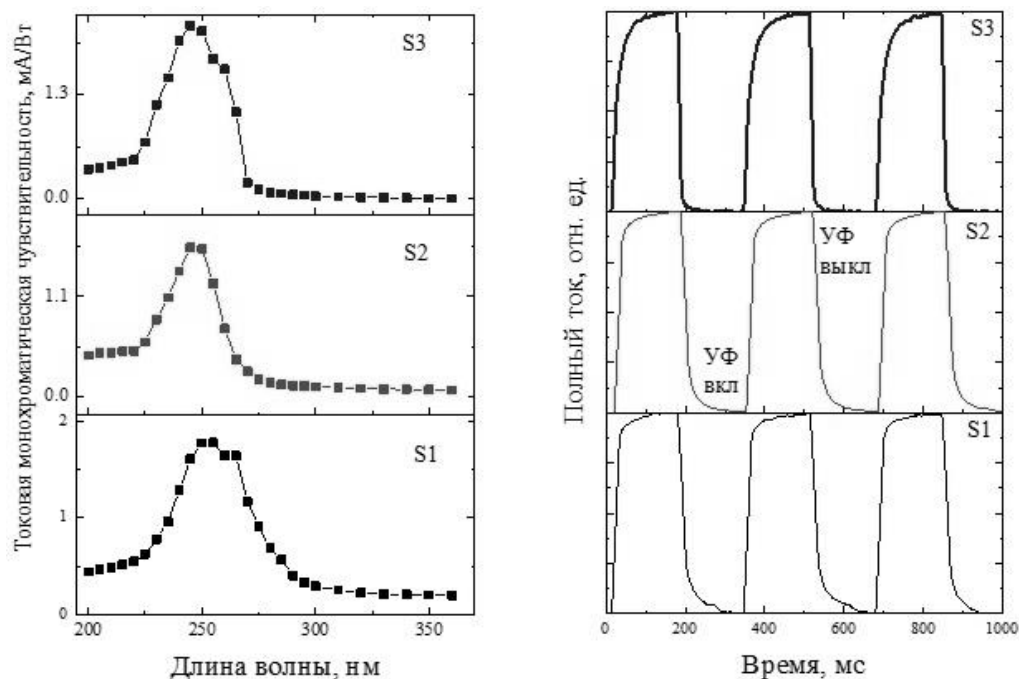
В работе рассматриваются 3 типа планарных структур металл/полупроводник/металл (MSM) на основе пленок Ga_2O_3 . Пленки оксида галлия толщиной 80 нм были получены методом атомно-слоевого осаждения на сапфировых подложках. Первый и второй типы структур (S1 и S2) представляют собой осажденные пленки оксида галлия на $c\text{-Al}_2\text{O}_3$, однако для S2 пленка Ga_2O_3 отжигалась при 900 °С. Третий тип структур (S3) – отожженная пленка Ga_2O_3 при 900 °С на $a\text{-Al}_2\text{O}_3$. Плоскопараллельные контакты на основе платины формировались на поверхности пленок Ga_2O_3 при помощи фотолитографии.

Для исследуемых пленок оксида галлия были измерены спектры пропускания, из которых был рассчитан коэффициент поглощения α . Оптическая ширина запрещенной зоны E_g пленок Ga_2O_3 определялась в координатах α^2 от энергии фотонов $h\nu$, что свидетельствует о прямых оптических переходах (рис. 1). Значение E_g для пленки оксида галлия без термического отжига (S1) составило 4.77 ± 0.05 эВ. Независимо от ориентации подложки отжиг пленок Ga_2O_3 приводит к росту E_g до 4.93 ± 0.05 эВ (S2 и S3).

рис. 1 Зависимость α^2 от энергии фотонов для ALD пленок Ga_2O_3

Вольт-амперные характеристики всех MSM-структур имеют линейный вид и не зависят от полярности приложенного напряжения. Значения темнового тока для достигают 1 пА при напряжении $U = 20$ В для S1 и S2. Спектральные зависимости токовой монохроматической чувствительности R детекторов ультрафиолетового излучения были измерены в диапазоне длин волн от 200 до 360 нм и фиксированном напряжении 20 В (рис. 2а). Максимум значений R для структур S2 и S3 приходится на $\lambda = 245$ нм и составляют 1.63 и 2.16 мА/Вт соответственно, а для S1 – $R = 1.77$ мА/Вт (255 нм).

На рисунке 2б представлены временные зависимости полного тока MSM-структур при периодическом воздействии УФ-излучения. MSM-структуры обладают высоким быстродействием. Времена отклика t_r составили 50, 26 и 21 мс для структур S1, S2 и S3 соответственно. Времена восстановления t_d , составили 12, 38 и 37 мс для структур S1, S2 и S3 соответственно.



а)

б)

рис. 2 Спектральные зависимости токовой монохроматической чувствительности MSM-структур (а); Временные зависимости нормализованного тока MSM-структур при циклическом воздействии излучения УФ-излучения (б) Отжиг пленок оксида галлия приводит к увеличению оптической ширины запрещенной зоны с 4.77 до 4.93 эВ. MSM-структуры обладают низкими шумами: значения темнового тока не превышают 1 пА при $U = 20$ В. Рассмотренные детекторы ультрафиолетового излучения обладают чувствительностью к дальнему ультрафиолетовому излучению. Максимум токовой монохроматической чувствительности УФ-детекторов соответствует 245 и 255 нм, а также структуры являются солнечно-слепыми. Детекторы демонстрируют высокое быстродействие: времена отклика и восстановления не превышают 50 и 37 мс соответственно. Высокая повторяемость структур независимо от подложки позволяет применять их для разработки матричных систем визуализации изображения в УФ-диапазоне.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0021.

Список публикаций

- [1] Chen Y. // Acs Photonics. 2024. V. 11. №. 3. P. 985-999.
- [2] Ding W. // Journal of Alloys and Compounds. 2021. V. 866. P. 157564.
- [3] Chen H. // Semiconductor Science and Technology. 2024. V. 39. №. 6. P. 063001.
- [4] Shu L. // Nanotechnology. 2023. V. 35. №. 5. C. 052001.
- [5] He T. // Advanced Optical Materials. 2019. V. 7. №. 7. P. 1801563.
- [6] Chu S. Y. // Sensors. 2020. V. 20. №. 21. P. 6159.
- [7] Han Z. // Advanced Optical Materials. 2020. V. 8. №. 8. P. 1901833.

Солнечно-слепые детекторы на основе тонких пленок Ga_2O_3

Цымбалов Александр Вячеславович, Копьев Виктор Васильевич, Алмаев Алексей Викторович, Яковлев Никита Николаевич, Алмаев Дмитрий Александрович

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: Zoldmine@gmail.com

Оксид галлия (Ga_2O_3) является наиболее подходящим материалом для создания солнечно-слепых детекторов ультрафиолетового (УФ) излучения благодаря своим уникальным оптическим, электрическим и фотоэлектрическим свойствам [1–3]. Большинство современных детекторов являются матричными, что позволяет формировать изображений в ультрафиолетовом диапазоне [4, 5]. Однородность среди пикселей фоточувствительной матрицы реализуется путем применения качественных методов роста активной области устройства, одним из которых является атомно-слоевое осаждение (ALD). Метод ALD позволяет наносить атомарно-тонкие слои с высокой однородностью, предоставляя уникальные возможности для создания пленок оксида галлия с заданными свойствами [6, 7].

В работе рассматриваются 3 типа планарных структур металл/полупроводник/металл (MSM) на основе пленок Ga_2O_3 . Пленки оксида галлия толщиной 80 нм были получены методом атомно-слоевого осаждения на сапфировых подложках. Первый и второй типы структур (S1 и S2) представляют собой осажденные пленки оксида галлия на $c\text{-Al}_2\text{O}_3$, однако для S2 пленка Ga_2O_3 отжигалась при 900 °С. Третий тип структур (S3) – отожженная пленка Ga_2O_3 при 900 °С на $a\text{-Al}_2\text{O}_3$. Плоскопараллельные контакты на основе платины формировались на поверхности пленок Ga_2O_3 при помощи фотолитографии.

Для исследуемых пленок оксида галлия были измерены спектры пропускания, из которых был рассчитан коэффициент поглощения α . Оптическая ширина запрещенной зоны E_g пленок Ga_2O_3 определялась в координатах α^2 от энергии фотонов $h\nu$, что свидетельствует о прямых оптических переходах (рис. 1). Значение E_g для пленки оксида галлия без термического отжига (S1) составило 4.77 ± 0.05 эВ. Независимо от ориентации подложки отжиг пленок Ga_2O_3 приводит к росту E_g до 4.93 ± 0.05 эВ (S2 и S3).

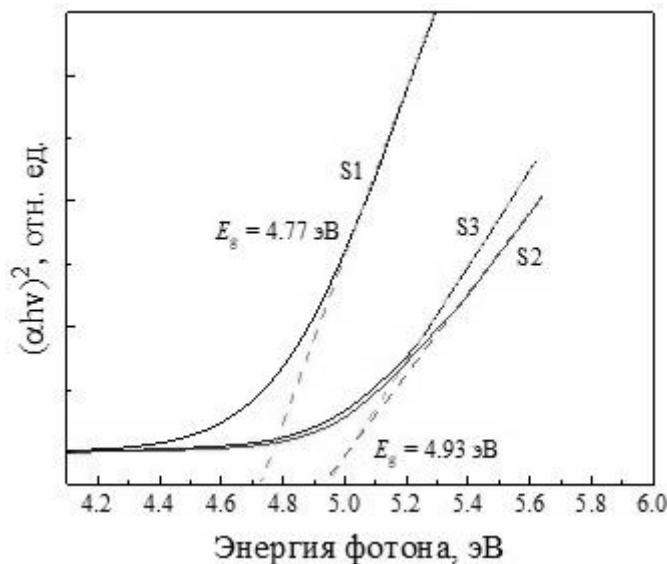


рис. 1 Зависимость α^2 от энергии фотонов для ALD пленок Ga_2O_3

Вольт-амперные характеристики всех MSM-структур имеют линейный вид и не зависят от полярности приложенного напряжения. Значения темнового тока для достигают 1 пА при напряжении $U = 20$ В для S1 и S2. Спектральные зависимости токовой монохроматической чувствительности R детекторов ультрафиолетового излучения были измерены в диапазоне длин волн от 200 до 360 нм и фиксированном напряжении 20 В (рис. 2а). Максимум значений R для структур S2 и S3 приходится на $\lambda = 245$ нм и составляют 1.63 и 2.16 мА/Вт соответственно, а для S1 – $R = 1.77$ мА/Вт (255 нм).

На рисунке 2б представлены временные зависимости полного тока MSM-структур при периодическом воздействии УФ-излучения. MSM-структуры обладают высоким быстродействием. Времени отклика t_r составили 50, 26 и 21 мс для структур S1, S2 и S3 соответственно. Времена восстановления t_d , составили 12, 38 и 37 мс для структур S1, S2 и S3 соответственно.

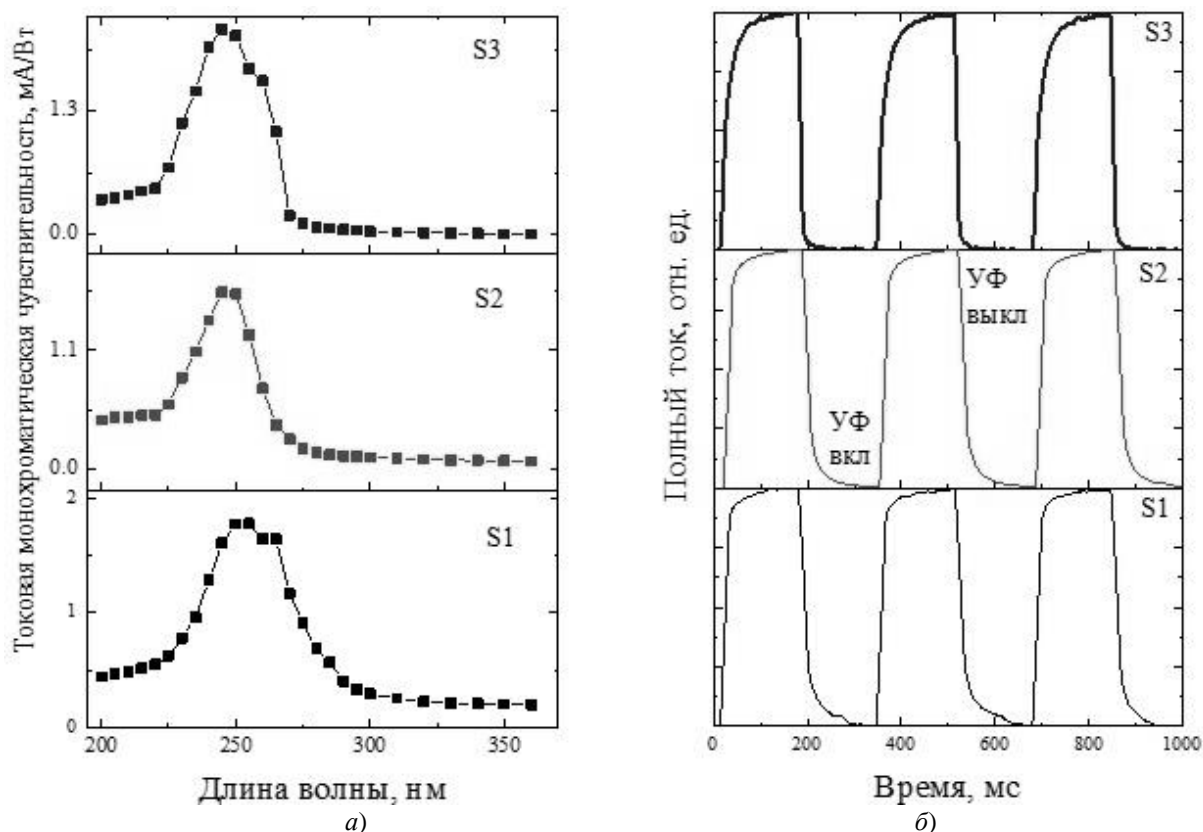


рис. 2 Спектральные зависимости токовой монохроматической чувствительности MSM-структур (а);
Временные зависимости нормализованного тока MSM-структур при циклическом воздействии излучения УФ-излучения (б)

Отжиг пленок оксида галлия приводит к увеличению оптической ширины запрещенной зоны с 4.77 до 4.93 эВ. MSM-структуры обладают низкими шумами: значения темнового тока не превышают 1 пА при $U = 20$ В. Рассмотренные детекторы ультрафиолетового излучения обладают чувствительностью к дальнему ультрафиолетовому излучению. Максимум токовой монохроматической чувствительности УФ-детекторов соответствует 245 и 255 нм, а также структуры являются солнечно-слепыми. Детекторы демонстрируют высокое быстродействие: времена отклика и восстановления не превышают 50 и 37 мс соответственно. Высокая повторяемость структур независимо от подложки позволяет применять их для разработки матричных систем визуализации изображения в УФ-диапазоне.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0021.

Список публикаций

- [1] Chen Y. // *Acs Photonics*. 2024. V. 11. №. 3. P. 985-999.
- [2] Ding W. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. V. 866. P. 157564.
- [3] Chen H. // *Semiconductor Science and Technology*. 2024. V. 39. №. 6. P. 063001.
- [4] Shu L. // *Nanotechnology*. 2023. V. 35. №. 5. C. 052001.
- [5] He T. // *Advanced Optical Materials*. 2019. V. 7. №. 7. P. 1801563.
- [6] Chu S. Y. // *Sensors*. 2020. V. 20. №. 21. P. 6159.
- [7] Han Z. // *Advanced Optical Materials*. 2020. V. 8. №. 8. P. 1901833.

Использование Allpix Squared для численного моделирования амплитудных спектров кремниевых PIN-сенсоров рентгеновского излучения

Чаштанов Кирилл Александрович
Томский государственный университет
E-mail: kirillchashtanov@gmail.com

В последние годы численное моделирование полупроводниковых устройств, включая детекторы рентгеновского излучения, стало ключевым инструментом для научных исследований и разработки новых технологий. Области применения таких детекторов разнообразны и охватывают рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеновская спектроскопия, а также медицинские и научные приборы. Одним из передовых программных решений для моделирования полупроводниковых детекторов является Allpix Squared. Этот пакет объединяет точные алгоритмы Монте-Карло-симуляции, основанные на библиотеке Geant4, с функциональными модулями для расчета различных параметров детекторов. В данной работе Allpix Squared используется для численного моделирования амплитудных спектров кремниевых PIN-сенсоров при облучении рентгеновскими квантами с энергиями 31, 60 и 81 кэВ.

Allpix Squared — это многофункциональная программная среда, разработанная для моделирования полупроводниковых пиксельных детекторов. Она написана на современном языке программирования C++ и предоставляет комплексный инструментарий для исследования детекторов на всех этапах их функционирования. Основные задачи, решаемые с помощью Allpix Squared, включают моделирование взаимодействия ионизирующего излучения с детектором, расчет дрейфа носителей заряда и формирование сигналов на выходе детектора.

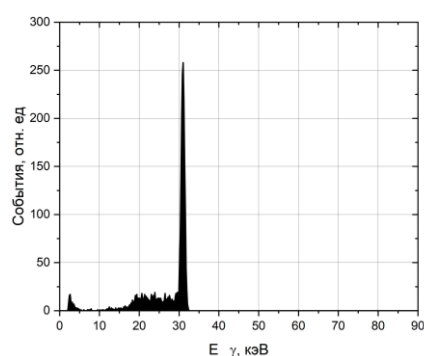
В качестве объекта моделирования выбраны кремниевые PIN-структуры с толщиной активного слоя 446 мкм. Профиль электрического поля в детекторе был предварительно рассчитан с помощью CAD-систем и загружен в Allpix Squared через модуль ElectricFieldReader.

Симуляция взаимодействия рентгеновских квантов с кремниевым кристаллом осуществлялась с помощью библиотеки Geant4. Энергия гамма-квантов варьировалась в диапазоне 31, 60 и 81 кэВ, а направление пучка было нормальным к поверхности сенсора. Модули TransientPropagation и WeightingField в Allpix Squared рассчитывали дрейф носителей заряда и весовой потенциал, что позволило сформировать временные импульсы тока на выходе детектора.

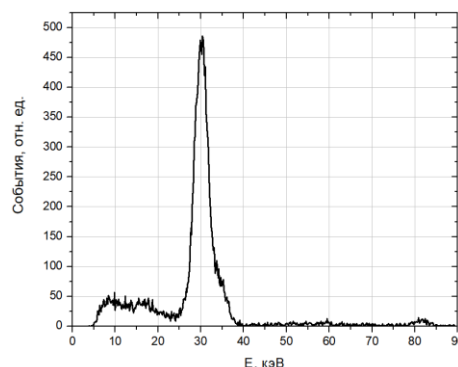
Для верификации модели были проведены расчеты амплитудных спектров при обратном смещении 100 В и сопоставление с экспериментальными данными. Экспериментальные спектры были получены на сенсорах того же типа с использованием источников излучения ^{241}Am (60 кэВ) и ^{133}Ba (31 и 81 кэВ) при комнатной температуре. Анализ спектров включал оценку положения пика и полуширины на уровне половины высоты пика.

Модель, реализованная в Allpix Squared, успешно воспроизводит положение пиков и общую форму амплитудных спектров. Однако рассчитанное энергетическое разрешение оказалось заниженным по сравнению с экспериментальными данными в среднем в три раза. Это расхождение обусловлено тем, что в текущей конфигурации модели не учитываются шумы усилительного тракта и флуктуации темнового тока в сенсоре.

На рисунке 1 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных спектров. В таблице 1 приведено сравнение энергетического разрешения. На этих графиках видно, что модель корректно описывает основные характеристики спектров, но требует доработки для учета дополнительных факторов, влияющих на энергетическое разрешение.



а)



б)

рис. 1 Сравнение экспериментального и расчетного амплитудного спектра для 31 кэВ: а) расчетный амплитудный спектр; б) экспериментальный амплитудный спектр ^{133}Ba

Таблица 4 – Сравнение экспериментального энергетического разрешения и расчетного
Энергия излучения, кэВ

31

60

81

Расчетное энергетическое разрешение, кэВ	1,034	1,210	0,867
Экспериментальное энергетическое разрешение, кэВ	3,149	3,076	3,289

В результате проведенных исследований была отработана методика моделирования амплитудных спектров кремниевых PIN-сенсоров рентгеновского излучения с использованием программного пакета Allpix Squared. Allpix Squared продемонстрировал свою гибкость и мощность как инструмент для симуляции амплитудных спектров, учитывая широкий набор физических процессов.

Дальнейшие исследования направлены на расширение характеристики шумов и адаптацию методики для моделирования других полупроводниковых материалов. Это позволит улучшить точность моделирования и расширить область применения Allpix Squared в различных научных и прикладных задачах.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0021.

Структурно геометрические неоднородности в приборах с объемным взаимодействием.**Юрченко Василий Иванович***Томский государственный университет*Email: yur_med@mail.ru

В настоящее время большой интерес представляют СВЧ системы, в том числе сверхширокополосного излучения на основе динамических систем с хаотическим поведением в объеме полупроводникового прибора. Спонтанное формирование движущихся областей сильного электрического поля – доменов Ганна, вызванное междолинным переносом электронов используется для сверхширокополосной СВЧ генерации [1]. Известный монополярный эффект Ганна (МДГ) характеризуется регулярной пространственно-временной динамикой, когда формируется единственный домен, который движется с постоянной скоростью дрейфа электронов. Движение МДГ приводит к колебаниям с периодом $T=W/v_n$, заданным временем пробега МДГ через образец длины W . Генерация дырок вследствие ударной ионизации в домене является нежелательным явлением, нарушающим работу диода Ганна.

Большие знакопеременные неоднородности концентрации и следовательно полей определяют зарождение и гашение большого числа МДГ даже при малых скоростях изменения поля в активной области и для не высоких напряжений. Как показано [2] средние знакопеременные неоднородности приводят к зависимости плотности тока от их величины. В этом случае уровень интегральной мощности шума выше, полоса генерации шума меньше. В этом случае интересен характер профиля проводимости с точки зрения получения шумов в заданной полосе частот. При малых знакопеременных неоднородностях режим шумовой генерации возможен лишь в случае многодоменных режимов. Это возможно в очень малой зоне вблизи порога и при условии, что приложенное к диоду напряжение нарастает быстрее 10^{12} В/сек, чем поглощается первым формирующимся доменом.

Для диодов с характерным наличием в объеме нескольких резко выраженных неоднородностей, в которых преобладающим механизмом образования шумовых колебаний будут процессы лавинообразования в доменах при прохождении доменов через эти области и их рассасывание на этих неоднородностях. МДГ зарождается на неоднородности с концентрацией меньшей средней по образцу и разрушается на неоднородностях с повышенной концентрацией, где поле ниже значения достаточного для поддержания стабильного движения МДГ. Если в образце имеют несколько знакопеременных неоднородностей различной величины, то МДГ должны случайным образом зарождаться и гаситься, то на одной, то на другой неоднородности. Колебания тока в этом случае представляют последовательность импульсов со случайным изменением амплитуды, периода и формы импульсов.

В последнее десятилетие в объемных приборах [3,4] обнаружены узкие ионизированные домены Ганна позднее получившие название коллапсирующие домены (КД). КД всегда оказываются ионизирующими (напряженность поля 300 кВ/см и более). КД в общем случае не сохраняют свою форму при распространении. В КД случае сосуществуют множественные домены, в то время как в МДГ многодоменные состояния неустойчивы. Пространственно-временная динамика множественных КД может быть охарактеризована как детерминированный пространственно-временной хаос. По-видимому, единственным общим свойством МДГ и КД является движение против поля со скоростью электронов. Ввиду сложной нелинейности аналитические подходы к теории КД до сих пор не разработаны. Хаотическая динамика КД приводит к высокочастотным колебаниям в цепи, широкий спектр которых включает обнаруженную экспериментально субтерагерцовую составляющую. Эта составляющая связана не с временем пробега домена через структуру, а со случайно распределенным “временем жизни” отдельного домена.

1.Юрченко В.И., Якубов В.П. «Физика радиоволн» Труды Всероссийской научной конференции. Томск. Изд. Томского университета. 2002. С. 35-40

2.Юрченко В.И. Влияние пространственной неоднородности проводимости генерирующих структур Ганна на широкополосность генерируемых сигналов. Сборник трудов конференции АПР 20213 С. 189.

3.Хлудков С.С., Толбанов О.П., Вилисова М. Д., Прудаев И.А. Полупроводниковые приборы на основе GaAs с глубокими центрами из-во ТГУ 2016 г.

4.Иванов М.С., Рожков А.В., Родин П.Б. Коллапсирующий домен Ганна, как механизм самоподдерживающего проводящего состояния в обратно смещенных высоковольтных GaAs диодах Письма ЖТФ 2022, Т.48, В.20 С.31-34.

Магнитная жидкость как естественный элемент оптоэлектронных систем в радиоэлектронике*Юрченко Василий Иванович**Юрченко Алексей Васильевич**Зятков Денис Олегович**Томский государственный университет**Email: yur_med@mail.ru*

Обеспечение безопасности и мониторинга различных систем включает широкую сферу деятельности, направленную на защиту от различного вида угроз, источником которых могут выступать три основные части: человек, природа и техногенная среда. Современные датчики, являющиеся важнейшими частями систем мониторинга в целом, из одного функционального средства определения текущих значений измеряемых величин постепенно превращаются в многофункциональные средства, которые решают еще целый ряд задач по диагностике, преобразованию измерительной информации, выполнению достаточно сложных алгоритмов управления [1]. Наибольшее развитие за рубежом и в России получили технологии, использующие в том числе, волоконно-оптические кабели, как наиболее экономически выгодные и позволяющие подключать большое число датчиков с высокой скоростью обмена данными. Магнитная жидкость (МЖ) выступает как естественный элемент измерения всех воздействий, преобразователь спектра и уровня мощности колебаний, функциональный элемент в обработке информации.

Ключевыми преимуществами данной системы станут гальваническая развязка, повышенная помехозащищенность и обеспечение высоких стандартов пожаровзрывобезопасности, что особенно актуально для эксплуатации в сложных энергонасыщенных условиях. Известны различные оптические устройства на основе МЖ, модуляторы, оптические переключатели, оптические решетки, ограничитель, датчик тока и сенсоры магнитного поля и тд.

Магнитооптические эффекты, возникающие в результате взаимодействия излучения с веществом, приводят не только к изменению дисперсионных кривых коэффициента поглощения и показателя преломления, но и к появлению или изменению оптической анизотропии среды (изменяется структура МЖ). Проведенный анализ данных работ выявил круг проблем, касающихся МЖ в качестве чувствительного элемента к внешнему полю [2].

Исследования обусловлены необходимостью улучшения параметров средств контроля полей естественного и техногенного происхождения на основе точных портативных приборов. Оптоволоконные элементы являясь высокочувствительными системами имеющие малые размеры находят применение в системах различного назначения и использование МЖ становятся полезным.

Ситуация осложняется также случайным характером процессов сбора и хранения разнородной информации например при решении горнотехнологических задач. Существует необходимость регламентированного получения данных и их настройка для последующей интеграции в различных вычислительных модулях, то есть требуется интеллектуальная обработка уже на стадии измерений и связь с базой данных. В связи с этим актуальной является задача разработки интегрированной информационной системы, обеспечивающей объединение разных типов пространственных данных и наборов прикладных программ и математических моделей.

1 Технологии, средства и принципы измерений на основе интеллектуальных датчиков. Монография / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, Югай В.В., Алдошина О.В., А.Д. Алькина. Карагандинский государственный технический университет – Караганда: Изд – во КарГТУ, 2018. – 123 с.

2. Юрченко В. И., Юрченко А. В., Зятков Д. О. Сенсоры магнитного поля для оптоволоконных систем на основе магнитных частиц Сборник трудов конференции АПР 2023 С 192



**ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ:
РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ**

АПР 2025
16-18 сентября 2025
Томск, Россия

Оптическая система связи на основе вихревых лагерь-гауссовых пучков

Лукин Игорь Петрович

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

E-mail: lukin_ip@iao.ru

В докладе представлены оценки возможности функционирования открытой оптической системы связи, использующей вихревые лагерь-гауссовы оптические пучки, в турбулентной атмосфере. Стратегия обнаружения для данной открытой оптической системы связи основывается на ортогональности вихревых лагерь-гауссовых оптических пучков. Передатчик кодирует символы сообщения в значения топологических зарядов вихревых лагерь-гауссовых оптических пучков. На приёмнике многоканальный корреляционный детектор по величине корреляционных метрик взаимной когерентности полей вихревых лагерь-гауссовых оптических пучков определяет величину топологического заряда, т.е. символ передаваемого сообщения. Атмосферная турбулентность, уширяя оптические пучки при их распространении в случайно-неоднородной среде, снижает уровень передаваемого полезного сигнала на приёмнике, что накладывает определённые ограничения на функционирование данной открытой оптической системы связи в атмосфере.

Применение оптических мод, несущих орбитальный угловой момент, в открытых оптических системах коммуникации обсуждалось в обзорной статье [1]. Эффективность приёмника прямого обнаружения в виде массива кольцевых детекторов проанализирована в работе [2] для открытой оптической системы связи, работающей на вихревых оптических пучках. В [3], при сравнении производительности открытых оптических систем связи, использующих соответственно “идеальные” оптические вихри и вихревые лагерь-гауссовы оптические пучки показано, что первая из оптических систем связи даёт меньшую частоту ошибок при той же мощности приёма. Система, где символы сообщений кодируются в радиальном индексе коаксиальных вихревых лагерь-гауссовых оптических пучков, а на приёмнике обнаружение достигается благодаря ортогональности этих пучков, исследовалась в [4]. Оптическая система связи свободного пространства, предназначенная для оптического вихревого мультиплексирования и демуплексирования большого объёма, представлена в работе [5], где в процессе детектирования применяется вихревая решётка Дамманна. Влияние усреднения апертуры на обнаружение топологического заряда рассмотрено в статье [6], результаты которой дают количественную оценку эффективности детектора топологического заряда в вихревых оптических системах связи. Как показано в работе [7], можно устранить искажения интенсивности и фазы пучков с орбитальным угловым моментом, вызванные турбулентностью атмосферы, используя адаптивную систему компенсации фазы без датчика волнового фронта. Экспериментальные, теоретические и численные исследования, проведённые в [8], привели авторов к неоднозначному выводу, что базисный набор полей, содержащих оптические вихри, не увеличивает телекоммуникационные возможности оптической системы связи. В статье [9] была предложена ещё одна возможная стратегия обнаружения сигнала, основанная на свойстве ортогональности вихревых гауссовых пучков при кодировании по топологическому заряду оптического пучка с многоканальным корреляционным детектором на приёмнике.

Данная публикация посвящена теоретическому обоснованию использования предложенной стратегии обнаружения для открытой оптической системы связи на основе вихревых лагерь-гауссовых оптических пучков. В ней проведён анализ корреляционных метрик взаимной когерентности второго порядка на приёмной апертуре полей вихревых лагерь-гауссовых оптических пучков с различными топологическими зарядами в зависимости от параметров пучков, размера приёмной апертуры и оптической толщи атмосферной турбулентности. Выражение для функции взаимной когерентности второго порядка вихревых лагерь-гауссовых оптических пучков в турбулентной атмосфере с различными топологическими зарядами получено в параксиальном приближении при помощи расширенного принципа Гюйгенса – Френеля. В процессе построения решения применялась квадратичная аппроксимация функции, описывающей искажающее влияние случайных неоднородностей атмосферной турбулентности на распространение оптического излучения.

Для когерентных высших порядков лагерь-гауссовых мод TEM_{mn} оптического пучка, распространяющегося в направлении оси координат X , поле на источнике при $x = 0$ зададим в виде [3–5]:

$$U_{0mn}(\mathbf{p}) = U_{0mn}(\rho, \varphi) = E_{mn} (-i)^m \left(\frac{\rho}{a_0} \right)^m \exp \left(-\frac{\rho^2}{2a_0^2} - i \frac{k}{R_0} \rho^2 \right) L_n^{(m)} \left(\frac{\rho^2}{a_0^2} \right) \exp(im\varphi), \quad (1)$$

где E_{mn} – начальная амплитуда TEM_{mn} моды оптического пучка; $\mathbf{p} = \{y, z\} = \{\rho, \varphi\}$ – поперечная к направлению распространения оптического излучения пространственная координата; $\rho = \sqrt{y^2 + z^2}$, $\varphi = \arctan(z/y)$ – модуль и аргумент этой координаты; a_0 – начальный радиус TEM_{00} моды пучка; R_0 – радиус кривизны параболического волнового фронта в центре излучающей апертуры; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число оптического излучения; λ – длина волны оптического излучения в вакууме; $L_n^{(m)}(\cdot)$ – обобщённый многочлен (полином) Лагерра; $m, n = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа, безразмерные величины, определяющие моды лагерь-гауссова пучка (соответственно n и m – радиальное и угловое модовые числа). Отметим, что для лагерь-гауссова оптического пучка угловое модовое число m определяет величину топологического заряда вихря оптического пучка.

Корреляционные метрики взаимной когерентности второго порядка на круглой приёмной апертуре для вихревых лаггерр-гауссовых пучков при $n_1 = n_2 = 0$ с одинаковыми геометрическими параметрами, но различными значениями топологических зарядов m_1 и m_2 аналогично [9] можно определить таким образом:

$$M_2(m_1, m_2) = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi_R \int_0^{a_r} dR \Gamma_{2m_1m_2}(x, R, \varphi_R)}{\sqrt{P_0(m_1)P_0(m_2)}}, \quad (2)$$

где $\Gamma_{2m_1m_2}(x, R, \varphi_R) = \Gamma_{2m_1m_2}(x, \mathbf{R}, 0)$ – функция взаимной когерентности второго порядка вихревых лаггерр-гауссовых оптических пучков с различными значениями топологических зарядов; $\{x, \mathbf{R}\}$ – координаты точки наблюдения; x – расстояние от плоскости источников до плоскости приёмника; $\mathbf{R} = \{R, \varphi_R\}$ – полярные координаты вектора точки наблюдения; $P_0(m)$ – поток оптического излучения вихревого лаггерр-гауссова оптического пучка с топологическим зарядом m в плоскости приёмника; a_r – радиус круглой приёмной апертуры. Корреляционные метрики взаимной когерентности второго порядка для вихревых лаггерр-гауссовых оптических пучков (2) при распространении в однородной среде или турбулентной атмосфере, вследствие ортогональности вихревых лаггерр-гауссовых оптических пучков, принимают следующий вид:

$$M_2(m_1, m_2) = \begin{cases} M_2(m_1, m_2) \leq 1 & [m_1 = m_2], \\ 0 & [m_1 \neq m_2]. \end{cases} \quad (3)$$

Необходимо подчеркнуть, что корреляционные метрики взаимной когерентности на круглой приёмной апертуре для вихревых лаггерр-гауссовых оптических пучков для $m_1 = m_2$ (3) при $a_r \rightarrow \infty$ равны единице, а при конечном размере приёмной апертуры a_r всегда меньше единицы. Корреляционные метрики взаимной когерентности второго порядка вихревых лаггерр-гауссовых оптических пучков, рассчитанные по формуле (2), представлены на рис. 1 и 2.

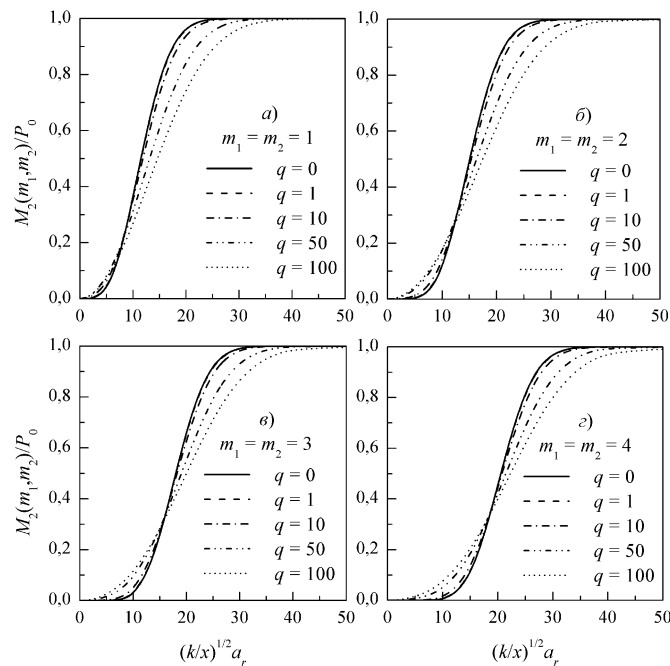


рис. 1 Корреляционные метрики взаимной когерентности второго порядка на приёмной апертуре

для коллимированных вихревых лаггерр-гауссовых пучков при $\Omega_0 = 100$

На рис. 1 изображены корреляционные метрики в случае коллимированных ($\eta = 0$) вихревых лаггерр-гауссовых пучков для $\Omega_0 = 100$ при различных значениях оптической толщи турбулентной атмосферы q , а на рис. 2 – аналогичные вихревые лаггерр-гауссовы пучки сфокусированные на приёмную апертуру: $\eta = 1$. Здесь $\eta = x/R_0$ – параметр фокусировки оптического пучка [10], $\Omega_0 = ka_0^2/x$ – число Френеля передающей апертуры [10],

$q = x/(k\rho_0^2)$ – параметр, определяющий оптическую толщину турбулентной атмосферы [10], а ρ_0 – радиус когерентности плоской оптической волны в турбулентной атмосфере [10].

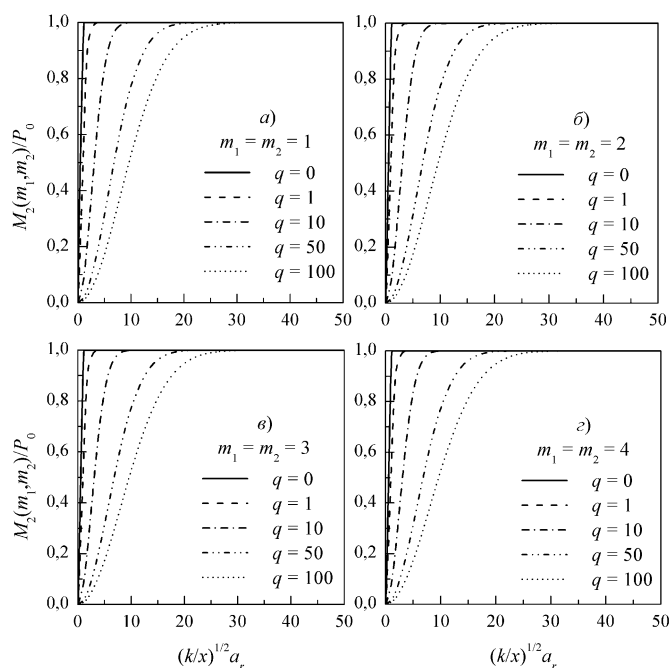


рис. 2 Корреляционные метрики взаимной когерентности второго порядка на приёмной
апертуре

для сфокусированных вихревых лаггер-гауссовых пучков при $\Omega_0 = 100$

Уровень корреляционных метрик взаимной когерентности второго порядка на приёмной апертуре для вихревых лаггер-гауссовых пучков достигает $\approx 0,80$ в случае коллимированных пучков при размере приёмной апертуры $\sqrt{k/x}a_r \approx 15...30$ (см. рис. 1), а в случае сфокусированных на приёмную апертуру пучков – при $\sqrt{k/x}a_r \approx 2...15$ (см. рис. 2).

В работе проведён теоретический анализ поведения корреляционных метрик взаимной когерентности второго порядка на приёмной апертуре полей вихревых лаггер-гауссовых оптических пучков с различными значениями топологических зарядов в зависимости от параметров пучков, размера приёмной апертуры и оптической толщины атмосферной турбулентности. Показано, что возможность открытой оптической системы связи, использующей вихревые лаггер-гауссовы оптические пучки, на основе кодирования по топологическому заряду вихревого пучка с многоканальным корреляционным детектором на приёмнике существенно не ограничена искажающим влиянием атмосферной турбулентности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список публикаций:

- [1] Trichili A., Park K.-H., Zghal M., Ooi B. S., Alouini M.-S. // *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*. 2019. V. 21. N 4. P. 3175.
- [2] Kupferman J., Arnon Sh. // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2018. V. 35. N 9. P. 1543.
- [3] Shao W., Huang S., Liu X., Chen M. // *Opt. Commun.* 2018. V. 427. P. 545.
- [4] Guo Z., Wang Z., Dedo M. I., Guo K. // *IEEE Photon. J.* 2018. V. 10. N 5. 7906511.
- [5] Wang Z., Zhang N., Yuan X.-C. // *Opt. Express*. 2011. V. 19. N 2. P. 482.
- [6] Gu Y. // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2013. V. 30. N 4. P. 708.
- [7] Yang J., Zhang H., Zhang X., Li H., Xi L. // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. N 5. 901.
- [8] Chen M., Dholakia K., Mazilu M. // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. 22821.
- [9] Eyyuboglu H. T. // *J. Opt. Soc. Amer. A*. 2020. V. 37. N 10. P. 1531.
- [10] Andrews L. C., Phillips R. L. *Laser beam propagation through random media*. 2nd ed. – Bellingham, Washington: SPIE Press, 2005.

Теорема Ван-Циттерта – Цернике для лагерь-гауссовых оптических пучков

Лукин Игорь Петрович

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

E-mail: lukin_ip@iao.ru

Проведено теоретическое исследование характеристик когерентности лагерь-гауссовых пучков некогерентного оптического излучения, распространяющихся в однородной среде. Рассматривается поведение средней интенсивности, степени когерентности и фазы комплексной степени когерентности некогерентных лагерь-гауссовых оптических пучков в однородной среде. Показано, что при распространении некогерентного лагерь-гауссова оптического пучка в однородной среде увеличение любого из модовых чисел (как радиального, так и углового модового числа) приводит к относительному снижению уровня когерентности данного пучка по сравнению с некогерентным гауссовым оптическим пучком.

Среди всего множества типов оптических пучков существуют такие пучки, которые так самосогласованны, что сохраняют свою структуру при распространении и фокусировке с точностью до масштаба [1]. Эти пучки являются собственными модами лазерных резонаторов и описываются двумя семействами специальных функций с различными типами симметрии: эрмит-гауссовы и лагерь-гауссовы оптические пучки [2]. Лагерь-гауссовы оптические пучки, обладающие вращательной симметрией, активно изучаются в интересах решения различных практических задач [3–11].

В данной работе рассматривается распространение некогерентного оптического излучения в однородной среде. Проанализированы особенности поведения средней интенсивности, степени когерентности и фазы комплексной степени когерентности лагерь-гауссовых пучков некогерентного оптического излучения. При описании когерентных свойств оптического излучения используется представление в параксиальном приближении для поперечной функции взаимной когерентности второго порядка, базирующееся на принципе Гюйгенса – Френеля. В работе изучено влияние функциональной зависимости распределения интенсивности на источнике некогерентного оптического излучения на когерентные свойства лагерь-гауссовых пучков.

Для некогерентных высших порядков лагерь-гауссовых мод TEM_{mn} коллимированного оптического пучка, распространяющегося в направлении оси координат x , функцию взаимной когерентности второго порядка поля источника $U_0(\mathbf{p})$ при $x=0$ зададим в виде [12–14]:

$$\Gamma_2^{(0)}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \overline{U_0(\mathbf{p}_1)U_0^*(\mathbf{p}_2)} = \eta_0 E_{mn}^2 \left(\frac{(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2}{4a_0^2} \right)^m \exp \left(-\frac{(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2}{4a_0^2} \right) \left[L_n^{(m)} \left(\frac{(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2}{4a_0^2} \right) \right]^2 \delta(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2), \quad (1)$$

где черта сверху обозначает усреднение по ансамблю реализаций флуктуаций источника оптического излучения; E_{mn} – начальная амплитуда TEM_{mn} моды пучка; $\mathbf{p} = \{y, z\} = \{\rho, \varphi\}$ – поперечная к направлению распространения оптического излучения пространственная координата (в положительном направлении оси координат x); a_0 – начальный радиус TEM_{00} моды пучка; $L_n^{(m)}(\cdot)$ – обобщённый многочлен (полином) Лагерра; $m, n = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа, определяющие моды лагерь-гауссова оптического пучка (соответственно n и m – радиальное и угловое модовые числа); $\delta(\cdot)$ – дельта-функция Дирака; $\eta_0 = 4\pi/k^2$ – нормировочная константа [12]; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число оптического излучения; λ – длина волны оптического излучения в вакууме. Отметим, что для лагерь-гауссова оптического пучка угловое модовое число m определяет величину топологического заряда вихря оптического пучка.

Описание когерентных свойств некогерентных лагерь-гауссовых оптических пучков, распространяющихся в однородной среде, в параксиальном приближении проведём с использованием поперечной функции взаимной когерентности второго порядка [15] поля оптического пучка $U(x, \mathbf{p}) \equiv E(x, \mathbf{p}) \exp(ikx)$: $\Gamma_2(x, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \overline{U(x, \mathbf{p}_1)U^*(x, \mathbf{p}_2)} \equiv \overline{E(x, \mathbf{p}_1)E^*(x, \mathbf{p}_2)}$, где $E(x, \mathbf{p})$ – комплексная амплитуда некогерентного лагерь-гауссова оптического пучка; $\{x, \mathbf{p}_1\}$ и $\{x, \mathbf{p}_2\}$ – точки наблюдения; x – длина трассы распространения оптического излучения.

Если точки наблюдения выбраны симметрично относительно оптической оси пучка, то для некогерентного лагерь-гауссова оптического пучка (1) аналитическое выражение, описывающее в параксиальном приближении поперечную функцию взаимной когерентности второго порядка поля оптического пучка при распространении в однородной среде, принимает следующий вид:

$$\Gamma_2(x, \mathbf{R}, \mathbf{p}) \equiv \frac{2\eta_0 E_{mn}^2}{\pi \rho_v^2(x)} \exp \left(i \frac{k}{x} \mathbf{R} \mathbf{p} \right) \int_0^\infty d\rho' \rho'^{2m+1} \exp(-\rho'^2) \left[L_n^{(m)}(\rho'^2) \right]^2 J_0 \left(\frac{2\rho \rho'}{\rho_v(x)} \right), \quad (2)$$

где $\mathbf{R} = (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)/2$ и $\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2$ – суммарная и разностная координаты точек наблюдения; $\rho_v(x) = 2x/(ka_0)$ – радиус когерентности некогерентного оптического излучения в однородной среде для гауссова оптического пучка с начальным радиусом a_0 [6]. Уравнение (2) является конкретной математической формулировкой

теоремы Ван-Циттерта – Цернике [12–14]. Сходные по форме выражения часто встречаются в основанной на принципе Гюйгенса – Френеля элементарной теории дифракции [13, 14], что делает эту формулу полезной при решении вопросов когерентности в инструментальной оптике.

Соответственно в случае некогерентного лаггерр-гауссова оптического пучка (1) выражение для средней интенсивности пучка в однородной среде имеет следующий вид:

$$\overline{I(x)} = \frac{\eta_0 E_{mm}^2}{\pi \rho_v^2(x)} \int_0^\infty d\rho' (\rho')^m \exp(-\rho') [L_n^{(m)}(\rho')]^2 = \eta_0 E_{mm}^2 \frac{\Gamma(n+m+1)}{\pi n!} \frac{1}{\rho_v^2(x)}. \quad (3)$$

Как следует из соотношения (3), средняя интенсивность некогерентного лаггерр-гауссова оптического пучка в параксиальной области вблизи оптической оси пучка не зависит от точки наблюдения в плоскости, поперечной к направлению распространения оптического излучения.

По функции взаимной когерентности второго порядка (2) и средней интенсивности (3) некогерентного лаггерр-гауссова пучка можно оценить его нормированную функцию взаимной когерентности второго порядка (комплексную степень когерентности) некогерентного лаггерр-гауссова оптического пучка [15]:

$$\gamma_2(x, \mathbf{R}, \rho) = \Gamma_2(x, \mathbf{R}, \rho) / \overline{I}. \quad (4)$$

Знание комплексной степени когерентности (4) позволяет получить данные для модуля комплексной степени когерентности (степени когерентности) $\mu(x, \rho)$ и фазы комплексной степени когерентности $\theta(x, \rho)$ некогерентного лаггерр-гауссова оптического пучка на его оптической оси ($R = 0$):

$$\mu(x, \rho) = \sqrt{\{\operatorname{Re}[\gamma_2(x, 0, \rho)]\}^2 + \{\operatorname{Im}[\gamma_2(x, 0, \rho)]\}^2} \quad (5)$$

и

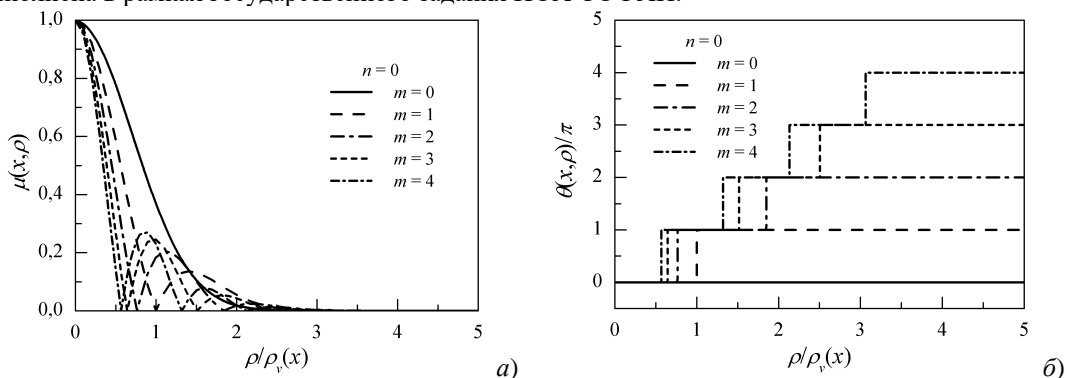
$$\theta(x, \rho) = \arctan \{\operatorname{Im}[\gamma_2(x, 0, \rho)] / \operatorname{Re}[\gamma_2(x, 0, \rho)]\}. \quad (6)$$

Характеристики когерентности: степень когерентности $\mu(x, \rho)$ (3) и фаза комплексной степени когерентности $\theta(x, \rho)$ (4) лаггерр-гауссовых пучков некогерентного оптического излучения (1) в однородной среде представлены на *рис. 1а, в, д* и *рис. 1б, г, е*, соответственно.

Для расчёта степени когерентности $\mu(x, \rho)$ использовались формулы (2)–(5), а для расчёта фазы комплексной степени когерентности $\theta(x, \rho)$ – формулы (2)–(4) и (6). *Рис. 1а* и *рис. 1б* соответствуют случаю некогерентных вихревых гауссовых пучков ($n = 0$), *рис. 1в* и *рис. 1г* – случаю некогерентных безвихревых лаггерр-гауссовых оптических пучков ($m = 0$), а *рис. 1д* и *рис. 1е* – некогерентным вихревым лаггерр-гауссовым оптическим пучкам ($m = n$).

Результаты, полученные в работе, можно сформулировать следующим образом: 1) когерентность некогерентных лаггерр-гауссовых оптических пучков при распространении в однородной среде существенно зависит как от величины радиального n , так и углового m модовых чисел; 2) увеличение любого из этих модовых чисел приводит к уменьшению когерентности оптического пучка; 3) при отличии от нуля углового модового числа m для комплексной степени когерентности формируется кольцевая дислокация (см. *рис. 1б* и *рис. 1е*); 4) при отличии от нуля радиального модового числа n (но нулевом значении углового модового числа m) для комплексной степени когерентности кольцевая дислокация не формируется (см. *рис. 1г*); 5) однако, если кольцевая дислокация существует (при ненулевом значении углового модового числа m), то её структура усложняется как при увеличении углового m , так и радиального n модовых чисел (см. *рис. 1е*).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.



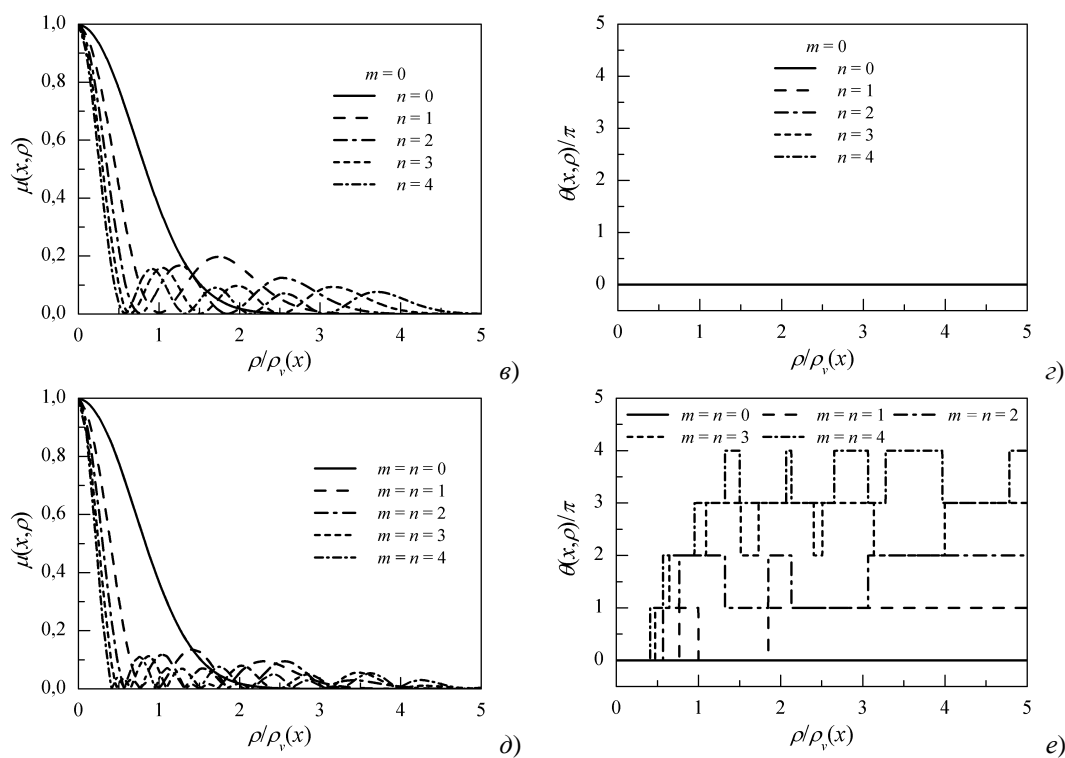


рис. 1 Степень когерентности $\mu(x, \rho)$ и фаза комплексной степени когерентности $\theta(x, \rho)$ некогерентных лаггер-гауссовых оптических пучков в однородной среде

Список публикаций:

- [1] Abramochkin E. G., Volostnikov V. G. // Adv. Phys. Sci. 2004. V. 47. N 12. P. 1177.
- [2] Andrews D. L. Structured light and its applications: An introduction to phase-structured beams and nanoscale optical forces. – New York : Academic Press, 2008.
- [3] Kuga T., Torii Y., Shiokawa N., Hirano T., Shimizu Y., Sasada H. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. N 25. P. 4713.
- [4] Jia B., Gan X., Gu M. // Opt. Express. 2005. V. 13. N 25. P. 10360.
- [5] Matsumoto N., Ando T., Inoue T., Ohtake Y., Fukuchi N., Hara T. // J. Opt. Soc. Amer. A. 2008. V. 25. N 7. P. 1642.
- [6] Eyyuboglu H. T., Baykal Y., Ji X. // Appl. Phys. B. 2010. V. 98. N 4. P. 857.
- [7] Yüceer M., Eyyuboglu H. T., Lukin I. P. // Appl. Phys. B. 2010. V. 101. N 4. P. 901.
- [8] Mendoza-Hernandez J., Arroyo-Carrasco M. L., Iturbe-Castillo M. D. S. // Opt. Lett. 2015. V. 40. N 16. P. 3739.
- [9] Marakasov D. A., Rytchkov D. S. // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29. N 5. P. 447.
- [10] Doster T., Watnik A. T. // Appl. Opt. 2016. V. 55. N 36. P. 10239.
- [11] Khonina S. N., Karpeev S. V., Pararin V. D. // Opt. Lasers Eng. 2018. V. 105. P. 68.
- [12] Beran M. J., Parrent G. B. Theory of partial coherence. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1964.
- [13] Born M., Wolf E. Principles of optics. 4th ed. – New York: Pergamon Press, 1968.
- [14] Wolf E. Introduction to the theory of coherence and polarization of light. – New York: Cambridge Press, 2007.
- [15] Andrews L. C., Phillips R. L. Laser beam propagation through random media. 2nd ed. – Bellingham, Washington: SPIE Press, 2005.

Полевые исследования канала оптической связи вне прямой видимости с БПЛА через границу раздела «вода-атмосфера» на длине волны 450 нм

Познахарев Егор Сергеевич

Тарасенков Михаил Викторович, Федосов Андрей Васильевич, Белов Владимир Васильевич

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

E-mail: 724_pes1992@iao.ru

Введение. Лазерная оптическая связь, является одним из перспективных направлений развития систем коммуникации в настоящее время для связи с беспилотными устройствами. Основным преимуществом таких систем связи является возможность передачи данных с высокой скоростью, по сравнению с радиодиапазоном и помехозащищенность от электромагнитных возмущений. Системы лазерной оптической связи по способу организации связи разделяются на два типа: 1) Оптическая связь в прямой видимости (line-of-sight – LOS); 2) Оптическая связь вне прямой видимости (non-line-of-sight – NLOS). Системы оптической связи в прямой видимости, несмотря на обеспечение высокой скорости передачи данных, не могут нормально функционировать при наличии на линии связи посторонних объектов или мутных сред. При осуществлении такой связи количество абонентов существенно ограничено размерами пучка передатчика, а передача данных на большие расстояния, может привести к выходу лазерного пучка за пределы апертуры приемника из-за наличия турбулентности. Системы лазерной оптической связи вне прямой видимости по большей части лишены этих недостатков и их особенность состоит в том, что полезным сигналом является рассеянное или отражённое излучение. Реализация данного типа связи с беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) позволяет осуществлять непрерывную передачу данных на рассеянном излучении при произвольном перемещении БПЛА.

В последние несколько лет ведутся активные исследования систем оптической связи с БПЛА. Развиваются системы атмосферной оптической связи в прямой видимости с БПЛА [1, 2], атмосферной оптической связи вне прямой видимости [3,4], подводной оптической связи с подводным беспилотником в прямой видимости [5,6], системы связи через границу раздела вода - атмосфера с БПЛА в прямой видимости [7,8]. В системе связи с БПЛА в прямой видимости используется в том числе система ретрансляции сигнала на поверхности водоема [1]. Рассматривается канал оптической связи на длинах волн 1550 нм в атмосфере протяженностью 1200 м и 532 нм в воде протяженностью 18 м. В [2] обсуждается возможность дуплексной связи с БПЛА в прямой видимости на расстоянии в 50 м на длине волны восходящей линии связи в 1590 нм и 1530 нм для нисходящей линии связи. В статье [4] теоретически исследуется схема NLOS связи БПЛА с последовательно расположенными передающими устройствами на земной поверхности. Изучается канал оптической связи на длине волны 265 нм при высоте полета БПЛА в 100 м и максимальном удалении БПЛА от передающих устройств в 1200 м. В [6] для длины волны 532 нм и расстояний от 1 до 100 м теоретически оцениваются возможности подводной оптической LOS связи и оптической NLOS связи с полным внутренним отражением от поверхности воды. В работе [7] рассматривается система оптической LOS связи через границу раздела вода-атмосфера на базовом расстоянии до 10 м на длине волны 450 нм. В статье [8] создана дуплексная система оптической LOS связи через границу раздела вода – атмосфера между подводным беспилотником и БПЛА на длине волны 850 нм при глубине погружения подводного беспилотника в 1,2 м, высоте полета БПЛА в 10 м. Согласно выполненному анализу предшествующих работ, изучаемое нами направление является новым и перспективным для развития современных систем связи.

Ранее нами в рамках экспериментальных исследований атмосферной оптической связи вне прямой видимости с БПЛА на длинах волн 450 и 510 нм, описанных в работе [9], было показано, что при организации связи по схеме БПЛА (передатчик) – земная поверхность (приемник), на длине волны 450 нм и высоте БПЛА h до 20 м возможно установление связи на расстояниях до 150 м с вероятностью приема ошибочных символов не более 0,23. При организации связи по схеме земная поверхность (передатчик) – БПЛА (приемник) установлено, что возможно осуществление передачи данных на длине волны 450 нм, расстояниях до 50 м и высотах БПЛА до 30 м с вероятностью регистрации ошибочно принятого символа не более 0,08, а также на длине волны 510 нм, расстояниях до 385 м и высотах БПЛА до 20 м с вероятностью регистрации ошибочно принятого символа не более 0,099. Основная цель настоящей работы заключается в определении схем и условий для осуществления стабильной оптической NLOS связи через границу раздела «вода – атмосфера» на длине волны 450 нм при размещении передающего устройства под водой, а приемного – на БПЛА, по полученным значениям вероятностей регистрации ошибочно принятых символов и их среднеквадратичных отклонений (СКО).

Методика экспериментов и аппаратура. Исследования канала оптической связи вне прямой видимости через границу раздела «вода- атмосфера» с БПЛА осуществлялись с использованием разработанного ранее макета оптико-электронной системы оптической связи, описанного в работе [9]. Проведены 2 серии полевых экспериментов, одна из которых выполнена на полигоне ИОА СО РАН, а другая – на южном берегу оз. Мальцево в п. Самусь Томского района (56.751° с.ш., 84.744° в.д.). Первая серия исследований проводилась для получения предварительных оценок возможности передачи данных через границу раздела вода-атмосфера при размещении передающего устройства в емкости объемом в 200 л и наполненной водопроводной водой. Вторая серия экспериментов проводилась для получения основных результатов, демонстрирующих возможность осуществления связи на природном водоеме при размещении передающего устройства в воде оз. Мальцево. Согласно схеме (рис.1) полевые исследования организовывались следующим образом. Передающее устройство размещалось на глубине d равной 80 см в бочке или на глубине d равной 1 м в озере перпендикулярно границе

раздела «вода-воздух» и отправляло информационные сигналы в канал связи. В качестве передающего устройства использовался лазерный модуль, генерирующий излучение с длительностью импульса $\Delta t = 2$ мкс, средней мощностью излучения в импульсе $N = 6$ Вт; частотой повторения импульсов $\nu = 14$ кГц. На расстоянии L и высоте h располагалась приемная система на основе фотоэлектронного умножителя, регистрирующая рассеянное излучение атмосферой и водой после его преломления границей раздела «вода-воздух». Для настройки системы связи оптическая ось приемной системы ориентировалась поворотом БПЛА в направлении на оптическую ось передатчика так, чтобы угол расходимости передатчика ν_s равный $0,37^\circ$ и угол поля зрения приемника ν_r равный 2° пересекались, образуя область V . Кодирование и декодирование информационного сигнала осуществлялось по принципу время-импульсной модуляции. Во время экспериментальных исследований оценивалось влияние изменений таких параметров как угол места приемника θ_r , расстояние связи L , высота БПЛА h на качество связи.

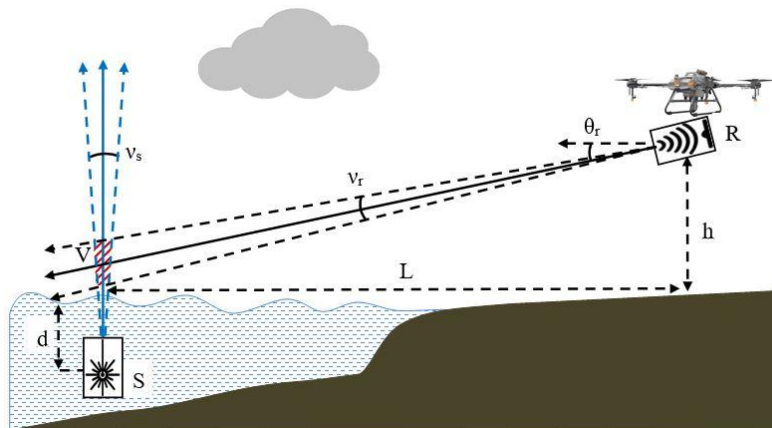


рис.1 Схема полевого исследования канала оптической связи вне прямой видимости через границу раздела «вода-воздух» на длине волны 450 нм (вид сбоку). ν_s – угол расходимости лазерного пучка; ν_r – угол поля зрения приёмника; θ_r – угол места приёмника; S – источник; R – приемник; L – расстояние от проекции источника на поверхности озера до проекции приемника на поверхности земной поверхности; d – глубина погружения источника; h – высота БПЛА с приемником

Для оценки качества связи в данной работе использовался способ, позволяющий определить вероятность регистрации ошибочно принятого символа \bar{P} за сеанс связи, а также её среднеквадратичное отклонение (СКО) σ по формулам (3) и (4). Применение данного подхода для оценки качества связи используется также в зарубежных публикациях [10] и называется symbol error rate (SER). Далее рассмотрен способ определения вероятности регистрации ошибочно принятого символа \bar{P} и её СКО. Пусть имеется m пакетов символов по n символов в каждом. Пусть $x_{i,j}$ – i -й переданный символ, j -го пакета символов, а $y_{i,j}$ – i -й принятый символ j -го пакета символов. Рассмотрим показатель правильности регистрации символов $z_{i,j}$ определяемый по формуле (1):

$$z_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{i,j} = y_{i,j} \\ 1, & \text{если } x_{i,j} \neq y_{i,j} \end{cases} \quad (1)$$

Тогда формула для оценки вероятности регистрации ошибочно принятого символа в j -ом пакете символов будет иметь вид (2):

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^n z_{i,j}}{n} \quad (2)$$

При оценке вероятности регистрации ошибочно принятого символа за сеанс связи формула (2) примет вид (3):

$$\bar{P} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n z_{i,j}}{nm} \quad (3)$$

Среднеквадратичное отклонение для \bar{P} имеет вид (4):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_j^2 - \bar{P}^2} \quad (4)$$

Результаты полевых исследований. Первая серия полевых экспериментов выполнялась 14.09.2023 г. в вечернее время. Исследования осуществлялись при следующих параметрах атмосферной и водной сред: температура воздуха 16°C ; влажность воздуха 76%; коэффициент ослабления воды на длине волны 450 нм $\beta_{ext} = 0,5 \text{ м}^{-1}$. Во время проведения экспериментов следующие параметры схемы связи изменялись в указанных пределах: высота БПЛА h от 10 до 40 м; расстояние связи L от 10 до 50 м; угол места оптической оси приемной системы θ_r от -20

до -45° . Оптическая ось приемной системы в 1ой и 2ой сериях экспериментов лежала в плоскости направления на источник (компланарная схема связи). Значения вероятностей регистрации ошибочно принятых символов за сеанс связи \bar{P} и их СКО σ , полученные в первой серии экспериментов приведены в таблице:

$\theta_r, ^\circ$	$h, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	\bar{P}	σ
-20	10	50	0.001	0.0021
-20	30	70	0.00037	0.001
-45	10	10	0	0
-45	20	20	0	0
-45	40	20	0	0
-45	40	40	0	0

Согласно полученным в первой серии результатам полевых исследований показано, что разработанная система оптической связи вне прямой видимости позволяет осуществлять почти безошибочную связь через границу раздела вода-воздух на расстояниях больше 70 м.

Вторая серия полевых исследований проводилась также в вечернее время 21.09.2023 г. Эксперименты проводились при следующих параметрах атмосферной и водной сред: приземная температура воздуха 11°C , влажность воздуха 89%; коэффициент ослабления воды $\beta_{ext} = 3,7 \text{ м}^{-1}$. Рассматривались следующие схемы связи: h от 20 до 45 м; L от 35 до 80 м и θ_r от -20 до -45° . Значения полученных в экспериментах \bar{P} и их СКО σ представлены в таблице:

$\theta_r, ^\circ$	$h, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	\bar{P}	σ
-20	20	55	0	0
-20	20	75	0.006	0.014
-20	30	90	0.015	0.024
-45	35	35	0	0
-45	35	55	0	0
-45	45	80	0.113	0.078

Результаты полевых исследований полученные в первой серии экспериментов показали, что при размещении передатчика в ёмкости 200 литров с водопроводной водой на глубине $d=80$ см при углах места оптической оси приемной системы от горизонтали $\theta_r = -20$ и -45° и компланарной схеме связи возможна устойчивая оптическая связь вне прямой видимости с БПЛА через границу раздела вода – атмосфера на расстояниях $L \leq 50$ м и высотах БПЛА $h \leq 40$ м со значением \bar{P} не более 0,001.

Полученные во второй серии результаты экспериментальных исследований на оз. Мальцево (коэффициент ослабления воды $\beta_{ext} = 3,7 \text{ м}^{-1}$) при размещении передающего устройства на глубине в $d=1$ м, значениях угла места оптической оси приемной системы в $\theta_r = -20^\circ$ показали, что возможно осуществление стабильной оптической связи вне прямой видимости до расстояний $L=90$ м и высотах расположения БПЛА до $h=30$ м со значением \bar{P} не более 0,015. При ориентации оптической оси приемной системы под углом места в $\theta_r = -45^\circ$ удалось организовать устойчивую связь вплоть до расстояний $L = 80$ м и высотах БПЛА до $h=45$ м со значением \bar{P} не более 0,113. При больших базовых расстояниях и высотах БПЛА устойчивую оптическую связь вне прямой видимости организовать не удалось. Согласно теоретическим оценкам, представленным в работе [11], это обосновывается тем, что для ситуаций, когда оптическая ось приемной системы пересекается с границей раздела «вода-воздух» до выхода лазерного излучения в атмосферный канал, полезный сигнал в таком случае формируется в основном рассеянным в воде излучением. При росте расстояния L от области выхода лазерного излучения из воды полезный сигнал будет формироваться главным образом многократно рассеянным в воде излучением, что приведет к существенному ослаблению сигнала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-22-00830 и бюджетного проекта FWRU-2021-0002.

Список публикаций:

- [1] Ghanbari M., Ataee M., Sajad Sadough S. M. // 2022 4th West Asian Symposium on Optical and Millimeter-wave Wireless Communications (WASOWC). Tabriz. Iran. Islamic Republic of, 2022. P. 1-5.
- [2] Park S., Yeo C.I., Heo Y.S., Ryu J.H., Kang H.S., Lee D.-S., Jang, J.-H. // Sensors. 2022. V. 22. №. 7770.
- [3] Nzekwu, N.J.; Fernandes, M.A.; Fernandes, G.M.; Monteiro, P.P.; Guiomar, F.P. // Photonics. 2024. V. 11. №. 274.
- [4] Tadayoni H., Ardakani M. H., Heidarpour A. R., Uysal M. // IEEE Wireless Communications Letters. 2022. V. 11. №. 1. P. 178-182.
- [5] Yasui Y., Shigenawa A., Nakayama Y. // Drone-based Underwater Sensor Network with Optical Camera Communication. 2023. P.1-5.
- [6] Salam R., Srivastava A., Bohara V. A., Ashok A., // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2023. V. 4. P. 1774-1786.
- [7] Sun X. et al. // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 160480-160489.
- [8] Takahiro K., Ayumu K., Kiichiro K., Fumiya K., Keiji S., Shogo H. // Real-time full-duplex transmission experiment for air and underwater invisible light communication system. 2024.
- [9] Tarasenkova M.V.; Poznakharev E.S.; Fedosov A.V. // Atmosphere. 2024. V. 15. № 21.
- [10] Thrampoulidis C., Xu W., Hassibi B. // IEEE Transactions on Signal Processing. 2018. V. 66. N. 13. P. 3377-3392.
- [11] Тарасенков М. В., Познахарев Е. С., Федосов А. В., Кудрявцев А. Н., Белов В. В. // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 01. С. 7–13.

Обнаружение облачности на AllSky-изображениях методами машинного обучения*Попова Софья Дмитриевна¹**Елизаров Алексей Игоревич^{1,2}**¹Томский государственный университет**²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН**E-mail: sofia.popova20180520@gmail.com*

Методы компьютерного зрения играют важную роль в современных системах обработки визуальной информации, обеспечивая эффективную идентификацию объектов в различных областях, таких как видеонаблюдение, робототехника и медицина [1]. Задача обнаружения объектов является ключевой в современных системах анализа данных, поскольку позволяет автоматически находить и локализовать важные элементы на изображениях или видео. В частности, обнаружение облачности играет важную роль в метеорологии и климатологии, где задача точного анализа облачности необходима для улучшения прогнозов погоды, управления энергией Солнца и изучения влияния атмосферных процессов на земную экосистему.

Традиционные способы, такие как спутниковая съёмка и наземные измерения, обладают существенными недостатками: они дорогие, трудоёмкие и нередко подвержены к погрешностям измерений. Решить данную проблему призваны современные методы компьютерного зрения, способные оперативно и точно оценивать состояние облачного покрова на изображениях, снятых AllSky-камерой (камерой полного неба) [2, 3, 4]. Тем не менее, эта задача осложняется значительным разнообразием форм, размеров, плотностей и оттенков облаков, а также влиянием условий освещения на восприятие изображений. Именно поэтому классические методы анализа изображений становятся неэффективными [3]. В настоящее время актуальны методы глубокого обучения, такие как свёрточные нейронные сети, способные добиваться высокого уровня точности даже в сложных условиях.

Целью нашего исследования – разработка системы для обнаружения облачности на AllSky-изображениях, полученных с помощью панорамно-оптической станции «TomSky» [4], с применением нейросетевых алгоритмов, обеспечивающей высокую точность, скорость работы и адаптивность к различным условиям съёмки. Основной акцент сделан на сборе, разметке и подготовке данных, а также обучении моделей для методов детекции и сегментации облаков. Метод детекции отличается от сегментации тем, что выявляет объекты на изображении, обозначая их местоположение ограничивающими рамками, то есть действует на уровне целых объектов. Тогда как сегментация классифицирует каждый отдельный пиксель изображения, приписывая его к соответствующему типу объекта или региона, таким образом работая на уровне отдельных пикселей [5].

Методы компьютерного зрения, основанные на алгоритме глубокого обучения YOLO, представляют собой один из перспективных подходов к решению задач анализа изображений. YOLO (You Only Look Once) – это алгоритм обнаружения объектов в реальном времени, разработанный для высокой скорости и производительности. Его главная особенность заключается в том, что он обрабатывает изображение за один проход, что делает его идеальным для задач, где важна мгновенная обработка, таких как автономное вождение и видеонаблюдение [6]. Для решения задачи обнаружения облачности была выбрана архитектура модели YOLOv11 – одна из самых современных и эффективных реализаций алгоритма обнаружения объектов на основе глубокого обучения. YOLOv11 сочетает высокую точность распознавания с возможностью работы в режиме реального времени, что делает её оптимальной для задач видеонаблюдения и анализа изображений. Причины выбора этой модели заключается в улучшенном извлечении признаков, оптимизации с целью повышения эффективности и скорости, большой точности при меньшем количестве параметров, адаптивности к различным средам и широком спектре поддерживаемых задач [7].

Обучение модели YOLO включает в себя следующие основные этапы: подготовка размеченного набора данных, настройка параметров обучения и запуск процесса обучения. Для обучения пользовательской модели YOLO необходимо создать аннотированный набор данных и настроить параметры в конфигурационном файле, затем запустить обучение.

Датасет формировался из панорамных AllSky-изображений, снятых в дневное время (рис. 1). Изображения включают в себя сцены с различными типами облаков, такими как перистые, слоистые, кучевые и др. Каждое изображение облаков было размечено вручную и содержит подробные аннотации, включая координаты ограничивающих прямоугольников (bounding boxes) для метода детекции и многоугольников (polygons) для метода сегментации. Аннотации были сделаны при помощи инструмента разметки данных в задачах компьютерного зрения CVAT (Computer Vision Annotation Tool) [8]. Размеченные данные охватывают различные условия съёмки, включая разные времена суток, погодные условия, что обеспечивает разнообразие исходных данных и позволяет модели обучаться в различных условиях. Общее количество изображений в датасете для каждого метода составляет 1211, из которых на обучающую и проверочную выборки ушло 814 и 195 изображений, а на тестовую – 202.

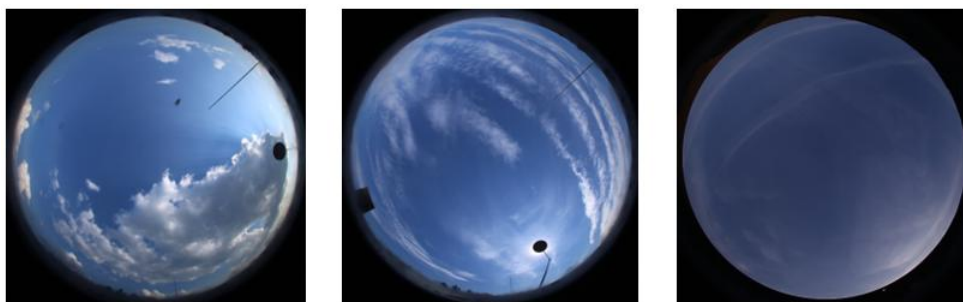


рис. 1 Панорамные изображения верхней полусферы неба, получаемые с помощью панорамно-оптической станции «TomSky»

Настройка параметров включала следующие шаги: создание конфигурационного файла, содержащего пути к датасету, описание и количество классов для методов детекции и сегментации; выбор базовой модели YOLOv11n настройка параметров для обучения нейронной сети (размера входного изображения: $\text{imgsz} = 640$, размер батча: $\text{batch} = 8$ и количество эпох: $\text{epochs} = 100$). После разметки датасета и выбора параметров сети начинается процесс обучения. На рисунке 2 представлены графики зависимости точности от уверенности после обучения нейросети для методов детекции и сегментации.

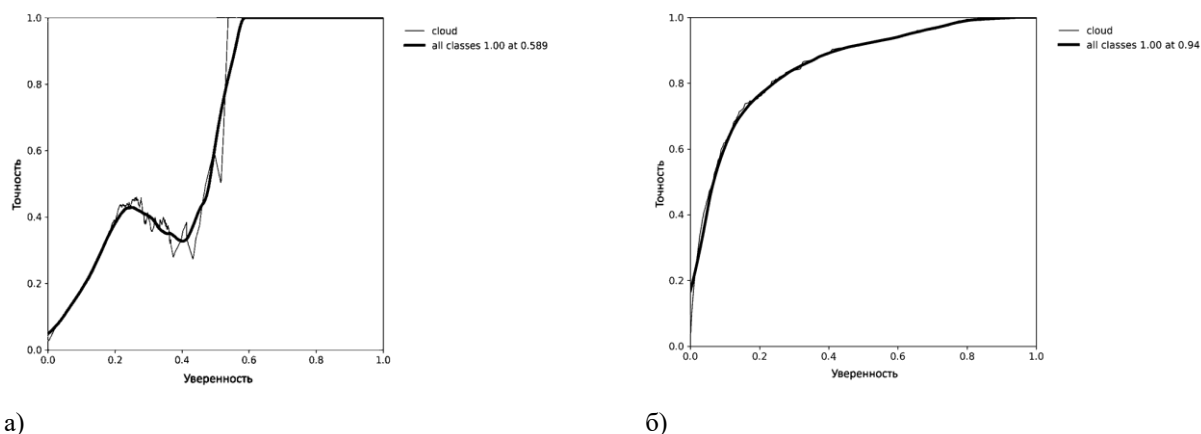


рис. 2 Графики зависимости точности от уверенности после обучения нейросети для методов детекции а) и сегментации б)

В следующей таблице представлены результаты обучения на основе метрик на проверочной выборке для методов детекции и сегментации:

Модель	Точность	Полнота	mAP50	mAP50-95
yolov11n	0,278	0,49	0,255	0,094
yolov11n-seg	0,965	0,91	0,945	0,815

Представленные в таблице метрики дают представления о производительности модели в обнаружении объектов: точность показывает долю правильно распознанных объектов среди всех обнаружений, полнота отражает способность модели находить все имеющиеся объекты на изображении, средняя точность (mAP50) оценивает среднюю точность при низком пороге совпадения областей (IoU=0,50), фокусируясь на простейших случаях, тогда как mAP50-95 демонстрирует полную картину эффективности модели на различных уровнях сложности путем расчета среднего значения точности при пороге IoU от 0,50 до 0,95 [9]. Модель yolov11n-seg значительно превосходит базовую модель yolov11n по всем метрикам качества. Высокая точность (0,965) говорит о том, что почти все предсказанные объекты являются правильными. Высокая полнота (0,91) указывает на то, что модель практически не пропускает объекты. Значительное улучшение в mAP50 (0,945) и mAP50-95 (0,815) демонстрирует, что модель хорошо работает как при менее строгих, так и при более строгих условиях IoU. Результаты, полученные в ходе тестирования обученной нейронной сети для методов детекции и сегментации, представлены на рисунке 3.

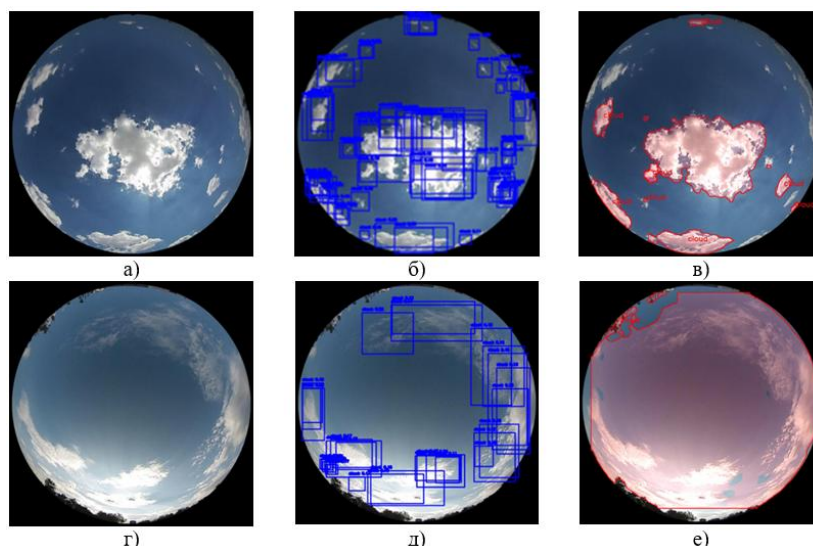


рис. 3 Результаты работы обнаружения облачности с помощью обученной сети YOLOv11, где а), г) исходное изображение, б), д) метод детекции, в), е) метод сегментации

По результатам обучения и тестирования нейронной сети выяснилось, что метод сегментации справляется с задачей обнаружения облаков значительно успешнее, нежели метод детекции. Причинами этому служат следующие факторы.

- 1) Датасет содержал недостаточное количество примеров различных типов облаков и малое число изображений чистого неба.
- 2) Разметка облаков оказалась недостаточно качественной как для задачи детекции, так и для сегментации.
- 3) Основная трудность детекции состоит в неспособности точно определить границы отдельного облака как целостного объекта. Вместо этого алгоритм выделяет лишь области, содержащие облака, зачастую приводя к дублированию результатов, когда одна и та же зона помечается дважды.

В результате проведённого исследования были протестированы нейронные сети для задач детекции и сегментации облачности на AllSky-изображениях. При применении метода сегментации на основе нейросетей достигнута точность около 97%, в то время как для детекции она составила примерно 28%. Сравнение показало, что классические алгоритмы сегментации, основанные на анализе цвета, на том же датасете обеспечили точность в 92% [3]. Несмотря на небольшое превосходство нейронных сетей в точности сегментации, их преимущество заключается в способности лучше адаптироваться к изменениям условий освещения благодаря обучению на разнообразных данных. Однако наиболее эффективным решением может быть гибридный подход: начальная сегментация данных по цвету с последующей коррекцией выделенных областей с помощью нейросетей. Такой подход позволяет существенно ускорить процесс разметки обучающих выборок по сравнению с ручной разметкой.

Список публикаций:

- [1] Компьютерное зрение в 2024 году: Главные задачи и направления. [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/810207/> (дата обращения: 04.04.2025).
- [2] Зуев С.В. Моностатический оптико-электронный измеритель высоты нижней границы облачности: дис. канд. техн. наук: 05.11.07. Томск, 2014. 120 с.
- [3] Криницкий М.А. Аппаратный комплекс и алгоритмы, основанные на методах обучения, для измерения характеристик облачности над океаном: дис. канд. техн. наук.: 25.00.28. Москва., 2018. 186 с.
- [4] Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В., Матвиенко Г.Г., Морозов А.М. Программно-техническая система мониторинга и контроля оптико-физического состояния атмосферы. Часть 1. Панорамно-оптическая станция // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник докладов XXVII Международного симпозиума. [Электронный ресурс]. ISBN 978-5-94458-187-7. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2021. С. F5 – F9.
- [5] Как устроено компьютерное зрение. [Электронный ресурс] URL: <https://practicum.yandex.ru/blog/chto-takoe-kompyuternoe-zrenie/> (дата обращения: 21.03.2025).
- [6] История YOLO – самой известной архитектуры компьютерного зрения. [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/articles/865834/> (дата обращения: 31.03.2025).
- [7] Ultralytics YOLO11. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.ultralytics.com/ru/models/yolo11/> (дата обращения: 27.02.2025).
- [8] CVAT. Инструкция по разметке. [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/articles/677484/> (дата обращения: 27.02.2025).
- [9] Глубокое погружение в метрики производительности. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.ultralytics.com/ru/guides/yolo-performance-metrics/> (дата обращения: 21.06.2025).

Прогнозирование вероятности формирования облаков верхнего яруса методами машинного обучения

Романов Денис Александрович, Пензин Максим Сергеевич, Кучинская Олеся Ивановна,
Пустовалов Константин Николаевич, Акимов Иван Максимович, Брюханов Илья Дмитриевич
Национальный исследовательский Томский государственный университет
E-mail: denrom@internet.ru, penzin.maksim@gmail.com, OlesyaTSU14@mail.ru, const.pv@yandex.ru, ima8908@mail.ru, plyton2121@mail.ru

Облака верхнего яруса (ОВЯ) оказывают значительное влияние на составляющие радиационного баланса Земли и, следовательно, могут влиять на климат, что подчёркивает важность их детектирования, определения типов и характеристик. Работа направлена на исследование применимости методов машинного обучения в задачах лазерного зондирования атмосферы и анализа атмосферных процессов.

Целью работы является разработка алгоритма машинного обучения, способного оценивать вероятность наличия ОВЯ по данным метеорологических величин на разных высотах. Программное обеспечение реализовано на языке Python и включает в себя разработку и анализ модели машинного обучения, предназначенную для прогнозирования вероятности появления ОВЯ на основе высотных профилей метеорологических величин. Для построения и обучения модели использовались данные атмосферного реанализа ERA5 [1] и стандартных метеорологических наблюдений (ВНИИГМИ-МЦД) [2]. Из общего массива данных были выделены параметры, наиболее значимые с точки зрения физики атмосферы: температура воздуха, абсолютная и относительная влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра. Анализ ограничивался высотным диапазоном от 6000 до 12000 метров, что соответствует типичному диапазону высот формирования ОВЯ. На этапе подготовки данных применялись методы агрегирования по высоте и визуализации взаимосвязей между признаками и целевой переменной, включая диаграммы рассеяния, графики распределений и методы снижения размерности. В качестве алгоритма классификации была выбрана модель градиентного бустинга CatBoost, продемонстрировавшая высокую устойчивость к шуму, отсутствие требований к масштабированию данных и способность к эффективному обучению на относительно небольших выборках [3]. Эти результаты подтверждают, что модель уверенно различает наличие или отсутствие ОВЯ и может быть использована для прогнозирования вероятности формирования ОВЯ в режиме реального времени.

Направление дальнейших исследований включают развитие инструментов для прогнозирования формирования и характеристик ОВЯ, а также интеграцию дополнительных источников данных в рамках оценки облачного покрова и его эволюции. В частности, начата разработка алгоритма автоматизации подбора наиболее эффективного набора параметров для предсказания вероятности наблюдения ОВЯ по данным метеорологических величин. Разрабатывается и обучается модель для краткосрочного прогнозирования на основе анализа временных рядов метеорологических данных, полученных из реанализов ERA5 и MERRA [4]. В качестве архитектуры будет использована модель Time Fusion Transformers, обеспечивающая эффективное моделирование временной динамики и межзависимостей в данных [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта правительства Российской Федерации № 075-15-2025-009 от 28.02.2025.

Список публикаций

- [1] ECMWF Confluence Wiki. ERA5: Data Documentation. Available online: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation#ERA5:datadocumentation-Introduction> (дата обращения 20.02.2025).
- [2] Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н. и др. (2014). Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о гос. регистрации № 2014620549 от 10 апреля 2014 г.
- [3] Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 31, 6638–6648.
- [4] NASA, GMAO. (n.d.). MERRA-2 Data Access. Доступно по адресу: <https://goldsmr5.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opensap/hyrax/MERRA2/> (дата обращения: 10.06.2025).
- [5] Zhang, Y., et al. (2021). Time Fusion Transformer: A Deep Learning Model for Multivariate Time Series Forecasting. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 35(12), 10594–10602.

Кристаллы GaSe для генерации ИК- и терагерцового излучений: получение нелинейно-оптических элементов большой апертуры, защитных и антиотражающих покрытий

Саркисов Сергей Юрьевич

Березная Светлана Александровна, Редькин Руслан Александрович

Томский государственный университет

E-mail: sarkisov@mail.tsu.ru

Получение источников высокоинтенсивных ИК- и терагерцовых импульсов фемто- и пикосекундной длительности создает важный инструмент для исследований фундаментальных аспектов взаимодействия сред с электромагнитным излучением. Кристаллы GaSe являются наиболее эффективным материалом для генерации высокоинтенсивных (пиковые напряженности полей до 100 МВ/см и выше) ИК- и терагерцовых импульсов [1]. Для получения еще более высоких пиковых напряженностей электрических полей импульсов когерентного излучения требуются нелинейно-оптические элементы с большой рабочей апертурой, что делает актуальным развитие технологии получения кристаллов GaSe диаметром более 5 см.

Стандартно выращиваемые методом Бриджмена слитки селенида галлия имеют диаметр 20–25 мм. При увеличении диаметра ростовой ампулы с целью получения более крупных кристаллов может возникнуть двойникование из-за появления большего числа центров кристаллизации вследствие большого переохлаждения расплава. В случае слишком высоких скоростей протяжки ампулы массивный слиток не успевает остывать при опускании в более низкотемпературную область печи. Тепло от растущего слитка отводится через канал печи. При этом возникает застывание расплава без образования кристалла. Отсюда появляется требование уменьшения скорости протяжки ампулы.

Для получения методом Бриджмена крупных слитков GaSe, диаметром 40 мм и более, требуется печь с большим диаметром канала, при этом в печи большого диаметра сложнее реализовать необходимый высокий градиент температуры. В результате проведенных экспериментов установлено, что кристаллы GaSe диаметром менее 30 мм возможно получать при градиентах температуры в печи в области кристаллизации порядка 10 °С/см, а кристаллы диаметрами более 30 мм – 5 °С/см (рис.1). Также для роста крупных слитков GaSe необходимо применять небольшие скорости протяжки ампулы. Тогда как кристаллы GaSe диаметром менее 30 мм выращивались при скоростях до 2,6 мм/час, крупные кристаллы, диаметрами 55 мм (рис.1) и более, выращивались при скорости 0,5–0,8 мм/час.

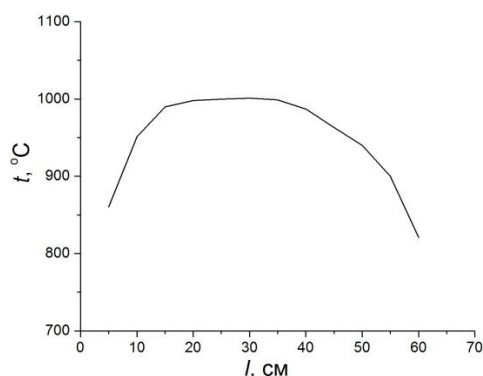


рис.1 Температурный профиль в печи и фотография полученного монокристаллического слитка GaSe диаметром 55 мм

Нелинейно-оптическое преобразование частоты лазерного излучения в кристаллах селенида галлия продолжает являться востребованным инструментом для генерации узко- и широкополосного ИК- и терагерцового излучений в современных экспериментальных оптических схемах. Часто экспериментальные схемы требуют как широкого спектра лазерного излучения на входе, так и использования непреобразованного излучения на выходе кристалла. Функциональность нелинейно-оптических элементов ограничивается низкой механической твердостью и слоистостью селенида галлия, склонностью к формированию пленки собственного окисла на поверхности, а также высоким коэффициентом отражения для излучения ближнего ИК-диапазона. При этом для кристаллов GaSe отсутствуют коммерчески доступные антиотражающие покрытия (АОП). Это, главным образом, связано с низкой адгезией большинства плёнообразующих материалов к поверхности селенида галлия. В настоящей работе установлено, что в качестве однослойного АОП для GaSe могут применяться пленки SiO₂. При нанесении пленок SiO₂ на поверхности пластины из селенида галлия достигается снижение потерь вводимого излучения на отражение и повышение функциональности и долговечности оптического элемента из GaSe за счет защиты поверхности от воздействия атмосферы. Для получения образцов с АОП перед помещением пластины GaSe в держатель методом магнетронного распыления с использованием мишени из кремния и потока аргона и кислорода в камере наносилась пленка SiO₂.

Расчет оптических свойств АОП и оптимизация толщины пленок выполнялись следующим образом. Коэффициент пропускания пластин GaSe с однослойным АОП рассчитывался по формуле (1)

$$T_{IC}(\lambda) = \left[1 - \left(\frac{n_{GaSe}(\lambda) - 1}{n_{GaSe}(\lambda) + 1} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\operatorname{Re}(R_{IC}(\lambda)) \right)^2 + \left(\operatorname{Im}(R_{IC}(\lambda)) \right)^2 \right] \exp(-\alpha_{GaSe} d_{GaSe}), \quad (1)$$

где α_{GaSe} – коэффициент поглощения GaSe (был принят равным $0,1 \text{ см}^{-1}$), d_{GaSe} – толщина пластины GaSe, $n_{GaSe}(\lambda)$ – дисперсионное уравнение для обыкновенного показателя преломления GaSe (взято из [2]). Комплексный амплитудный коэффициент отражения рассчитывался как

$$R_{IC}(\lambda) = \frac{r_1 + r_2(\lambda) \exp(-2 \cdot i \cdot \varphi(\lambda))}{1 + r_1 r_2(\lambda) \exp(-2 \cdot i \cdot \varphi(\lambda))}, \quad (2)$$

где $\varphi(\lambda) = 2\pi \cdot n_{SiO_2} d_{SiO_2} / \lambda$, $r_1 = (1 - n_{SiO_2}) / (1 + n_{SiO_2})$, $r_2(\lambda) = (n_{SiO_2} - n_{GaSe}(\lambda)) / (n_{SiO_2} + n_{GaSe}(\lambda))$. Для двустороннего однослойного АОП коэффициент пропускания рассчитывали по формуле (3)

$$T_{IC_DC}(\lambda) = \left[1 - \left(\operatorname{Re}(R_{IC}(\lambda)) \right)^2 + \left(\operatorname{Im}(R_{IC}(\lambda)) \right)^2 \right]^2 \exp(-\alpha_{GaSe} d_{GaSe}). \quad (3)$$

Комплексные амплитудные коэффициенты отражения кристаллов GaSe с АОП в случае наклонного падения также рассчитывались по формуле (2), но принимая, что $\varphi = 2\pi \cdot n_{SiO_2} d_{SiO_2} \cos(\alpha_1) / \lambda$ и комплексные амплитудные коэффициенты отражения для s - и p -поляризованных волн на границах раздела воздух/SiO₂ (1) и SiO₂/GaSe (2) также зависят от угла падения:

$$\begin{aligned} r_{1s} &= (\cos(\alpha_0) - n_{SiO_2} \cos(\alpha_1)) / (\cos(\alpha_0) + n_{SiO_2} \cos(\alpha_1)), \\ r_{2s} &= (n_{SiO_2} \cos(\alpha_1) - n_{GaSe} \cos(\alpha_2)) / (n_{SiO_2} \cos(\alpha_1) + n_{GaSe} \cos(\alpha_2)), \\ r_{1p} &= (n_{SiO_2} \cos(\alpha_0) - \cos(\alpha_1)) / (n_{SiO_2} \cos(\alpha_0) + \cos(\alpha_1)), \\ r_{2p} &= (n_{GaSe} \cos(\alpha_1) - n_{SiO_2} \cos(\alpha_2)) / (n_{GaSe} \cos(\alpha_1) + n_{SiO_2} \cos(\alpha_2)). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь α_0 , α_1 и α_2 – угол падения и углы преломления для границ раздела воздух/SiO₂ и SiO₂/GaSe соответственно. В описанном ниже примере толщина пленки SiO₂ оптимизировались для наклонного падения (в соответствии с углами синхронизма). Требовалось улучшить эффективность образца GaSe для генерации разностной частоты между сигнальной и холостой волнами титан-сапфирового ОПУ: минимизировать потери на отражение сигнальной и холостой волн на входе и излучения на разностной частоте на выходе. Длины волн импульсов на входе перестраивались в пределах от 1300 до 2100 нм. Длина волны ИК-импульса на выходе изменялась примерно в диапазоне от 3 до 7 мкм. Для ее генерации предполагалось использовать взаимодействия типа II, $eo-o$ или $eo-e$, при этом внутренние углы фазового синхронизма составляют 15–17°, а внешние – 45–50°. Соответственно в условиях эксперимента поверхность кристалла GaSe также ориентируется под углом 45–50° относительно волнового вектора падающего излучения, что дает большие потери на отражение, особенно для импульсов с поляризацией обыкновенной волны (порядка 40 %; для необыкновенной волны на входе – 10 %).

Для получения эффекта просветления в диапазоне длин волн 1300–2100 нм на входе, причем как для поляризации в плоскости падения (необыкновенная волна в случае пластин GaSe с ориентацией (001)), так и перпендикулярной к ней (обыкновенная волна), была выбрана пленка SiO₂ толщиной 320 нм. При подборе учитывались небольшое число пленок, доступных для напыления на кристалл GaSe, необходимость выбрать компромиссный вариант для толщины пленки, требуемой для минимума отражения обыкновенной и необыкновенной волн, угол падения излучения 45–50°. На выходную грань напылялась пленка SiO₂ толщиной 860 нм для обеспечения минимума отражения для излучения на длинах волн в диапазоне 3–7 мкм с поляризацией, перпендикулярной плоскости падения.

Измеренные спектры пропускания (для волн с s - (обыкновенная волна) и p - (необыкновенная волна)) поляризациями для образца GaSe толщиной 275 мкм с нанесенными пленками SiO₂ толщиной 320 и 860 нм на входную и выходную грань соответственно показаны на рис. 2. Как видно из рис. 2, в целом пленка, рассчитанная на более короткие волны ($\lambda = 1300\text{--}2100$ нм), дает более эффективное просветление, чем рассчитанная на просветление в области длин волн 3000–7000 нм. Из результатов расчета спектров отражения видно, что эффект просветления вполне значимый для экспериментов по преобразованию частоты лазерного излучения, хотя и не максимальный (которого можно было бы достичь при отсутствии ограничений на выбор пленок). В первую очередь толщина пленок оптимизировалась для снижения отражения o -волн, так как для e -волн рабочие углы синхронизма были близки по величине к углу Брюстера и уровень отражения для них был меньше, чем при нормальном падении. В итоге, согласно расчету, для o -волн было получено отражение от входной грани менее 10 % для излучения на длине волны 2,1 мкм и менее 5 % в диапазоне длин волн 1300–1900 нм. На выходной грани отражение составляло менее 5 % в диапазоне длин волн от 3500 до 4500 нм и менее 15 % в диапазоне длин волн от 3000 до 5500 нм. Недостатком выбранного АОП является рост отражения до 30 % на длине волны 7000 нм. Для e -волн отражение было менее 5 % на входной грани и менее 10 % на выходной во всем рабочем диапазоне длин волн.

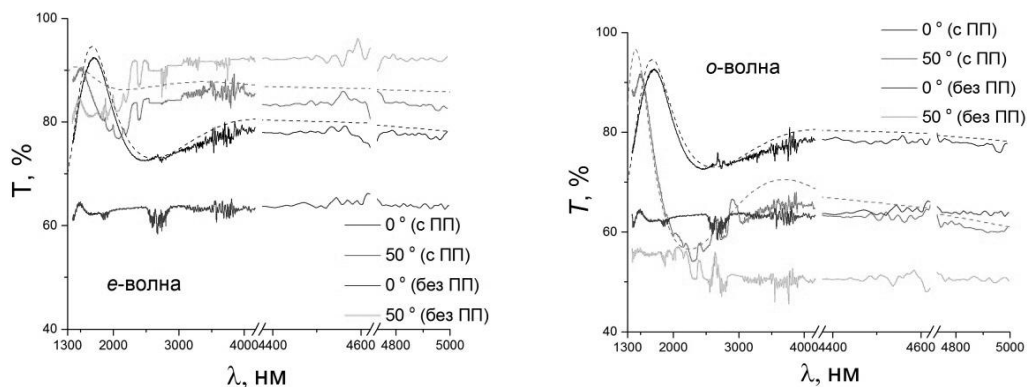


рис. 2 Расчётные (пунктирные линии) и экспериментально измеренные (сплошные линии) спектры пропускания кристалла GaSe толщиной 300 мкм с нанесенными пленками SiO₂ толщами 320 и 860 нм на входной и выходной гранях соответственно для различных углов падения. Разрывы на осях исключают спектральные области поглощения материала поляризатора (кальцит)

Таким образом, экспериментально найденные температурно-временные условия позволили получить крупные слитки GaSe, диаметром 55 мм. Удалось получить пластины с чистой апертурой 50 мм, которые были использованы в экспериментах по генерации высокоинтенсивных фемтосекундных импульсов [3].

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0014.

Список публикаций:

- [1] Sell A., Leitenstorfer A., Huber R. Opt. Lett. 2008. V. 33. № 23. P. 2767–2769.
- [2] Chen C.-W., Tang T.-T., Lin S.-H., Huang J.Y., Chang C.-S., Chung P.-K., Yen S.-T., Pan C.-L. JOSA B. 2009. V. 26. № 9. P. A58–A65.
- [3] Schoenfeld C., Heinrich A.-C., Feuerer L., Bossini D., Sarkisov S., Leitenstorfer A. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2022), 15–20 May 2022, San Jose, USA. P. STh4O.4.

Связь структурной неоднородности с оптическими свойствами в кристаллах дифосфида цинка-германия

Слюнько Елена Сергеевна
Юдин Николай Николаевич
Кальсин Андрей Юрьевич
Подзывалов Сергей Николаевич
Лысенко Алексей Борисович
Власов Денис Васильевич
Томский государственный университет
E-mail: elenohka266@mail.ru

Проанализировано влияние собственных примесей на образование полосчатой неоднородности в монокристаллах ZGP. Установлена связь пристеночного порообразования с наличием полос роста в ZGP. Показано, что образцы, содержащие включения полосчатой неоднородности значительно искажают профиль проходящего и генерируемого в кристалле излучения и приводят к ярко выраженному астигматизму.

Ключевые слова: ZGP; полосы роста; порог лазерно-индуцированного повреждения

Кристаллы дифосфида цинка-германия (ZnGeP_2 , ZGP) представляют значительный интерес для нелинейной оптики благодаря своим нелинейным свойствам, позволяющим эффективно преобразовывать излучение твердотельных лазеров (~ 2 мкм) в когерентное излучение среднего ИК-диапазона (3–8 мкм). Однако широкому применению ZnGeP_2 в оптических устройствах препятствует наличие структурных дефектов, в частности полос роста, которые возникают из-за сложных термодинамических процессов при синтезе и кристаллизации материала. Эти дефекты, обусловленные испарением летучих компонентов (Zn, P), образованием бинарных фосфидов и нестабильностью фронта кристаллизации, приводят к ухудшению оптических характеристик и снижению лазерно-индуцированного порога повреждения. В данной работе исследуются механизмы формирования полос роста в кристаллах ZnGeP_2 , выращенных методом Бриджмена, а также анализируются пути минимизации дефектов за счет оптимизации температурных режимов и управления конвективными потоками в расплаве. Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологий выращивания высококачественных кристаллов ZnGeP_2 с улучшенными нелинейно-оптическими свойствами.

Для исследования полосчатых неоднородностей были отобраны четыре монокристалла ZnGeP_2 (рис. 1) выращенных вертикальным методом Бриджмена. Из кристаллов изготовили полированные пластины, срезы вдоль оси роста, которые показали четкую корреляцию между наличием полос роста и образованием пристеночных поровых дефектов. Анализ теневых картин пластин продемонстрировал, что полосы роста, состоящие из чередующихся светлых и темных областей, связаны с локальным перераспределением примесей и выделением тепла при кристаллизации, что приводит к образованию паровых пузырьков и последующему формированию поровых каналов в пристеночной области. При этом монокристаллы без полос роста не проявляли признаков порообразования, что подтверждает взаимосвязь между этими дефектами. Результаты указывают на важность контроля температурных градиентов и состава расплава для минимизации структурных неоднородностей в кристаллах ZnGeP_2 .

Анализ состава светлых и темных участков кристаллов проводили методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (Shimadzu XRF 1800), что позволило выявить различия в распределении матричных элементов. Фазовый состав и кристаллическую структуру исследовали на дифрактометре Rigaku MiniFlex 600 с последующей обработкой данных в программе POWDER CELL 2.4. Порог лазерно-индуцированного повреждения (LIDT) определяли по методике R-on-1 с использованием Ho:YAG-лазера (2.097 мкм, 35 нс, 20 кГц), фиксируя плотность энергии при появлении поверхностных повреждений. Статистическую обработку результатов проводили согласно стандарту ISO11146.

Монокристаллы ZnGeP_2 с полосами роста демонстрируют выраженное искажение лазерного пучка ($\lambda=2.1$ мкм) в дальней зоне, обусловленное неоднородностью коэффициента преломления между светлыми и темными областями. Особенно заметен астигматизм при параметрической генерации света, где дефектная структура кристалла существенно изменяет пространственное распределение интенсивности генерируемого излучения (рис. 1).

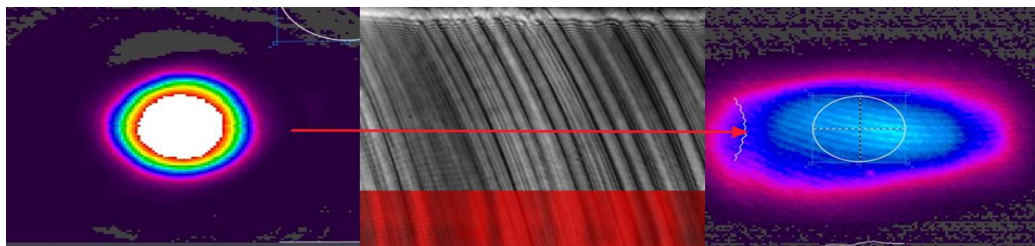


Рис. 1 Искажение формы пучка при прохождении сквозь кристалл ZnGeP_2 содержащий полосы роста.

Проведенные исследования выявили ключевые особенности монокристаллов ZnGeP_2 с полосчатой неоднородностью:

Рентгенофлуоресцентный анализ показал повышенное содержание фосфора (на 1-3.5%) в темных полосах по сравнению со светлыми участками. Образец №1 продемонстрировал также увеличенное содержание германия (на $\sim 4\%$) в светлых областях, что может улучшать оптическую прозрачность. Рентгеноструктурный анализ

выявил разориентацию кристаллической решетки (100) между темными и светлыми областями на 0.05° , что объясняется накоплением дефектов в примесных слоях. Установлена корреляция между полосами роста и пристеночным порообразованием. Поры формируются преимущественно в светлых областях в результате термической диссоциации примесей и конвекционных процессов в расплаве. Несмотря на значительное искажение лазерного пучка, разница в порогах лазерного повреждения (LIDT) между дефектными и недефектными областями оказалась незначительной 1.15 vs 1.18 Дж/см² (рис. 2).

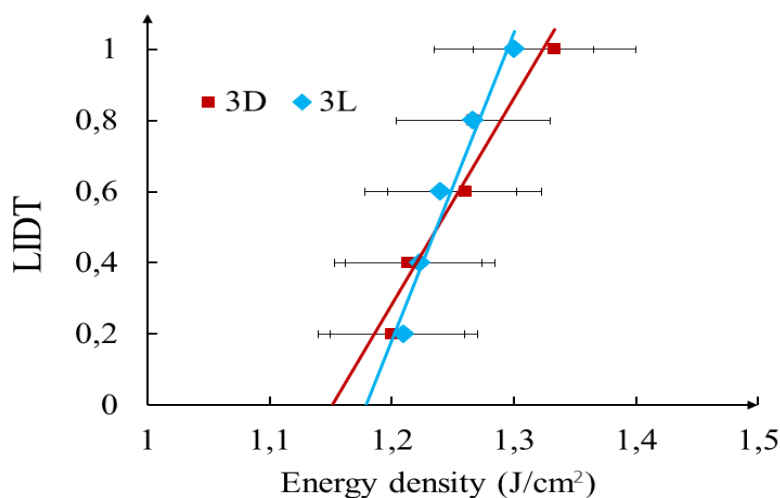


Рис. 2 Зависимость вероятности оптического пробоя от плотности энергии падающего лазерного излучения с длиной волны 2.1 мкм. В темных и светлых участках монокристаллической пластины.

Механизм образования дефектов включает: накопление примесей (преимущественно фосфидов) перед фронтом кристаллизации, локальный перегрев пристеночных областей (+1.5-2°C), диссоциацию примесей с образованием газовых пузырьков, захват пузырьков растущим кристаллом с формированием поровых каналов

Полученные результаты имеют принципиальное значение для отработки технологии роста монокристаллов ZGP с улучшенными оптическими характеристиками.

Характеристики облаков верхнего яруса по данным поляризационного лидара, аэрологического зондирования и реанализа

Манохин Денис*, Самохвалов И.В., Брюханов И.Д.** , Ни Е.В., Животенюк И.В., Дорошкевич А.А.,
Стыкон А.П., Локтюшин О.Ю.

Томский государственный университет

*E-mail: *den.manokhn.03@mail.ru; **plyton@mail.tsu.ru*

Облака верхнего яруса (ОВЯ), включая перистые, перисто-слоистые и перисто-кучевые, формируются в верхней тропосфере и тропопаузе и оказывают значительное влияние на радиационный баланс Земли. Их роль определяется отражением солнечной радиации и усилением парникового эффекта [1]. Контактные методы, основанные на заборе проб, не позволяют точно определить пространственную ориентацию ледяных кристаллов – ключевой параметр, влияющий на распространение излучения в атмосфере. Также, для корректной интерпретации лидарных данных необходимо анализировать метеорологические параметры на высотах формирования ОВЯ. Целью данной работы является комплексное исследование характеристик ОВЯ с использованием поляризационного лидарного зондирования и метеорологических данных.

Исследования проводились на высотном матричном поляризационном лидаре НИ ТГУ, выполняющем зондирование на длине волны 532 нм с вертикальным разрешением 37,5–150 м [2]. Установка позволяет определять все 16 элементов матрицы обратного рассеяния света (МОРС) ОВЯ, что позволяет выявлять ориентацию ледяных кристаллов в них. С 2009 года накоплено свыше 3 тысяч серий измерений общей продолжительностью более 800 часов. Для интерпретации объединены оптические характеристики ОВЯ (МОРС, оптическую толщину τ , отношение рассеяния R), их геометрические характеристики (высоты нижней и верхней границ, вертикальная мощность), а также вертикальные профили метеорологических величин по данным аэрологического зондирования и реанализов ERA5 и MERRA-2 [3]. Зеркальные ОВЯ идентифицировались по критериям: $R \geq 10$, $\tau \leq 1$, элемент МОРС $m_{44} \leq -0.4$ [4]. Корреляционный анализ выполнялся с расчетом коэффициентов линейной корреляции между характеристиками зарегистрированных лидаром ОВЯ и атмосферы.

Установлена статистически значимая корреляция высот границ ОВЯ с температурой атмосферного воздуха. Для зеркальных ОВЯ (содержащих горизонтально ориентированные кристаллы льда) коэффициенты корреляции температуры с высотой нижней и верхней границы составили 0,50 и 0,66 соответственно. Для всех типов ОВЯ коэффициент линейной корреляции температуры с высотой нижней границы составил 0,74. Оптические характеристики (τ , R) не показали значимой связи с метеопараметрами. Образование зеркальных ОВЯ происходит при температуре $-70...-10^{\circ}\text{C}$, абсолютной влажности 0,01–5,13 мг/кг и относительной влажности 67–100%. Критическим условием является перенасыщение относительно льда, способствующее росту горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов.

Выявлена устойчивая связь геометрических характеристик ОВЯ с температурой атмосферы, соответствующая термодинамическим закономерностям. Отсутствие корреляции оптических свойств таких облаков с влажностью указывает на доминирующую роль микрофизической структуры кристаллов. Полученные результаты могут быть использованы для верификации климатических моделей и оценки радиационного воздействия ОВЯ. Перспективы работы включают расширение массива данных и применение алгоритмов машинного обучения для выявления связей между характеристиками ОВЯ и параметрами атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант № 24-77-00097.

Список использованной литературы

1. Liou, K.N. Influence of Cirrus Clouds on Weather and Climate Processes: A Global Perspective. Mon. Weather. Rev. 1986, 114, 1167–1199.
2. Самохвалов И.В. и др. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков. Оптика атмосферы и океана, 2012, Т.25, №5, С.403–411.
3. Насонов С.В. Оптические характеристики облаков верхнего яруса. Дис. канд. физ.-мат. наук, Томск, 2015.
4. Брюханов И.Д. Оптические свойства облаков верхнего яруса. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук, Томск, 2022.
5. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, Vol.146, P.1999–2049.

Автоматическая оценка параметров астроклимата по панорамным изображениям ночного неба

Шалеев Артем Викторович
Елизаров Алексей Игоревич

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

E-mail: sav@iao.ru

Одной из актуальных задач современной астрономии является обеспечение эффективного планирования наблюдений, что напрямую зависит от точного определения условий видимости в конкретный момент времени. Решение этой задачи требует оперативного мониторинга астроклимата [1], поскольку прозрачность атмосферы и степень облачности непосредственно влияют на возможность проведения высококачественных астрофизических наблюдений. В этом контексте оценка облачного покрова ночного неба приобретает особое значение, поскольку она определяет режим функционирования телескопов и распределение доступного времени наблюдений между различными исследовательскими программами.

Для автоматизации и повышения точности контроля состояния неба всё шире применяются системы на основе камер всего неба (allsky camera) [1] и специализированных астронаблюдательных инструментов [3]. Эти устройства позволяют осуществлять непрерывное наблюдение за состоянием атмосферы, обеспечивая сбор данных, необходимых для анализа прозрачности неба и формирования прогноза фотометрического времени – временного интервала, в течение которого условия атмосферы соответствуют требованиям, предъявляемым к проведению точных астронаблюдений. Камеры всего неба представляют собой особенно ценное средство диагностики облачности благодаря своей способности предоставлять общий визуальный обзор небосвода в реальном времени.

Особую сложность представляет количественная оценка облачности в условиях слабой освещённости ночного неба, когда облака становятся практически невидимыми. Для преодоления этого ограничения предлагается использовать звёзды как естественные источники света. При ясном небе звёздный свет достигает поверхности Земли без существенных искажений. Однако наличие облаков приводит к рассеянию, поглощению или полному блокированию света, что снижает количество наблюдаемых звёзд и изменяет их яркостные характеристики. Таким образом, анализ плотности и яркости видимых звёзд становится эффективным индикатором степени облачности.

Реализация данного подхода основывается на цифровой обработке изображений ночного неба, полученных с помощью камер с высокой чувствительностью. Исходное изображение разбивается на систему концентрических подсекторов, в каждом из которых проводится выявление локальных яркостных максимумов, соответствующих положению звёзд. Для этого используются алгоритмы поиска локальных экстремумов, позволяющие обнаруживать объекты без необходимости обращения к внешним звёздным каталогам [4]. Число выявленных точечных источников в каждом секторе служит интегральным показателем прозрачности участка неба: при ясных условиях число наблюдаемых звёзд максимально, тогда как при увеличении облачности оно закономерно снижается.

На основе сравнительного анализа результатов по отдельным секторам строится карта распределения облачного покрова, что позволяет не только оценить общее состояние неба, но и выявить локальные изменения облачности во времени и пространстве. Предложенный метод реализован в виде программного обеспечения и протестирован на массивах данных, собранных с различных панорамных камер всего неба. Полученные результаты демонстрируют высокую корреляцию с ручной разметкой экспертов, что подтверждает достоверность и воспроизводимость метода.

Одним из ключевых преимуществ разработанного подхода является его автономность: отсутствие зависимости от внешних звёздных каталогов позволяет сократить время обработки данных и повысить оперативность принятия решений относительно начала или прекращения наблюдений. Это делает метод особенно перспективным для применения в автоматизированных обсерваториях и сетях телескопов, где важны быстрота реакции и минимизация человеческого фактора.

Список публикаций:

- [1] Ковадло П. Г., Кочеткова О. С., Шиховцев А. Ю. Исследование крупномасштабных астроклиматических характеристик // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2010. – Т. 2. – С. 88-97.
- [2] Галилейский В.П. (ИОА), Елизаров А.И. (ИОА), Кокарев Д.В. (ИОА), Матвиенко Г.Г. (ИОА), Морозов А.М. (ИОА) Программно-техническая система мониторинга и контроля оптико-физического состояния атмосферы. Часть 1. Панорамно-оптическая станция // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник докладов XXVII Международного симпозиума. [Электронный ресурс]. ISBN 978-5-94458-187-7. - Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2021. С. F5-F9. Исследования выполнены в рамках государственного задания ИОА СО РАН, базовый проект № 121031500341-3.
- [3] Cinzano P. Night sky photometry with sky quality meter // ISTIL Int. Rep. – 2005. – Т. 9. – №. 1.
- [4] Kong H., Akakin H. C., Sarma S. E. A generalized Laplacian of Gaussian filter for blob detection and its applications // IEEE transactions on cybernetics. – 2013. – Т. 43. – №. 6. – С. 1719-1733.



КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА

АПР 2025
16-18 сентября 2025
Томск, Россия

Исследование темновых характеристик LWIR nB(SL)n-структур методом спектроскопии адмиттанса

Войцеховский Александр Васильевич,
Дзядох Станислав Михайлович,
Горн Дмитрий Игоревич,
Дворецкий Сергей Алексеевич,
Михайлов Николай Николаевич,
Сидоров Георгий Юрьевич,
Якушев Максим Витальевич
Томский государственный университет
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

В широком диапазоне температур, частот переменного тестового сигнала и напряжений смещения проведено исследование адмиттанса MI-n(SL)n – структур на основе HgCdTe, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с различными площадями поперечного сечения структур. Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса. Актуальность исследования заключается в потенциальной возможности снижения рабочих температур фотодетекторов на основе гетероэпитаксиальных структур HgCdTe, при создании на их основе униполярных барьерных приборов [1, 2], возникающий при этом потенциальный барьер для неосновных носителей заряда предполагается снизить путем использования сверхрешетки в качестве барьерного слоя [3]. При проведении анализа полученных результатов измерений адмиттанса структур в данной работе использовался хорошо зарекомендовавший себя метод эквивалентных схем. Методика обработки результатов методом эквивалентных схем подробно представлена в работе [4].

Сами исследованные образцы представляют собой униполярную барьерную структуру nB(SL)n со сверхрешеткой в барьерной области, сформированной на основе чередующихся гетероэпитаксиальных слоев $Hg_{1-x}Cd_xTe$, на поверхность которой наносится функциональный диэлектрик Al_2O_3 . В последствии на поверхности диэлектрика напылением формируются полевые индиевые электроды. Эпитаксиальные пленки выращивались в ИФП СО РАН г. Новосибирска на альтернативных подложках GaAs (ориентация 013). Для проведения согласования постоянных решетки основной пленки с подложкой на ее поверхности в начале выращивались буферные слои ZnTe и CdTe толщиной $\sim 0,3$ мкм и $\sim 5,5$ мкм, соответственно. Далее выращивался слой $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с содержанием CdTe $\sim 0,28$, после чего постепенным снижением содержания CdTe создавался внутренний варизонный слой, который плавно переходит в поглощающий слой с содержанием CdTe $\sim 0,22$. Всего было выращено две различные эпитаксиальные пленки, различающихся параметрами сверхрешетки. Распределение содержания CdTe по толщинам эпитаксиальных пленок №1 и №2 изображено на рисунке 1. Сверхрешетка пленки №1 представляет собой чередующиеся слои 15 ям с около нулевым содержанием CdTe толщинами по 12 нм и барьеров с содержанием CdTe $\sim 0,52$ толщинами по 8 нм. Сверхрешетка пленки №2, отличается от пленки №1 толщинами барьеров, которые в этом случае составляют 4 нм. В процессе выращивания различных участков производилось варьирование скорости роста эпитаксиальной пленки, перестройка режимов производилась на технологических паузах. Для отработки технологии и проверки повторяемости результатов на структурах различной геометрии проводилось создание цилиндрических MI-n(SL)n – мезаструктур различных диаметров. Диапазон изменения диаметров структур составлял от 0.5 мм до 0.02 мм.

Проведенное при комнатной температуре исследование повторяемости характеристик MI-n(SL)n – структур показало хорошую однородность характеристик изготовленных структур, и повторяемость результатов измерений от структуры к структуре. Проведенные измерения значений дифференциального сопротивления при фиксированном напряжении +4 В по последовательной схеме замещения на частоте 2 МГц показали, что разброс значений измеряемых сопротивлений для структур идентичных диаметров равных 0,2 мм не превышает $\pm 10\%$ относительно среднего значения. Однако, между характеристиками структур разных диаметров наблюдаются существенно большие различия. На рисунке 2 приведены зависимости удельной емкости МДП-структур для образцов на основе пленки №1 различного диаметра при температуре 77 К. Из рисунка видно, что удельная емкость структур имеет тенденцию к снижению при уменьшении диаметра структуры. Данный экспериментальный факт требует дальнейшего изучения.

В целом же характеристики данных структур представляют собой характеристики типичные для МДП-структур на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ без верхнего варизонного слоя с содержанием CdTe равном 0.22. Структуры обладают малым гистерезисом ВФХ полученных при прямой и обратной развертке напряжения смещения, продольное сопротивление эпитаксиальной пленки не велико. Зависимости емкости и дифференциальной проводимости от напряжения смещения измеренные на различных частотах переменного тестового сигнала при температуре 77 К для структур №1 и №2 представлены на рисунках 3 и 4, соответственно.

Концентрации основных носителей заряда для образцов № 1 и №2, определенные по наклону обратной величины квадрата ёмкости в режиме обеднения на частоте 1 МГц показали, что в диапазоне температур вплоть до 15 К области пространственного заряда (ОПЗ) для обоих образцов не достигают барьерного слоя со сверхрешеткой.

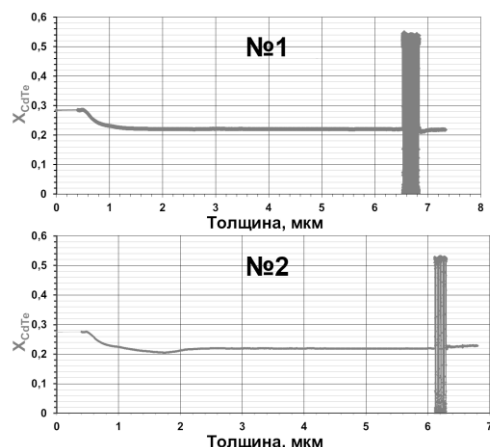


Рисунок 1 — Распределение содержания CdTe по толщине эпитаксиальной пленки для образцов №1 и №2

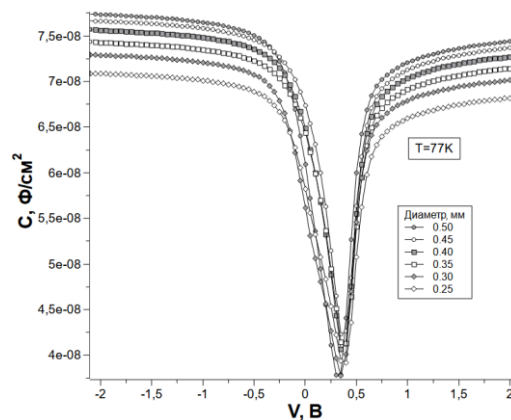


Рисунок 2 — Зависимости удельной емкости МДП - структур для образцов на основе пленки №1 различного диаметра при температуре 77 К. Прямая развертка

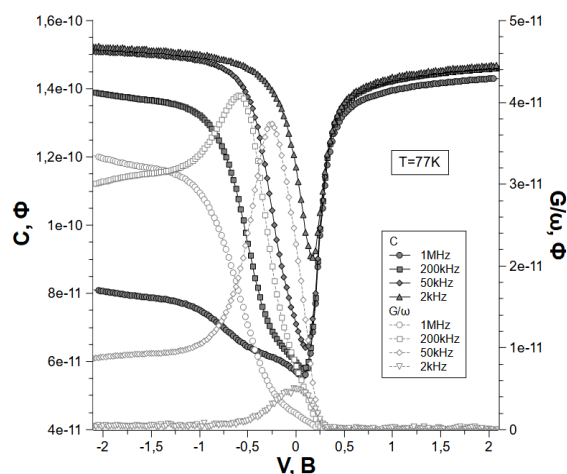


Рисунок 3 — ВФХ и зависимости от напряжения смещения нормированной на циклическую частоту дифференциальной проводимости структуры № 1, измеренная при прямой развертке напряжения при температуре 77 К. Прямая развертка

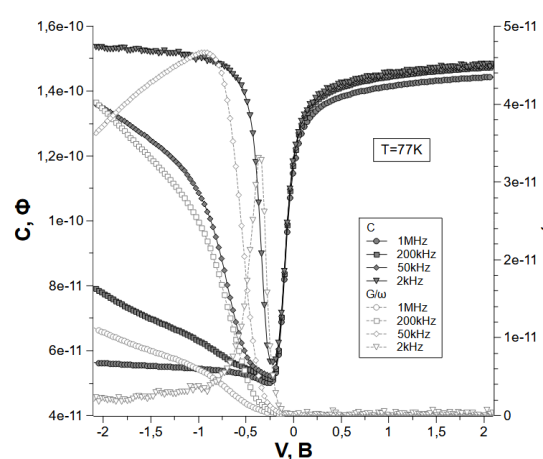


Рисунок 4 — ВФХ и зависимости от напряжения смещения нормированной на циклическую частоту дифференциальной проводимости структуры № 2, измеренная при прямой развертке напряжения при температуре 77 К. Прямая развертка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>

Список публикаций:

- [1] Войцеховский А.В., Горн Д.И. // Прикладная физика (2016) No 4, с. 83-86.
- [2] Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., et al. Ch. 6, II-VI Semiconductor-Based Unipolar Barrier Structures for Infrared Photodetector Arrays in Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors. Cham: Springer, 2023. P. 135-154.
- [3] M. Kopytko, J. Wrobel, K. Jozwikowska, et al. // Journal of Electronic Materials, 2015, Vol. 44, No. 1, 158-166
- [4] Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. // Russian Physics Journal, Vol. 48, №. 6, 2005 P. 584-591.

Адмиттансные характеристики MWIR nВn-структур со сверхрешеткой в барьерной области

Войцеховский Александр Васильевич,
Дзядх Станислав Михайлович,
Горн Дмитрий Игоревич,
Дворецкий Сергей Алексеевич,
Михайлов Николай Николаевич,
Сидоров Георгий Юрьевич,
Якушев Максим Витальевич
Томский государственный университет
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Являясь одним из наиболее перспективных материалов для создания фотонных приемников для диапазонов средней и дальней ИК-области $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, имеет ограниченное практическое применение по причине необходимости глубокого охлаждения подобных приемников. Создание на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ униполярных барьерных приборов с барьерным слоем на основе сверхрешетки, позволило бы значительно снизить требования к рабочим температурам фотодетекторов, а также снизить возникающий при этом барьер для неосновных носителей заряда [1-3], чем способствовало бы расширению области применения фотонных приемников на основе данного материала.

Для проведения исследований в ИФП СО РАН г. Новосибирск в начале методом МЛЭ были выращены эпитаксиальные пленки $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ со структурой nB(SL)n. Содержание CdTe в поглощающем слое соответствовало значению, необходимому для собственного поглощения пленки в спектральном диапазоне MWIR и составляло 0.32. Барьерный слой представляет собой сверхрешетку из чередующихся слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с малым содержанием CdTe ($X_{\text{CdTe}}=0.03$) и толщинами 1.6 нм в количестве 15 шт., и большим содержанием CdTe ($X_{\text{CdTe}}=0.5$) толщинами 3 нм в количестве 16 шт. Выращивание производилось на подложке из GaAs с ориентацией (013) толщиной 600 мкм. Согласование постоянных решеток подложки и поглощающего слоя достигалось путем выращивания на подложке буферных слоев ZnTe толщиной около 0,03 мкм и CdTe толщиной 5,6 мкм. На поверхности буферного слоя CdTe путем плавного изменения содержания CdTe наращивался варизонный слой, при этом X_{CdTe} плавно выходил на значение в поглощающем слое.

После выращивания, через специальную маску проводилось травление эпитаксиальной пленки. Травлению подвергались контактный слой и сверхрешетка, процесс останавливался при достижении глубины залегания поглощающего слоя. В результате травления на одной пластине формировались нескольких отдельно стоящих цилиндрических структур типа «меза» с различными диаметрами. За операцией травления следовало нанесение диэлектрического слоя Al_2O_3 , исполняющего функции защиты поверхности и диэлектрического слоя в будущей МДП-структуре. Последней операцией была металлизация индием площадок на поверхности диэлектрического слоя под полевые электроды и создания омического контакта по периметру пластины на месте заранее травленного покрытия Al_2O_3 .

Проведены исследования адмиттанса МДП- системы на основе nВn- структуры со сверхрешеткой в барьерной области. Определена зависимость концентрации основных носителей заряда от температуры, получены значения энергии активации. При проведении исследований зависимости адмиттанса от напряжения смещения обнаружена сильная зависимость характеристик от скорости развертки напряжения, не типичная для МДП -структур на основе КРТ ($X_{\text{CdTe}}=0.32$). Были проведены исследования релаксация емкости при импульсной подаче напряжения смещения из «0» напряжений в напряжения соответствующие на ВФХ режимам обогащения и сильной инверсии. В результате проведенных исследований выяснилось, что для данной структуры при температуре 77 К в отсутствии освещения релаксация емкости и дифференциальной проводимости при импульсной подаче смещения занимает довольно длительное время как в режиме сильной инверсии (порядка 10 с), так и в обогащении (порядка 1 с). Наличие постоянной ИК- подсветки приводит к уменьшению времени релаксации в режиме сильной инверсии до значения порядка 1 с, в режиме обогащения влияние подсветки на время релаксации емкости не обнаружено. Отсюда можно сделать вывод, что время релаксации емкости структуры зависит как от процессов происходящих внутри барьерного слоя, так и по причине наличия барьерного слоя препятствующего потоку неосновных носителей из квазинейтрального объема.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>

Список публикаций:

- [1] М. Копутко, J. Wrobel, K. Jozwikowska, et al. // Journal of Electronic Materials, 2015, Vol. 44, No. 1, 158-166
- [2] Михайлов Н.Н., Варавин В.С., Дворецкий С.А. и др. // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 76-87.
- [3] Войцеховский А.В., Дзядх С.М., Горн Д.И. и др. // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 6-22.

Экспериментальное исследование температурной зависимости концентрации изломов и размеров прямолинейных участков на ступенях поверхности Si(100)

Есин Михаил Юрьевич

Тийс Сергей Александрович, Дерябин Александр Сергеевич, Колесников Алексей Викторович,

Никифоров Александр Иванович

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

E-mail: yesinm@isp.nsc.ru

Поверхность подложки Si(100) привлекает значительный интерес в связи с тем, что она наиболее широко применяется в промышленных масштабах и является основой для большинства полупроводниковых технологий. Детальное понимание роста на поверхности этих подложек помогает адаптировать ее для роста различных материалов. Многие исследования были сосредоточены на динамике моноатомных ступеней в равновесных и неравновесных условиях молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на Si(100) [1, 2]. В неравновесных условиях МЛЭ, динамика ступеней происходит за счет встраивания в ступени и отсоединения из них одиночных адсорбированных атомов (мономеров) (рис.1) и комплексов, состоящих из двух связанных между собой атомов (димеров) (рис.2). Предполагая осаждение мономеров на поверхность, они могут образовывать аддимеры как на поверхности [3] так и на ступенях [4]. Объединение адатомов в димер дает прямое представление о формировании строительных единиц и одновременно предоставляет новое понимание динамики ступеней. В целом, адатомы обладают гораздо большей подвижностью и, следовательно, легче достигают краев ступеней, чем аддимеры [4]. Энергия образования адатома определена в модели [2], учитывающая рост ступени за счет адатомов, и равна 0,8 эВ. Несмотря на то, что взаимодействие адатомов со ступенями изучалось ранее достаточно интенсивно, до сих пор не разработана модель, учитывающая встраивание одновременно адатомов и аддимеров в ступень. Таким образом, вопрос о роли адатомов и аддимеров в росте до сих пор остается открытым.

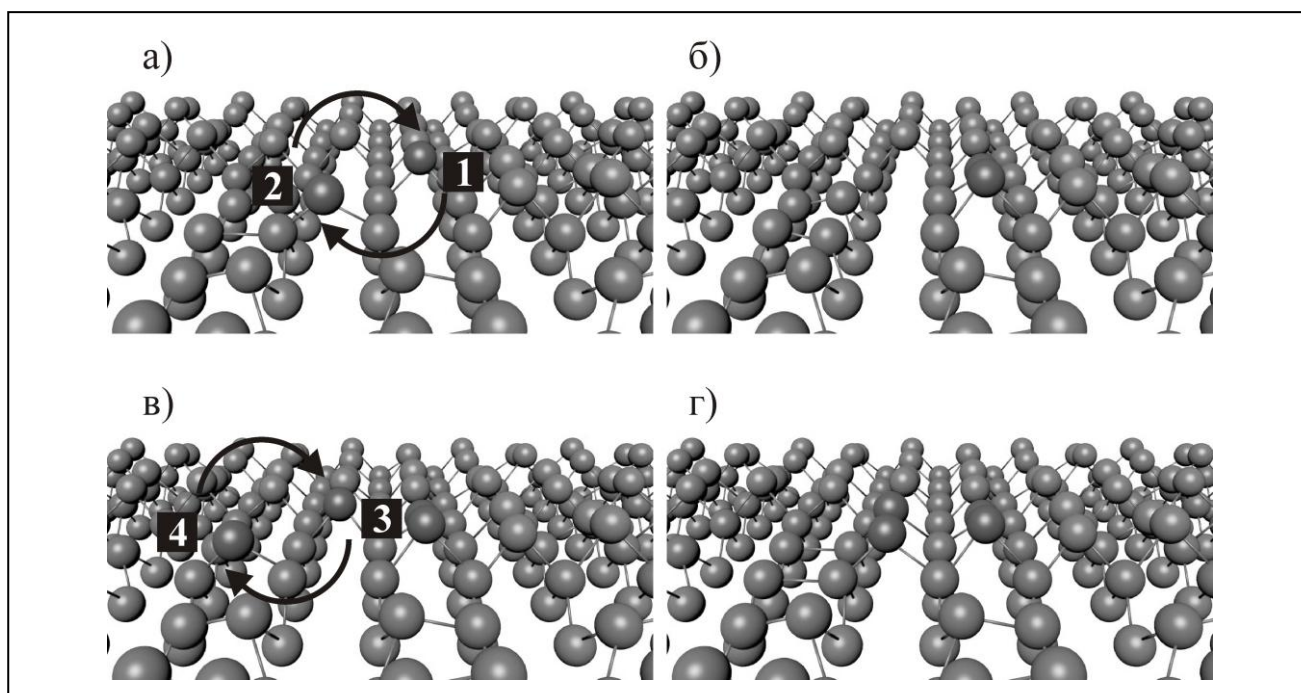


Рис.1 Схематичное 3D-изображение модели последовательно встраивания адатомов в ступень: а) после встраивания адатома 1, происходит встраивание адатома 2, б) в изломе образуется димер с метастабильной структурой nonbonded S_B -ступени, в) встраивание адатома 3 и 4 и г) образование в изломе димера и стабильной структуры rebonded S_B -ступени

В равновесных или близких к равновесным условиям, динамика ступеней происходит только за счет присоединения или отсоединения двух димеров (рис.2) [1]. Важно заметить, что энергия образования димера в [5, 6] принималась равной 1,6 эВ. Энергии ступеней и изломов рассчитывались ранее [7] с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) из быстро охлажденных равновесных поверхностей до комнатной температуры (закалки поверхности) с использованием концепций статистической механики и теории BCF [8]. Однако, результаты [9, 10] показывают, что теория BCF [1] не может быть применена напрямую без надлежащего рассмотрения процесса релаксации, присутствующего в динамике встраивания. Результаты [9, 10] показывают ограничения статистических механических моделей, используемых для определения фундаментальных энергетических параметров. В проведенных ранее с помощью СТМ прямых исследованиях (в работе [6]) динамики ступеней Si(001) при температурах 520-700 К не охлаждая поверхность до комнатной температуры были определены скорости событий присоединения и отсоединения двух димеров, определяющие равновесную структуру ступеней Si(100). При определении диффузии излома в работе [6] получился низкий

префактор равный $3 \times 10^5 \text{ c}^{-1}$, который отражает относительную стабильность промежуточных состояний, возникающие на энергетическом пути между начальной и конечной энергией состояния. Низкий префактор также отражает коллективную природу событий присоединения и отсоединения димеров на ступени. Это предполагает, что для достижения равновесного состояния необходимо определенное время. Таким образом, цель данной работы – поиск оптимальных условий формирования равновесной концентрации изломов и размеров прямолинейных участков ступеней на поверхности Si(100).

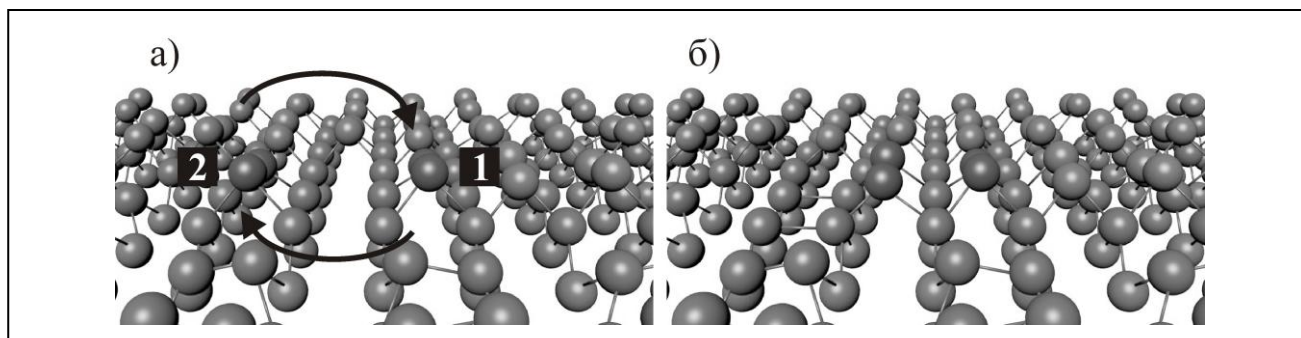


Рис.2 Схематичное 3D-изображение модели последовательно встраивания аддимеров в ступень: а) после встраивания димера 1 и образования метастабильной структурой nonbonded S_B -ступени, происходит встраивание димера 2 и б) после встраивания димера 2, образуется стабильная структура rebonded S_B -ступени

Структура ступеней поверхности Si(100) исследована в данной работе методом СТМ. СТМ-изображения были получены путем быстрого охлаждения поверхности до комнатной температуры (закалки поверхности). На основе полученных СТМ-изображений в диапазоне температур 350-850°C, определена температурная зависимость концентрации изломов и размеров прямолинейных участков на S_A - и S_B -ступенях Si(100). Обе температурные зависимости, как концентрации изломов, так и размеров прямолинейных участков имеют немонотонную зависимость в виде параболы с ветвями направленными вверх и вниз, соответственно. Экспериментальные результаты сравниваются с теоретическими расчетами из [8], которые предполагают независимые друг от друга изломы и не учитывают упругое взаимодействие между ступенями и между изломами [11-13]. Наиболее удовлетворительное соответствие экспериментальных результатов с теоретическими расчетами из [8] наблюдается при температурах поверхности 750°C и 850°C. Вероятно, такое поведение экспериментальных результатов связано с механизмами релаксации ступеней, обсуждавшиеся в [9, 10]. Несмотря на упрощенный подход, экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с теоретическими расчетами из [8], что может подтверждать достоверность экспериментальных результатов для относительно высоких температур.

Список публикаций:

- [1] Swartzentruber B.S., Schacht M. // *Surf. Sci.* 1995. V. 322, P. 83.
- [2] Эрвье Ю.Ю., Есин М.Ю., Дерябин А.С., Колесников А.В., Никифоров А.И. // *Изв. ВУЗов. Физика.* 2023. Т. 66. № 4. С. 85.
- [3] Wolkow R.A. // *PRL.* 1995. V 74. № 22. P. 4448.
- [4] Wingerden J. van, Dam A. van, Haye M.J., Scholte P.M.L.O., Tuinstra F. // *PRB.* 1997. V. 55. № 15. P. 9352.
- [5] Rockett A. // *Surf. Sci.* 1994. V. 312. P. 201.
- [6] Pearson C., Borovsky B., Krueger M., Curtis R., Ganz E. // *PRL.* 1995. V. 74. № 14. P. 2710.
- [7] Swartzentruber B.S., Mo Y.-W., Kariotis R., Lagally M.G., Webb M.B. // *PRL.* 1990. V. 65. № 15. P. 1913.
- [8] Burton W.K., Cabrera N., Frank F.C. // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 1951. V. 243, P. 299.
- [9] Sanchez J.R., Aldao C.M. // *PRB.* 1996. V.54. N.16. P. R11 058.
- [10] Williams F.J., Sanchez J.R., Aldao C.M. // *Surf. Sci.* 1997. V. 391. P. 260.
- [11] Марченко В.И., Паршин А.Я. // *ЖЭТФ.* 1980. Т. 79. № 1(7). С. 257.
- [12] Alerhand O.L., Vanderbilt D., Meade R.D., Joannopoulos J.D. // *PRL.* 1988. V.61. № 17. P. 1973.
- [13] Zhang Zh., Lu Y.-T., Metiu H. // *Surf. Sci. Lett.* 1991. V. 259. P. L719.

Влияние низкотемпературной плазменной обработки на порог оптического пробоя кристаллов ZnGeP_2

Кальсин Андрей Юрьевич
Слюнько Елена Сергеевна
Подзывалов Сергей Николаевич
Лысенко Алексей Борисович
Юдин Николай Николаевич
Томский государственный университет
E-mail: andrejkalsin@gmail.com

Аннотация: Проведено исследование влияния обработки поверхности низкотемпературной плазмой на оптическую стойкость монокристаллов ZnGeP_2 . Плазменная очистка с плотностью электронов 10^{14} – 10^{15} см⁻³ позволила повысить устойчивость к лазерному воздействию до 30 %.

Ключевые слова: оптический пробой, ZnGeP_2 , нелинейная оптика, параметрические генераторы.

Монокристаллы ZnGeP_2 широко применяются в нелинейной оптике, особенно для генерации второй гармоники и параметрическом усилении, благодаря высокому коэффициенту нелинейности и прозрачности в среднем ИК-диапазоне. Они служат основой для создания мощных и перестраиваемых источников когерентного излучения. Одним из ограничивающих факторов в повышении энергетических характеристик параметрических генераторов является оптический пробой поверхности. Различные методы механической и химической обработки приводят к возникновению дефектов, снижающих порог пробоя. Так при полировке, использование абразива вызывает механические повреждения поверхности. Также, на полированной поверхности наблюдаются неровности, которые включают скопления остатков самого материала, так и веществ, используемых при его обработке. Для повышения оптической стойкости материала используются различные методы удаления поверхностных загрязнений: лазерная закалка, химическое травление, ионно-лучевое травление, травление поверхности плазмой.

Целью данного исследования являлось изучение влияния плазменной обработки поверхности монокристаллического ZnGeP_2 на его оптическую стойкость и определение оптимальных параметров обработки для повышения порога оптического пробоя. В ходе эксперимента шесть образцов монокристаллов ZnGeP_2 (Ø 50 мм, толщина 2 мм) были предварительно отполированы, а затем подвергнуты плазменной обработке в импульсном разряде с различным числом импульсов (от 10000 до 500000) и частотой 50–100 Гц.

Образец №1 100Гц 10000 импульсов

Образец №2 50Гц 10000 импульсов

Образец №3 100Гц 100000 импульсов

Образец №4 50Гц 100000 импульсов

Образец №1 100Гц 500000 импульсов

Образец №2 50Гц 500000 импульсов

Измерения порога оптического пробоя проводились методом R-on-1 с использованием Ho:YAG-лазера (15 Вт, 26 нс). Профиль поверхности оценивали оптическим профилометром MicroXAM-800. Ключевым параметром шероховатости оказался показатель Sz, отражающий максимальную высоту неровностей. После обработки наблюдалось увеличение Sz, что свидетельствует об удалении загрязнений, однако при высоком числе импульсов Sz снижался, указывая на сглаживание и очистку микротрещин.

У образцов с максимальным числом импульсов (№5 и №6) наблюдалось повышение порога оптического пробоя на 30 % по сравнению с необработанными. Это связывается с более глубокой очисткой поверхности и снижением плотности дефектов в приповерхностном слое.

Низкотемпературная плазменная очистка позволяет эффективно повышать лазерную стойкость монокристаллов ZnGeP_2 за счёт устранения поверхностных дефектов. Методика перспективна для последующего внедрения в технологии обработки оптических элементов. Необходима дальнейшая оптимизация параметров воздействия.

Исследование кинетических процессов с участием электронно-возбужденного молекулярного азота на высотах средней атмосферы Земли и в разрядной камере

Кириллов Андрей Серафимович 1, Тарасенко Виктор Федотович 1,2

1. Полярный геофизический институт, г. Апатиты

2. Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск
kirillov@pgia.ru

Представлена модель кинетических процессов с участием электронно-возбужденных молекул азота для высот средней атмосферы Земли во время спрайтов. Модель включает кинетику триплетных ($A^3\Sigma_u^+$, V^3P_g , $W^3\Delta_u$, $V'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$) электронно-возбужденных состояний N_2 с учетом переноса энергии возбуждения при неупругих молекулярных столкновениях и спонтанных излучательных переходах. Модель позволяет рассчитывать интенсивности свечения полос первой (излучательные переходы $V^3P_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$) и второй (излучательные переходы $C^3\Pi_u \rightarrow V^3P_g$) положительных систем N_2 как в смеси N_2-O_2 , как и в чистом азоте при электрических разрядах. Рассмотрены шесть полос первой положительной системы в красном диапазоне 645-690 нм и три полосы второй положительной системы в ультрафиолетовом диапазоне 315-360 нм. Результаты моделирования спектров излучения азота в полосах первой и второй положительных систем сравниваются с результатами экспериментальных измерений при давлениях, соответствующих высотам средней атмосферы. Теоретически и экспериментально показано, что неупругие молекулярные столкновения с ростом плотности среды приводят к значительному уменьшению населенностей колебательных уровней состояния V^3P_g и уменьшению интенсивностей свечения полос первой положительной системы N_2 .

Для экспериментальных исследований подготовлены две установки на основе разрядных камер из кварцевых трубок, имеющих внутренние диаметры 5 и 8 см. Во второй установке применены три секции, это обеспечивает возбуждение воздуха и азота низкого давления с различной длительностью импульсов тока разряда, в том числе микросекундной и миллисекундной. Также созданы генераторы, работающие при различных частотах следования импульсов. На данных установках проведены предварительные измерения спектров излучения для азота и воздуха в диапазоне 250-1000 нм при давлениях, соответствующих высотам средней атмосферы.

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 25-22-00158.

Особенности определения механизмов эпитаксиального роста Si и Ge на Si(001) методом дифракции быстрых электронов

Кукенов Олжас Игоревич¹

Дирко Владимир Владиславович¹, Лозовой Кирилл Александрович¹, Коханенко Андрей Павлович¹,
Ворсин Олег Игоревич¹, Гуцин Сергей Михайлович²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов

E-mail: okukenov@mail.ru

С ростом потребности в вычислительной мощности современных технологий, ключевой задачей является создание эффективных электронных компонентов, потребляющих малое количество энергии. Кремниевая технология, благодаря доступности материала, в микроэлектронной промышленности является наиболее развитой. Однако, кремний имеет ряд ограничений и по характеристикам уступает многим другим полупроводникам. Интеграция германия в кремниевую матрицу расширяет возможности использования чистого кремния и позволяет создавать наноструктуры, преодолевающие физические ограничения объёмных материалов [1]. Наноструктуры на основе Si и Ge перспективны в области микроэлектроники, оптоэлектроники, нанофотоники, сенсорики и квантовых технологий. Для создания эффективных электронных компонентов на основе наноструктур требуется получение их строго заданных размеров и характеристик. Такая задача решается использованием материалов высокой чистоты и точно заданных параметров роста. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет синтезировать структуры точно заданной толщины с минимальным количеством дефектов и резкой гетерограницей [2]. В МЛЭ реализуется метод дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ), в котором при отражении потока высокоэнергетичных электронов от поверхности исследуемого образца на люминесцентном экране формируются дифракционные картины, по которым в процессе роста можно определять морфологию выращиваемой наноструктуры [3, 4]. Для получения наноструктур с требуемыми геометрическими и электрофизическими характеристиками необходимо учитывать особенности протекания эпитаксиальных процессов при различных условиях роста. Работа посвящена исследованию зависимости механизмов формирования слоёв Si и Ge на Si(001) от температуры синтеза и углов разориентации подложек.

Эксперименты по напылению эпитаксиальных слоёв Si и Ge на Si(001) проводилось на установке МЛЭ «Катунь – 100». Перед началом работы проводилась стандартная химическая очистка подложки с последующим высоковакуумным отжигом при температуре 1000°C. Скорость роста Si составляла 0,09 МС/с, а Ge – 0,02 МС/сек. Исследования проводились методом ДБОЭ при использовании пучка электронов с энергией до 28 кэВ под малыми скользящими углами (1–2°) к подложке. Изменение дифракционных картин регистрируется на камеру высокого разрешения с последующей обработкой на компьютере.

При гомоэпитаксиальном росте Si на Si(100) образуются чередующиеся террасы двух типов: Т_А (сверхструктура 1x2) и Т_В (сверхструктура 2x1), с разной ориентацией димерных рядов относительно края ступени [5, 6]. При анализе в направлении [110] это проявляется в бимодальном характере колебаний интенсивности ДБОЭ: больший максимум интенсивности соответствует росту на террасе Т_В, меньший – на террасе Т_А (рис. 1).

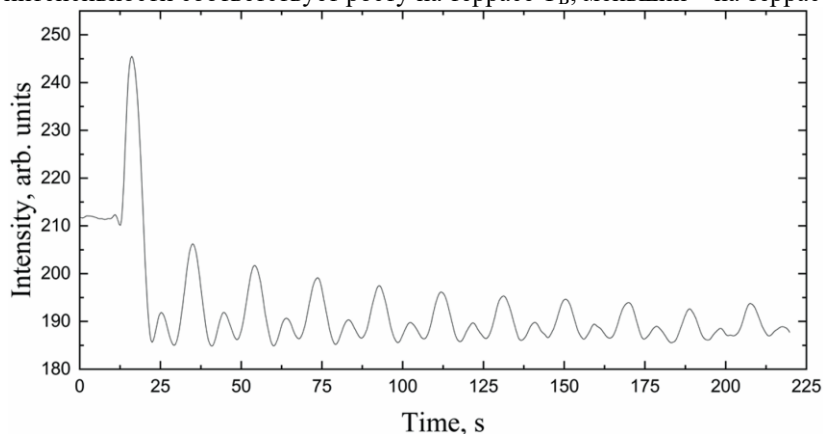


рис. 1. Изменение интенсивности дифракционных картин во времени вблизи центрального рефлекса «00» при синтезе Si на Si(001) в направлении электронного пучка [110] при температуре роста 450 °C

Исследование температурной зависимости этих колебаний выявило несколько режимов роста. При низких температурах (200–500°C) рост преимущественно определяется образованием двумерных островков, так как длины диффузии адатомов недостаточно для достижения краев террас. В диапазоне 500–560°C наблюдается сближение ступеней из-за увеличения диффузионной длины, что указывает на смешанный механизм роста. При дальнейшем повышении температуры (560–600°C) бимодальные осцилляции исчезают, уступая место осцилляциям с удвоенным периодом, что связано с увеличением проницаемости ступеней и их последующим разъездом. При температурах выше 600°C осцилляции пропадают, что свидетельствует о переходе к чисто послойному росту (step-flow), при котором все адатомы достигают краев террас. При анализе эпитаксиального роста Si на Si(001) в направлении [100] по рефлексам от сверхструктур 1x2 и 2x1, которые находятся в зоне Лауэ

порядка $1/2$, было определено отношение площадей террас T_B/T_A для температур в диапазоне 200–800 °С. Полученная кривая соответствует зависимостям, полученным из анализа бимодального характера осцилляций в направлении $[110]$ и дополняет данные других исследователей [7].

При гетероэпитаксиальном росте Ge на Si(001) были получены схожие температурные зависимости. Отношение площадей террас T_B/T_A также демонстрирует немонотонное поведение с максимумом в районе 550 °С. Это указывает на аналогичные механизмы роста, связанные с изменением длины диффузии адатомов Ge и проницаемостью ступеней.

Поскольку качественная картина смены механизмов роста для Si и Ge оказалась подобной, была детально изучена зависимость длины диффузии от температуры для атомов кремния. Для этого использовались подложки с разной шириной террас (от 24 до 165 нм). Длина диффузии определялась как половина ширины террасы при температуре, когда бимодальные осцилляции интенсивности исчезали, что соответствовало переходу к режиму step-flow. Установлено, что длина диффузии нелинейно увеличивается с ростом температуры. Полученные данные для Si важны для понимания общих закономерностей эпитаксиального роста в кремний-германиевой системе, хотя количественные значения длины диффузии для Ge требуют отдельного исследования.

Таким образом, в работе определены диапазоны температур, при которых наблюдаются различные механизмы формирования слоёв Si и Ge на Si(001), определяемые длиной поверхностной диффузии атомов. Определена зависимость длины диффузии от температуры синтеза. Проведённые исследования уточняют и объясняют характер протекания эпитаксиальных процессов в зависимости от температуры синтеза и угла разориентации подложки, повышая уровень контроля ростовых параметров для создания высококачественных компонентов микроэлектроники.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-20004, <https://rscf.ru/project/25-12-20004/> и Администрации Томской области.

Список публикаций:

- [1] Izhnin I. I., Fitsych O. I., Voitsekhovskii A. V. [et al.] // *Opto-electronics review*. 2018. V. 26. №. 3. P. 195-200.
- [2] De La Mata M., Zhou X., Furtmayr F. [et al.] // *Journal of Materials Chemistry C*. 2013. V. 1, № 28. P. 4300–4312.
- [3] Hafez M. A., Zayed M. K., Elsayed-Ali H. E. // *Micron*. 2022. V. 159. P. 103286.
- [4] Dirko V. V., Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P., Voitsekhovskii A. V. *Thickness-dependent elastic strain in Stranski–Krastanow growth* // *Russian Physics Journal*. – 2020. – Vol. 22. – P. 19318–19325.
- [5] Voigtlaender B. // *Surf. Sci. Rep.* 2001. V. 43. P. 127–254.
- [6] Kukenov O. I., Sokolov A. S., Dirko V. V. [et al.] // *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*. – 2023. – T. 68. – №. 3.1. – С. 112–116.
- [7] Esin M. Y., Nikiforov A. I., Timofeev A. I. [et al.] // *Semiconductors*. 2018. V. 52. №. 3. P. 390–393.

Формирование Ми-резонаторов GeSi на окисленной поверхности Si(001)**Майер Ксения Александровна¹***Дирко Владимир Владиславович¹, Кукунов Олжас Игоревич¹, Коханенко Андрей Павлович¹**¹Национальный исследовательский Томский государственный университет**E-mail: kseniamayer955@gmail.com*

Разработка передовых технологий создания оптических приборов является ключевой задачей современной фотоники, стремящейся к миниатюризации и повышению производительности устройств. Особый интерес в этой области представляют резонаторы Ми – микроскопические частицы, способные эффективно концентрировать электромагнитное поле [1]. Благодаря этому свойству они служат базовыми элементами для фотонных интегральных схем и сверхчувствительных сенсоров [2-3]. Наиболее перспективными материалами для таких резонаторов являются кремний (Si) и германий (Ge). Их преимущество заключается не только в совместимости со стандартной КМОП-технологией, но и в высоком показателе преломления, который обеспечивает сильную локализацию поля. Тем не менее, их оптические характеристики напрямую зависят от качества изготовления: структурные несовершенства или отклонения в геометрии могут свести к минимуму все достоинства. Следовательно, основной задачей для практического внедрения этих устройств становится детальное изучение и управление их ростовыми процессами, что позволит обеспечить высокую воспроизводимость и заданные параметры резонаторов. Поэтому, целью работы является определение влияния ростовых параметров на характеристики кремний-германиевых микрорезонаторов.

Для получения структур с требуемыми морфологическими и кристаллическими характеристиками был выбран метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Данная технология обеспечивает рост в условиях сверхвысокого вакуума, что позволяет получать гетероструктуры с резкими границами и низким уровнем фоновых примесей [4]. На подложку Si(001) с тонким оксидным слоем порядка 1 нм наносился аморфный твёрдый раствор $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с заданным процентным составом. Далее осуществлялся послеростовой отжиг. Регулируя процентный состав $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, толщину твёрдого раствора, температуру отжига и его время можно управлять характеристиками структур [5]. Переход от аморфной фазы к кристаллической отслеживался в реальном времени с помощью дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Этот метод основан на анализе дифракционной картины, возникающей при отражении электронов от кристаллической решетки образца. После создания структуры, образцы исследовались методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в высоком вакууме для построения карты рельефа поверхности и получения геометрических характеристик микро-резонаторов. АСМ-снимки были сделаны в полуконтактном режиме на установке «Solver-HV» с помощью кантилеверов NSG_30SS с радиусом скругления до 2 нм.

Таким образом, в работе методом молекулярно-лучевой эпитаксии на окисленной подложке Si(001) были синтезированы GeSi микрорезонаторы. Анализ образцов осуществлялся методом дифракции быстрых электронов в процессе роста, и методом атомно-силовой микроскопии после синтеза. Определено, что длительный отжиг структуры приводит к коалесценции: островки группируются в более крупные структуры в форме дисков с латеральными размерами в среднем около 450 нм. Увеличение температуры и понижение времени отжига способствует формированию округлых структур с основанием порядка 350 нм и высотой 55 нм с чёткими границами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-20004, <https://rscf.ru/project/25-12-20004/> и Администрации Томской области.

Список публикаций:

[1] Dorodnyy A., Smajic J., Leuthold J. // *Laser & Photonics Reviews*. 2023. V. 17. №. 9. P. 2300055.

[2] Jahani S., Jacob Z. // *Nature Nanotechnology*. 2016. V. 11. № 1. P. 23–36.

[3] Aouassa M., Bouabdellaoui M., Pessoa W. B. [et al.] // *ACS Applied Electronic Materials*. 2024. V. 6. № 5. P. 3290–3296.

[4] Dirko V. V., Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P. [et al.] // *Russian Physics Journal*. – 2020. – V. 22. – P. 19318–19325.

[5] Shklyayev A. A. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1461. №. 1. P. 012160.

Германиевые фотодиоды для кремниевой фотоники

Никифоров Александр Иванович, Аксенов Максим Сергеевич, Дерябин Александр Сергеевич, Фрицлер Константин Бернгардович, Колесников Алексей Викторович, Лошкарев Иван Дмитриевич, Пчеляков Олег Петрович, Соколов Леонид Валентинович, Чистохин Игорь Борисович

Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова

Певчих Константин Эдуардович, Светиков Владимир Васильевич

Акционерное общество «Зеленоградский нанотехнологический центр»

E-mail: nikif@isp.nsc.ru

В высокоскоростных волоконно-оптических компонентах в основном используются полупроводники на основе III-V соединений благодаря их хорошим светоизлучающим и поглощающим свойствам, а также широкому спектру гетероструктур, которые могут быть использованы для точной оптимизации производительности устройства в конкретной системе. К сожалению, устройства на основе составных полупроводников, как правило, слишком дороги для использования из-за расходов, связанных с производством оптических компонентов, а также из-за затраты, связанные с упаковкой и сборкой гибридной подсистемы. По этим причинам растет интерес к использованию оптических компонентов на основе элементарных полупроводников для реализации полностью монолитного решения для высокопроизводительных оптических межсоединений [1]. Потенциальным преимуществом монолитной интеграции является снижение затрат, что обусловлено более низкими затратами на исходные материалы, а также возможностью использования инфраструктуры массового производства для обработки кремния. Интегрированные оптические межсоединения также могут повысить производительность за счет устранения паразитных помех и шума, связанных с технологией гибридной упаковки, и в конечном итоге могут привести к реализации более высокой плотности межсоединений.

Оптические межсоединения, основанные на технологии кремниевой фотоники, способны удовлетворить требования к пропускной способности систем передачи данных. Полупроводниковый материал германий (Ge) с шириной запрещенной зоны (0,67 эВ) и обладающим поглощением на телекоммуникационных длинах волн 1,3-1,55 мкм оказался хорошим кандидатом для решения текущих ограничений Si, поскольку он полностью совместим с кремниевой технологией КМОП. Германий выращивается в окнах окисла кремния на кремниевой подложке методами эпитаксиального роста. Обычно используется метод газовой эпитаксии из-за его высокой производительности и возможности селективного роста в окнах. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии реже используется, но его преимуществом является возможность низкотемпературного роста и точность контроля ростовых параметров. Это обеспечивает формирование нелегированных слоев наряду с сильнолегированными областями без взаимной диффузии примесей.

В настоящей работе для получения структур Ge/Si применялся метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Были использованы различные подходы для уменьшения плотности пронизывающих дислокаций в слоях Ge: двухстадийная схема роста, буфер твердого раствора GeSi, постростовой отжиг, проведен анализ их эффективности. Дефектность полученных слоев Ge исследована с использованием методов селективного травления, атомно-силовой микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии.

Использовался двухстадийный метод роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии [2,3]. На первом этапе производился низкотемпературный рост Ge ($T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$) толщиной 100 нм, на этой стадии обеспечивается подавление островкового роста и уменьшение шероховатости поверхности. На втором этапе формируется высокотемпературный слой толщиной 900 нм при температуре $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. На данной стадии плотность пронизывающих дислокаций уменьшается за счет скольжения и аннигиляции.

Для уменьшения плотности пронизывающих дислокаций в камере МЛЭ проводилась постростовая температурная обработка выращенных эпитаксиальных структур. Данная процедура облегчает процесс скольжения и аннигиляции дислокаций. Циклический отжиг нагрева гетероструктуры до температуры $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ и понижение до $725\text{ }^{\circ}\text{C}$, с выдержкой при каждой температуре в течение 5 минут. Минимальная плотность дислокаций в эпитаксиальном слое германия составила $1\cdot 10^7\text{ см}^{-2}$. Фоновое легирование p-типа не превышало $1\div 2\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$. Низкая плотность прорастающих дислокаций подтверждается изображением поперечного среза методом просвечивающей электронной микроскопии, представленного на рисунке 1.

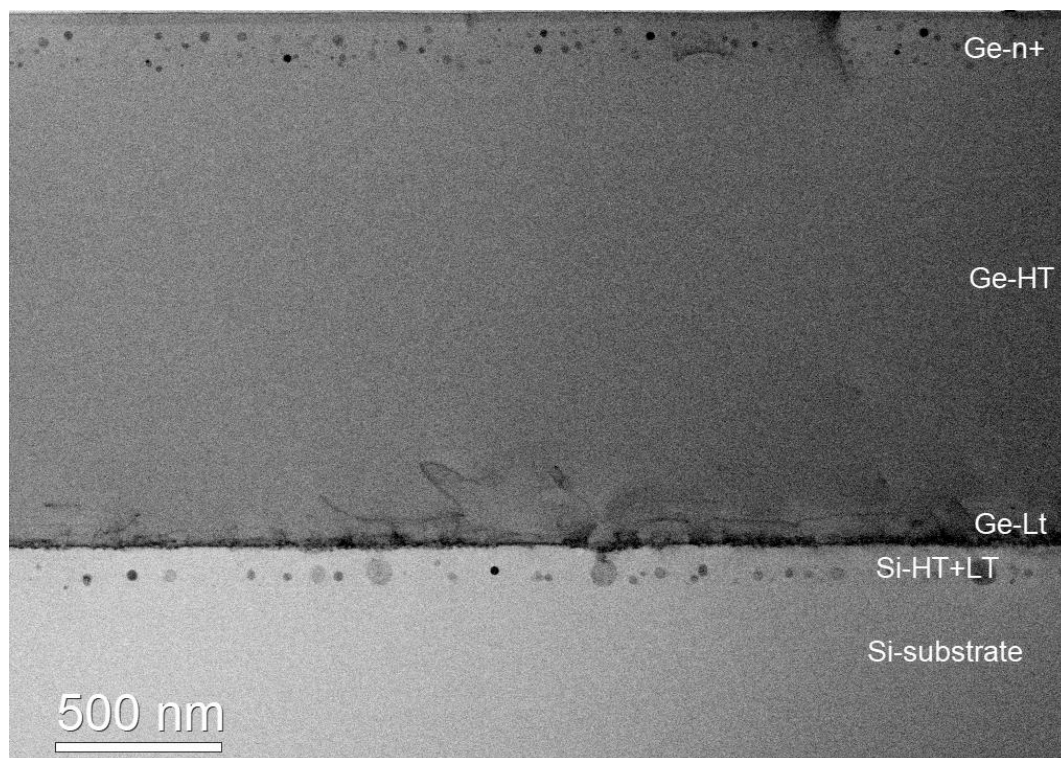


Рис. 1. Изображением поперечного среза эпитаксиального слоя германия на кремнии, полученного методом просвечивающей электронной микроскопии.

Для определения пригодности слоев кремния, получаемых методом МЛЭ, для создания фотодетекторов были изготовлены р-і-п фотодиодов Ge/Si в геометрии меза-структуры на высоколегированной подложке. Измерения вольт-амперных характеристик показали минимальные значения темнового тока 10 мА/см^2 и максимальной чувствительности $0,5 \text{ А/Вт}$ на длине волны $1,31 \text{ мкм}$ р-і-п фотодиода. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности получения фотодетекторов германия на кремниевой подложке методом молекулярно-лучевой эпитаксии и применения их в волноводных структурах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 23-91-06303). Использовалось оборудование центра коллективного пользования “Наноструктуры” ИФП СО РАН.

Литература

- [1] R. A. Soref // Proc. IEEE, vol. 81, no. 12, pp. 1687–1706, Dec. 1993.
- [2] Oehme M., Werner J., Kaschel M., Kirfel O., Kasper E. // Thin Solid Films. 2008. V. 517, № 1. P. 137-139.
- [3] К.Б. Фрицлер и др. // Автометрия, т.60, №4, с. 14, 2024..

Синтез двумерного германия на пиролитическом графите методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Плотников Никита Владимирович

Дирко Владимир Владиславович, Лозовой Кирилл Александрович, Кукунов Олжас

Томский государственный университет

E-mail: plotnikov-nikita2020@mail.ru

Аннотация. В работе представлено исследование синтеза германия методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке высокоориентированного пиролитического графита. Анализ поверхности в процессе роста проводился методом дифракции быстрых отражённых электронов, а после роста — методом атомно-силовой микроскопии и рамановской спектроскопии. Полученные результаты говорят о присутствии графеноподобных двумерных фаз германия на исследуемой поверхности.

Получение графена в 2004 году стало началом активного развития исследований в области 2D-материалов. Вслед за этим возник интерес к другим 2D-материалам, образованным элементами **IV группы**, таким как **силицен** и **германен**. Однако, в отличие от графена, для этих материалов характерно **преобладание sp^3 -гибридизации** в естественных условиях, что приводит к **образованию изгибов** в их атомарно-плоских слоях. Из-за этой особенности возникает **необходимость строгого контроля** в процессе их роста, чтобы минимизировать нежелательное внешнее воздействие на структуру. В связи с этим в настоящее время особое внимание уделяется **синтезу графеноподобных материалов на слабовзаимодействующих подложках**. Одним из наиболее перспективных вариантов является использование **высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ)**. К его основным преимуществам относятся: **простота подготовки, гексагональная симметрия поверхности, отсутствие оборванных связей, химическая инертность, невозможность образования сплавов** с атомами кремния и германия. Тем не менее, **основным типом связи** вне плоскости кристаллической решетки ВОПГ остаются **силы Ван-дер-Ваальса**, что существенно затрудняет изучение процессов, происходящих при **эпитаксиальном осаждении германия** на его поверхности. В результате, на сегодняшний день остается множество нерешенных вопросов, связанных с механизмами роста и стабилизацией графеноподобных материалов на подобных подложках.

Эксперименты проводились на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100» в условиях **сверхвысокого вакуума** при различных температурах роста. **Контроль морфологии поверхности** в процессе синтеза осуществлялся методом **дифракции быстрых электронов**. Этот метод позволяет получать **интегральную информацию** о структуре поверхности благодаря дифракции электронов, длина волны которых **соизмерима с параметрами кристаллической решетки**. Анализ дифракционных картин даёт возможность не только определить **кристаллическую структуру** поверхности, но и **оценить относительный поток осаждаемых атомов германия** на подложку ВОПГ. После полученные структуры были дополнительно исследованы с помощью **атомно-силовой микроскопии** и **рамановской спектроскопии**. Эти методы позволили провести детальную характеристику морфологии поверхности.

Обнаружено, что при комнатной температуре в процессе формирования первого атомного слоя германий **эпитаксиально воспроизводит структуру графитовой подложки**. Оптимальные условия роста германена достигаются при **комнатной температуре** в сочетании с **пониженной скоростью осаждения**. Было **установлено**, что ступени на поверхности пиролитического графита выступают в качестве **активных центров нуклеации** для трёхмерных германиевых островков. Однако, несмотря на выраженную роль ступеней как эффективных стоков для атомов германия, на плоских террасах наблюдалось образование **однослойных германиевых островков** высотой не более одного атомного слоя. Согласно результатам рамановской спектроскопии на поверхности наблюдается образование структуры, отличной от ВОПГ и объемной структуры германия. Таким образом, можно предполагать формирование двумерной фазы. **При повышении температуры роста** наблюдаются преимущественное образование трёхмерных кластеров германия, а также отмечается **ярко выраженная миграция атомов германия** к краям ступеней ВОПГ, что свидетельствует о существенном влиянии термодинамических факторов на распределение адсорбированных атомов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет 2030).

Список публикаций:

[1] Лозовой К. А., Дирко В. В., Коханенко А. П., Кукунов О. И. [и др.] // Новые двумерные графеноподобные материалы и гетероструктуры, Известия высших учебных заведений. Физика. 2025. Т. 68(3). С. 5–15.

Дифракционные свойства мультиплексированных многослойных КПЖК дифракционных структур с изменяющимся периодом

Проскуряков Дмитрий Александрович

*Шарангович Сергей Николаевич, Долгирев Виктор Олегович, Растрыгин Даниил Сергеевич, Чубаров Даниил
Максимович, Алтухов Юрий Алексеевич*

Томский Государственный Университет Систем Управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

E-mail: dm-proskuryakov@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлены дифракционные свойства мультиплексированных многослойных неоднородных голографических дифракционных структур, сформированных в капсулированных полимером нематических жидких кристаллах с изменяющимся периодом. Путем численного моделирования по разработанной математической модели были получены дифракционные характеристики, которые демонстрируют применение исследуемых структур в качестве электрически управляемых спектральных фильтров для оптических систем связи с плотным спектральным уплотнением каналов.

Ключевые слова: мультиплексирование, МНГДС, КПЖК.

Введение

Современные достижения в области фотоники и оптоэлектроники стимулируют разработку инновационных материалов с регулируемыми оптическими параметрами. Так практическую значимость приобретают голографические дифракционные структуры (ГДС), созданные на базе фотополимеризующихся композитов с включением жидких кристаллов (ФПМ-ЖК, КПЖК) [1, 2], которые демонстрируют способность к управлению оптическими характеристиками ГДС под влиянием внешнего электрического поля.

В научном сообществе возрастает интерес к многослойным неоднородным голографическим дифракционным структурам (МНГДС), которые могут быть сформированы, например, в ФПМ-ЖК или КПЖК [3, 4]. Хотя, данными структурами возможно динамически управлять с помощью внешнего электрического воздействия, их практическое применение может быть ограничено узкой угловой (спектральной) селективностью, которая напрямую зависит от толщины дифракционных слоев.

Для расширения рабочей угловой (спектральной) селективности предлагаются применение в совокупности двух методов, чирпирования (изменение периода структуры) и мультиплексирования. Комбинированное применение этих методов позволяет осуществить многократное расширение угловой селективности стандартных МНГДС. Ранее проведенные исследования чирпированных мультиплексированных МНГДС на основе ФПМ-ЖК [5] показали теоретическую возможность их применения в оптических системах связи со спектральным уплотнением каналов. Однако, для МНГДС на основе ФПМ-ЖК (для которых концентрация ЖК достаточно велика (более 90%)), дифракционные характеристики при воздействии электрическим полем имеют существенные различия в сравнении с МНГДС с КПЖК. Поэтому, целью данной работы является исследование дифракционных свойств мультиплексированных МНГДС на основе КПЖК с изменяющимся периодом.

Теоретическая часть

Опираясь на полученные результаты из [5], была разработана новая аналитическая модель, описывающая процесс дифракции света на чирпированных мультиплексированных МНГДС, сформированных в КПЖК.

В данной модели учитывается фазовый профиль $\varphi_c^n(\mathbf{r})$ формируемой чирпированной структуры для каждого отдельного слоя, который описывается в виде разложения в ряд Тейлора, ограниченного квадратичным членом:

$$\varphi_c^n(\mathbf{r}) = \varphi_0^n + \nabla \varphi^n \cdot \mathbf{r} + 0,5 \nabla^2 \varphi^n \cdot \mathbf{r}^2, \quad (1)$$

где $|\nabla \varphi^n| = K^n$, K^n – вектор решетки.

На рисунке 1 приведена схема дифракции света на мультиплексированной чирпированной МНГДС.

Для описания процесса дифракции также будем считать, что считывание мультиплексированной чирпированной МНГДС происходит плоской световой волной, все процессы записи на ГДС завершены, а апертура считывающего пучка много больше толщины МНГДС.

Световое поле для дальней зоны дифракции на выходе чирпированной мультиплексированной МНГДС в результате процесса преобразования частотно-угловых спектров взаимодействующих световых пучков представляется в виде перемножения суммы передаточных матричных функций каждой записанной МНГДС и входного оптического поля [6]:

$$\mathbf{E}^{m,N} = (\mathbf{T}^{m,N,1} + \dots \mathbf{T}^{m,N,n_h} + \dots + \mathbf{T}^{m,N,N_h}) \cdot \mathbf{E}^0, \quad (2)$$

где $\mathbf{T}^{m,N,n_h} = \mathbf{T}^{m,N,n_h} \cdot \mathbf{A}^{m,N-1} \cdot \mathbf{T}^{m,N-1,n_h} \cdot \dots \cdot \mathbf{A}^{m,1} \cdot \mathbf{T}^{m,1,n_h}$ – матричная передаточная функция МНГДС,

$\mathbf{E}^{m,n} = \begin{bmatrix} E_0^{m,n}(\omega, \Delta K) \\ E_1^{m,n}(\omega, \Delta K) \end{bmatrix}$, $\mathbf{T}^{m,n,n_h} = \begin{bmatrix} T_{00}^{m,n,n_h}(\omega, \Delta K) & T_{10}^{m,n,n_h}(\omega, \Delta K) \\ T_{01}^{m,n,n_h}(\omega, \Delta K) & T_{11}^{m,n,n_h}(\omega, \Delta K) \end{bmatrix}$ – матричная передаточная функция,

$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} E_0(\omega, \Delta K) \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}^{m,n}$ – матрица перехода для промежуточного слоя из [6, 7], N_h и n_h – количество и номер записанной голограммы, ω – частота считывающего пучка, ΔK – фазовая расстройка, $m = o, e$ – индекс, соответствующий обычным и необычным волнам, N и n – количество и номер дифракционных

слоев.

Компоненты матрицы T^{m,n,n_h} определены ранее в работе [6].

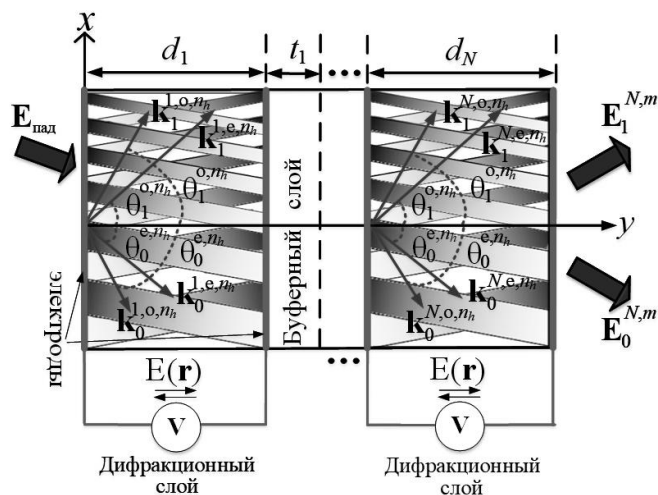


Рис. 1 Схема дифракции света на чирпированной мультиплексированной МНГДС с КПЖК

Численное моделирование

В качестве основных параметров для численного моделирования использовалась многослойная структура толщиной 20 мкм для дифракционного (d_n) и 294 мкм для буферного (t_n) слоя. Длина считывающей световой волны (λ_{read}) составляла 1550 нм и записывающей световой волны (λ_0) 633 нм, количество дифракционных слоев (N) и количество решеток (n_h) равнялось $N=2$ и $n_h=2$. Углы поворота образца при записи мультиплексированной чирпированной МНГДС $\psi = \{-11; 11\}$ градусов. Квадратичный коэффициент изменения фазового профиля $0.5V^2\varphi^n = 3 \cdot 10^5$.

На рисунке 2 приведены угловые селективности стандартной и чирпированной мультиплексированной двухслойной ГДС относительно длин волн DWDM диапазона. Зависимость выражена в дБ относительно максимальной интенсивности излучения.

Исходя из рисунка 2 видно, что при использовании метода чирпирования и мультиплексирования, можно добиться не только увеличения числа локальных максимумов, но и их уширения. В данном случае, удалось получить двухкратное увеличение числа спектральных каналов по уровню минус 3 дБ, а также изменить интервал между ними в 3 раза.

На рисунке 3 приведена зависимость ДЭ чирпированной мультиплексированной МНГДС от угла считывания и значения напряженности внешнего электрического поля относительно критической напряженности Фредерикса (E_c). Считывание производилось световой волной с состоянием поляризации, соответствующее собственным необыкновенным волнам в образце.

Как видно из рисунка 3, ДЭ снижается экспоненциально при линейном увеличении значения напряженности внешнего электрического поля на все дифракционные слои. В отличие от случая с ФПМ-ЖК, угловая селективность не имеет смещение [5, 6].

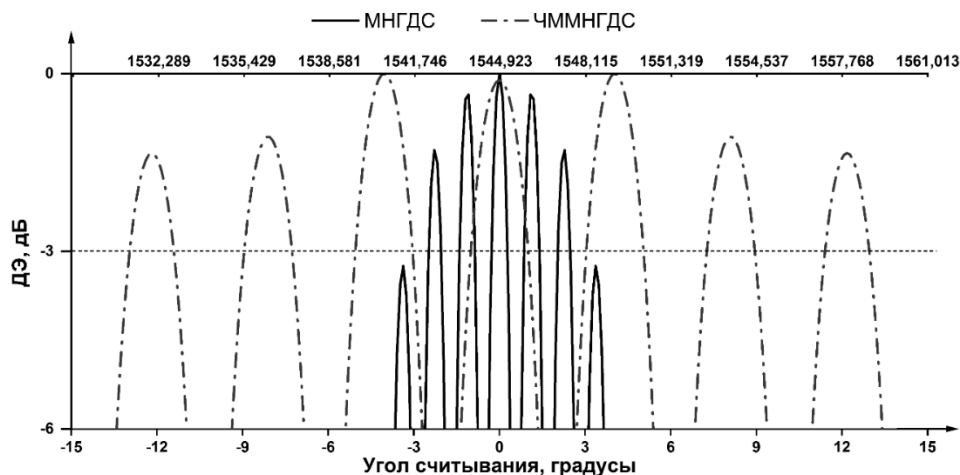


Рис. 2 Угловые селективности стандартной и чирпированной мультиплексированной МНГДС

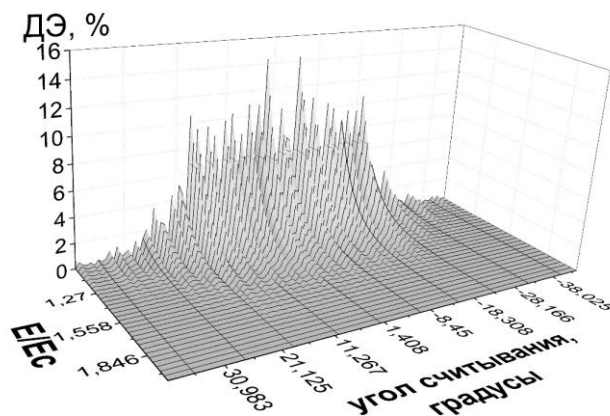


Рис. 3 Зависимость ДЭ chirпованной мультиплексированной двухслойной ГДС от угла считывания и значения напряженности внешнего электрического поля

На рисунке 4 приведена зависимость ДЭ chirпованной мультиплексированной МНГДС от угла считывания и значения квадратичного коэффициента изменения фазового профиля. Считывание производилось световой волной с состоянием поляризации, соответствующее собственным необыкновенным волнам в образце.

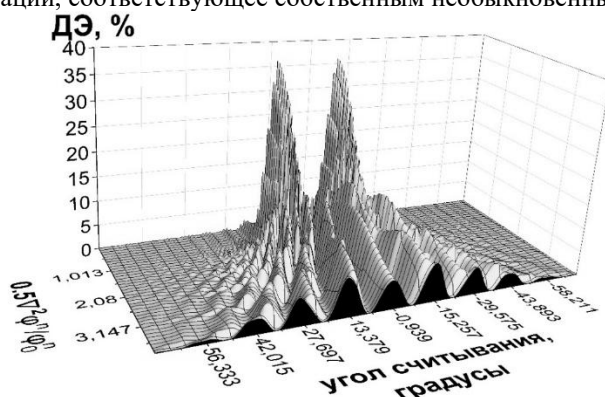


Рис. 4 Зависимость ДЭ chirпованной мультиплексированной двухслойной ГДС от угла считывания и изменения квадратичного коэффициента $0.5\nabla^2\varphi^n$

Как видно из рисунка 4, при росте значения квадратичного члена $0.5\nabla^2\varphi^n$ локальные максимумы имеют уширение, а их количество не изменяется. Изменение количества локальных максимумов, в данном случае, достигается только за счет метода мультиплексирования.

Заключение

Таким образом, в данной работе исследованы дифракционные свойства мультиплексированных многослойных неоднородных голографических дифракционных структур, сформированных в капсулированном полимером нематических жидких кристаллах с изменяющимся периодом.

В ходе исследования было продемонстрировано, что при одновременном использовании двух методов, chirпования и мультиплексирования, возможно добиться не только увеличения числа локальных максимумов, но и увеличения их спектральной ширины. При $0.5\nabla^2\varphi^n = 3 \cdot 10^5$ и двух записанных ГДС удалось увеличить количество в два раза и спектральную ширину локальных максимумов в три раза по уровню минус 3 дБ. Кроме того, для случая МНГДС с КПЖК увеличение значения напряженности электрического поля не приводит к смещению угловой селективности, как было характерно для структур с ФПМ-ЖК, но также приводит к снижению дифракционной эффективности. Рост значения квадратичного члена $0.5\nabla^2\varphi^n$ для фазового профиля $\varphi_c^n(\mathbf{r})$ ГДС приводит к уширению локального максимума, но не к увеличению их количества.

Список публикаций:

- [1] Sakhno O., Slussarenko S., Stumpe J. // *Organic Holographic Materials and Applications II: proceeding of SPIE. Denver 2004. Vol. 5521. P. 38-45.*
- [2] Прищепина О., Шабанов А. В., Зырянов В. Я. // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2010. Т. 3. № 3. С. 395-406.*
- [3] Гуревич Б. С., Гуревич С. Б., Пецкус А. М. // *Научное приборостроение. 2006. Т. 16. № 2. С. 22-33.*
- [4] Лойко В. А., Зырянов В. Я., Конколович А. В., Мискевич А. А. // *Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 1. С. 158-168.*
- [5] Rastrygin D.S., Dolgirev V.O., Sharangovich S.N. // *Bull. Russ. Acad. Sci: Phys. 2024. V. 88, No. 3, P. S408-S412*
- [6] Dolgirev V.O., Sharangovich S.N. // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2023. V. 87. No. 1. P. 12.*
- [7] Дудник Д.И., Шарангович С.Н. // *Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 1. С. 14.*

Структурные и оптические свойства множественных квантовых ям GeSn/Si и GeSn/GeSi

Скворцов Илья Владимирович¹

Тимофеев Вячеслав Алексеевич¹, Лошкарев Иван Дмитриевич¹, Кириенко Виктор Владимирович¹, Машанов Владимир Иванович¹, Коляда Дмитрий Владимирович², Фирсов Дмитрий Дмитриевич², Комков Олег Сергеевич²

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

E-mail: i.skvortsov@isp.nsc.ru

На сегодняшний день фотоприемные и светоизлучающие структуры на основе GeSn представляют большой интерес, что связано с их совместимостью с кремниевой технологией, а также возможностью охватить не только ближний инфракрасный (ИК) диапазон длин волн (1.5–3 мкм), но и средний (3–8 мкм), и дальний (8–14 мкм) ИК диапазоны. На данный момент не представлено детальных исследований структурных и оптических свойств пленок $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ с большими значениями x , полученных непосредственно на поверхности Si. Цель данной работы заключается в установлении условий формирования многослойных периодических структур, включающих сверхтонкие упругонапряженные слои GeSn с высоким содержанием олова. Проведены исследования зонной структуры множественных квантовых ям (МКЯ) GeSn/Si и GeSn/GeSi, а также изучены их структурные и оптические свойства.

Определены условия роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии множественных квантовых ям GeSn/Si и GeSn/GeSi, включающих сверхтонкие слои GeSn толщиной около 1 монослоя. С применением рентгеновской дифрактометрии продемонстрировано формирование упругонапряженных слоев GeSn с содержанием олова до 47%. Сигнал фотолюминесценции (ФЛ) МКЯ GeSn/Si наблюдался в диапазоне длин волн 1.461–1.568 мкм. Анализ зонных диаграмм гетероструктуры GeSn/Si, а также результаты измерения мощностной зависимости фотолюминесценции МКЯ $\text{Ge}_{0.53}\text{Sn}_{0.47}/\text{Si}$, подтвердили формирование гетероперехода 2 рода. Обнаружено, что уменьшение температуры осаждения и толщины слоев GeSn приводит к увеличению сигнала фотолюминесценции, связанной с межзонными оптическими переходами. Кроме того, наблюдается значительное уменьшение сигнала ФЛ, связанного с вакансионными комплексами, по отношению к сигналу от межзонных переходов. Продemonстрировано, что самый интенсивный сигнал наблюдается от структур с наименьшей шириной квантовых ям $\text{Ge}_{0.53}\text{Sn}_{0.47}/\text{Si}$. Уменьшение интенсивности сигнала ФЛ при увеличении толщины слоев GeSn может быть связано с уменьшением перекрытия волновых функций дырок и электронов, локализованных в потенциальных ямах, образующихся вблизи гетерограницы GeSn/Si. Изучена температурная зависимость фотолюминесценции МКЯ $\text{Ge}_{0.53}\text{Sn}_{0.47}/\text{Si}$ (рис. 1) и определены энергии активации процессов

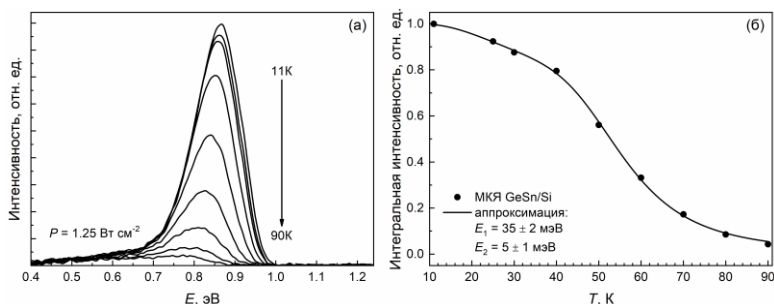


рис. 1 Спектры фотолюминесценции структуры с МКЯ GeSn/Si, измеренные в диапазоне температур 11–90 K (а). Зависимость интегральной интенсивности от температуры (б)

безызлучательной рекомбинации, которые приводят к температурному гашению ФЛ. Энергии активации составили 35 ± 2 мэВ и 5 ± 1 мэВ. Полученные значения энергий активации позволяют сказать, что затухание ФЛ не связано с термической эмиссией дырок из квантовых ям, поскольку, согласно расчетам, энергия связи дырок в квантовой яме $\text{Ge}_{0.53}\text{Sn}_{0.47}/\text{Si}$ шириной 0.17 нм составляет 200 мэВ. При этом энергия связи электронов, которые локализуются вблизи слоев GeSn, может иметь тот же порядок величины, что и найденные энергии активации. Так, энергия связи электронов, локализованных вблизи квантовых точек Ge/Si, составляет ~ 30 мэВ. Проведены расчеты зонных диаграмм МКЯ GeSn/GeSi, а также изучены их спектры фотолюминесценции. Продemonстрировано, что использование барьерных слоев GeSi позволяет сместить значения энергии межзонных оптических переходов в МКЯ в сторону меньших энергий при неизменных составах и толщинах слоев GeSn, и продвинуться в более длинноволновую область спектра.

Модификация свойств границ раздела поверхностный окисел-антимонид индия мягким рентгеновским излучением

В.Г. Средин¹, А.В. Войцеховский², А.А. Степаненко³, А.П. Мелехов³, Р.Ш. Рамакоти³, С.М. Дзядух²,
Андрейчиков К.С.⁴

1. Военная академия РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха, МО
 2. Томский национальный исследовательский государственный университет
 3. Национальный ядерный исследовательский университет (МИФИ)
 4. АО «МЗ «Сапфир», Москва
- E-mail: sredinv@rambler.ru

Мягкому рентгеновскому излучению (МРИ) принадлежит электромагнитное излучение с энергией квантов в диапазоне 0.4 - 10 кэВ. В настоящее время его актуальность обусловлена использованием в технологических процессах фотолитографии экстремально ультрафиолета. В этой связи возникает также интерес к исследованию процессов взаимодействия МРИ с полупроводниковыми материалами. МРИ, как известно, поглощается в тонком приповерхностном слое материала, причем основными механизмами его взаимодействия с веществом являются упругое и неупругое рассеяние электронами и поглощение, при котором рентгеновский квант полностью отдает энергию электрону внутренней электронной оболочке атома, приводя к фотоионизации, причем доминирующим для МРИ является последний механизм [1,2]. Впервые влияние МРИ на физические свойства полупроводников исследовалось в [3], проблеме влияния МРИ на поверхностные свойства некоторых узкозонных материалов посвящены работы [4,5], в которых было показано, что в результате этого процесса происходит генерация дефектов в приповерхностной области. Указанный эффект можно рассматривать как частный случай дефектообразования рентгеновским излучением в кристаллах [6,7], который связывается с генерацией дефектов в результате релаксации электронных возбуждений, созданных рентгеновским излучением. Отметим, что в [6,7] использовалось излучение с энергией кванта более 10 кэВ, вследствие чего оно вызывало дефектообразование в объеме образца, в то время как МРИ приводит к исключительно поверхностным эффектам.

В настоящей работе рассматривалось действие МРИ лазерной плазмы на свойства границы раздела поверхности InSb со слоем поверхностного окисла. Исследуемые образцы представляли собой пластины монокристаллического антимонида индия электронного типа проводимости, на поверхности которых наносилось двухслойное диэлектрическое покрытие, состоящее из собственного анодного окисного слоя толщиной порядка 0.5 мкм, поверх которого термически осаждался слой SiO₂, имеющий такую же толщину. В качестве источника использовалось МРИ плазмы малоиндуктивного искрового разряда [8,9]. Инициация разряда проводилась с помощью сфокусированного излучения импульсного Nd: YAG лазера. Спектральный диапазон МРИ составлял 0.4-8кэВ с максимумом в области 2-4 кэВ. Длительность рентгеновского импульса $\Delta t \leq 20$ нс. Облучение проводилось при 300К. Максимальная доза облучения – 1.5 Дж/см². Поверхность кристалла не имела специально избранной кристаллографической ориентации.

На данных поверхностно-барьерных структурах были проведены исследования вольт-фарадных характеристик (ВФХ) до и после их облучения с максимальной дозой. Диапазон напряжений при измерениях выбирался таким образом, чтобы по их результатам можно было получить значения емкости диэлектрического покрытия и высокочастотной емкости ОПЗ в режиме сильной инверсии. Наши измерения показали, что в следствии облучения ВФХ приобретают более плоский вид (рис.1), что свидетельствует о значительном росте плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник - диэлектрик. Сопоставление значений эффективного поверхностного заряда Q_{ss} , полученных для обратных разверток напряжения, показывает, что плотность быстрых поверхностных состояний возросла в результате облучения МРИ на величину $2.5 \cdot 10^{11}$ см⁻². Увеличение емкости в режиме сильной инверсии, в свою очередь, указывает на уменьшение ширины ОПЗ. Если провести оценки изменения концентрации основных носителей на основании изменений уровня емкости, то в рамках стандартных моделей можно констатировать, что ее величина в ОПЗ в среднем увеличилась не менее чем в два раза относительно исходных значений.

Рост плотности поверхностных состояний может быть связан с захватом электронов, образовавшихся за счет возбуждения МРИ внутренних оболочек атомов с образованием свободных электронов, уровнями на границе раздела и в слое окисла. Рост концентрации основных носителей может быть связан также и с генерацией радиационных дефектов в приповерхностной области полупроводника, этот эффект был обнаружен в монокристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$ [5]. Для оценки возможности возникновения точечных дефектов в решетке антимонида индия в результате воздействия МРИ нами проводилась количественная оценка вероятности выхода ионов кристалла из потенциальной ямы, образованной его ближайшим окружением. С этой целью вычислялась энергия связи In-Sb. Для этого моделировался потенциал парного взаимодействия $\phi(r)$ для иона индия, расположенного в центре тетраэдрической ячейки, образованной ионами сурьмы, в виде, предложенном в [10]. Трехчастичное взаимодействие ионов не учитывалось, как следующий по порядку малости эффект. Полный потенциал взаимодействия иона индия с ионами сурьмы брался в виде суперпозиции потенциалов по всем парам взаимодействий: $\Phi(r) = \sum \phi(|r - r_i|)$, где r – радиус-вектор, проведенный в точку наблюдения, r_i – радиус-вектор,

проведённый в точку, где располагается ион сурьмы, $i = 1 \dots 4$. Система координат выбрана таким образом, что ион индия располагался в начале отсчёта, который совпадал с геометрическим центром элементарного тетраэдра, в вершинах которого располагались неподвижные ионы сурьмы. Полученный таким образом потенциал подставлялся в стационарное уравнение Шредингера для расчёта спектра связанных состояний индия внутри элементарной ячейки. Уравнение решалось численно. Результаты расчетов показывают, что глубина потенциальной ямы составляет 3.4 эВ, и эту величину мы рассматриваем как энергию связи в In-Sb. Уровни энергии связанных состояний в яме отстоят друг от друга на величину порядка 120 мэВ. В этих обстоятельствах выход иона из потенциальной ямы мало вероятен, хотя энергия кванта МРИ много больше полученного значения энергии связи, однако реализации процесса формирования дефекта структуры необходимо выполнение закона сохранения импульса. Таким образом, наши оценки показывают, что генерация дефектов при облучении InSb МРИ маловероятна.

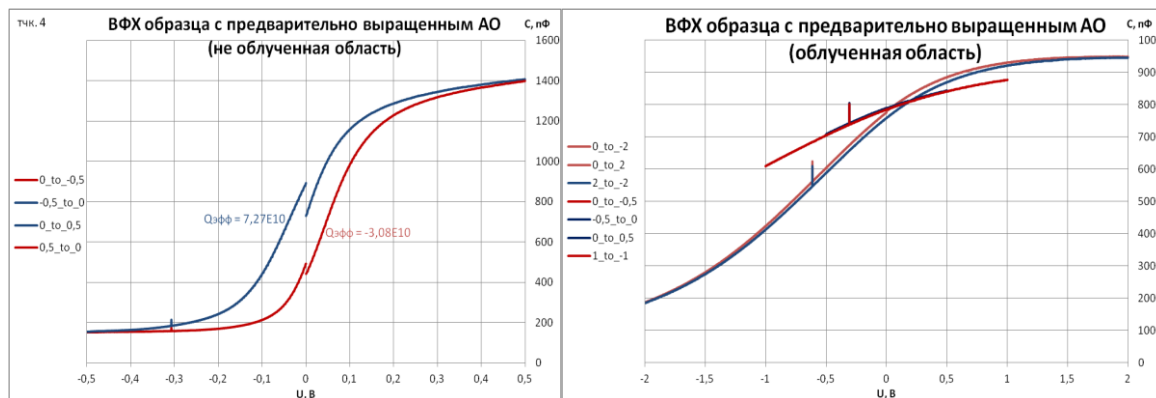


Рис. 1. ВФХ исследуемых образцов до (слева) и после (справа) их облучения МРИ

Отметим, что кристаллическая решетка InSb имеет структуру сфалерита, а для всех многокомпонентных материалов, относящихся к этому классу, присуща анизотропия поверхностных свойств, распространяющаяся также и на свойства поверхностных окислов, что было в свое время показано для $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [11,12]. Поэтому количественные характеристики, описывающие радиационные эффекты, такие как плотность поверхностных состояний, концентрация поверхностных дефектов (в случае их генерации) могут зависеть от кристаллографической ориентации поверхности исследуемых образцов.

Список публикаций:

- [1] Мишетт А. Оптика мягкого рентгеновского излучения. М. «Мир», 1989 -352 с.
- [2] Заитов Ф.А., Литвинова Н.Н., Савицкий В.Г., Средин В.Г. Радиационная стойкость в оптоэлектронике. Москва. 1987.
- [3] V.Ju. Znamenskiy, O.B. Ananin, R.Z. Bogateliya, Ju.A. Vykovskiy, I.K. Novikov. Proc. SPIE.1994.V.2125. P.363-369.
- [4] Средин В.Г., Ананьин О.Б., Бурлаков И.Д., Мирофьянченко А.Е., Мелехов А.П., Новиков И.К. Прикладная физика. 2013, №6, С.17-20
- [5] Средин В.Г., Войцеховский А.В., Ананьин О.Б., Мелехов А.П. Несмелов С.Н., Дзядох С.М. Прикладная физика. 2018. №4. С.54 – 60.
- [6] Вавилов В. С. УФН. 1997. Т. 167. № 4. С. 407-417.
- [7] Клингер М.И., Луцик Ч.Б., Машовец Т.В. и др. УФН.1987. Т.147.№ 3.С.523-558.
- [8] Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. ПТЭ, 2018, № 1, С. 84-86.
- [9] Вовченко Е.Д., Григорьева И.Г., Кушин В.В. Макаров А.А., Мелехов А.П. Физика плазмы. 2022.Т.48. №11.С.1306-1309.
- [10] J. P. Rino, G. de Oliveira Cardozo, and A. Picinin, Computers, Materials & Continua (CMC) 12, 145 (2009).
- [11] Средин В.Г., Мезин Ю.С., Укроженко В.М. Физика и техника полупроводников. 2001. Т.35. №11. С. 1335-1337.
- [12] Sredin V.G., Lanskaya O.G., Popovnin V.M. Semiconductors. 1996. Т.30.№3. С.215-216

Спектроскопические исследования фазового состава кристаллов твердых растворов полупроводников

В.Г. Средин¹, Д.Л. Федоров², В.И. Загарских¹, О.С. Комарова.²

1. Военная академия РВСН им. Петра Великого. Балашиха МО, РФ

2. Балтийский государственный технический университет «Военмех». Санкт Петербург, РФ

Изовалентные твердые растворы замещения полупроводников $A^{IV}B^{VI}$ широко применяются в качестве материалов для создания различных типов оптоэлектронных приборов, работающих в различных спектральных диапазонах электромагнитного излучения [1,2]. Эти материалы являются также объектом интенсивных исследований в связи с изучением ряда специфических эффектов таких, например, как переход узкозонных полупроводников в бесщелевое состояние или процессов упорядочения-разупорядочения в кристаллических структурах. Технология получения однородных по составу и обладающих заданными свойствами монокристаллов твердых растворов была (и остается в ряде случаев) сложной задачей, ограничивающей области их применения. В кристаллах твердых растворов в процессе их синтеза неизбежно возникают отклонения от идеальности, так называемый композиционный и топологический беспорядок [3], которые приводят к флуктуациям состава и вызванной ими неоднородности свойств. Поэтому значительное внимание уделяется разработке различных методов контроля состава, в том числе, спектроскопических [4,5]. В ряде случаев твердые растворы в некоторой области составов демонстрируют термодинамическую нестабильность, приводящую к распаду раствора, в результате чего возникает макроскопическая неоднородность и образование смеси фаз разного состава [6]. Подобный результат может возникать и при формировании твердых растворов соединениями, имеющими разную кристаллографическую структуру. Изучение таких состояний материалов затруднено, т.к. рентгеноструктурный анализ – прямой метод определения кристаллической структуры – позволяет констатировать лишь наличие различных фаз (под фазой здесь понимается определенная часть системы, состоящая из компонентов твердого раствора, которая во всех своих точках имеет одинаковый состав, строение и свойства), но не дает возможности даже определить их относительное содержание.

В ряде подобных случаев для изучения фазового состава твердых растворов весьма информативным представляются исследования экситонных спектров. Так, твердые растворы замещения $Zn_{1-x}Mg_xS$ и $CdSe_xS_{1-x}$ образованы бинарными соединениями, имеющими различную кристаллографическую модификацию – кубическую (сфалерит) и гексагональную (вюрцит), причем некоторые из них, например, ZnS , полиморфны и могут кристаллизоваться и в той, и в другой модификации. Это приводит к тому, что в достаточно широкой области составов этих твердых растворов возникают так называемые дефекты упаковки – нерегулярное чередование слоев с гексагональной и кубической структурами, ориентированными вдоль оси $\langle 0001 \rangle$ в структуре вюрцита и оси $\langle 111 \rangle$ в структуре сфалерита [7,8]. Формированию подобных многофазных систем способствует близость указанных кристаллических структур, которая демонстрируется в модели твердых сфер. В этой модели кристалл представляют в виде слоев плотно упакованных сфер анионов, имеющих больший ионный радиус в рассматриваемых материалах, тетраэдрические пустоты, в которых заполняют катионы. В зависимости от порядка заполнения этих пустот можно получить как структуру сфалерита, так и структуру вюрцита, причем структурный фазовый переход приводит к относительно небольшим изменениям параметра кристаллической решетки. При этом экситонные спектры претерпевают существенную трансформацию, сопровождающую изменения в центре зоны Бриллюэна, обусловленные изменением симметрии кристалла в результате структурного фазового перехода. В результате в экситонных спектрах возможно расщепление экситонной линии как в спектрах отражения, так и в спектрах люминесценции, а сами спектры приобретают поляризацию.

Рассматриваемые твердые растворы имеют достаточно большие области составов с двухфазной структурой (до 10% у $Zn_{1-x}Mg_xS$ и до 40% у $CdSe_xS_{1-x}$). Для этих твердых растворов было установлено наличие 3 типов экситонных спектров: первый – аналогичный спектрам гексагональных структур с длинноволновым смещением линий экситонных состояний А и В (по сравнению с однофазными системами); второй – исключительно линии А и В с поляризацией экситонных спектров гексагональных структур и третий – типичный экситонный спектр сфалерита, где основное состояние представлено одной неполяризованной линией. Таким образом, возникает возможность неразрушающими методами определять фазовый состав кристаллов с дефектами упаковки и определять относительный состав фаз в кристаллах по сдвигу экситонных линий и степени поляризации спектров.

Экситонные спектры позволяют также определять параметры энергетической зонной структуры, в том числе зависимость ширины запрещенной зоны от состава. На рис.1 представлена зависимость ширины запрещенной зоны для твердого раствора $Zn_{1-x}Mg_xS$, содержащего область с дефектами упаковки $0 < x < 0.12$ и со структурой вюрцита. Таким образом, изучение экситонных спектров позволяет получать информацию не только о фазовом составе кристаллов твердых растворов, но и получать дополнительную информацию, например, определять параметры энергетической зонной структуры полупроводников.

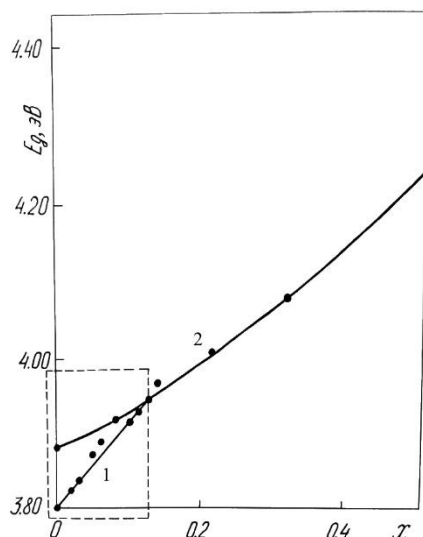


Рис.1. Зависимость ширины запрещенной зоны твердого раствора $Zn_{1-x}Mg_xS$ от состава для области с дефектами упаковки $0 < x < 0.12$ (1) и для однофазных составов со структурой вюрцита $x > 0.12$ (2)

Список публикаций

1. Берченко Н.Н., Кревс В.Е., Средин В.Г. Полупроводниковые твердые растворы $A^{II}B^{VI}$ и их применение: Справочные таблицы / Москва, 1982.
2. Физика соединений $A^{II}B^{VI}$. Под ред. Георгобиани А.Н. и Шейкмана М.К. - М.Наука.1986.
3. Дж.Киттель. Модели беспорядка. – М.: Мир.1982. - 591с
4. Шиляев А.В., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л., Грешнов А.А. Журнал технической физики. 2017. Т.87. №3. С.419-426
5. Средин В.Г., Укроженко В.М. Физика и техника полупроводников. 1989. Т.23. №10. С.1762-1766
6. Дейбук В.Г., Дремлюженко С.Г., Остапов С.Э. Физика и техника полупроводников. 2005. Т.39. №10. С. 1153-1158.
7. Денисов Е.П., Арешкин Н.Г., Федоров Д.Л., Конников С.Г. Физика твердого тела. 1997. Т.39. №1. С.49- 52.
8. Klochihin A.A., Permogorov S.A., Reznitski A.N. J. Cryst. Growth. 1996. V.159. P. 848 -852.

Области “glow” и “beads” в красных столбчатых спрайтах

Тарасенко Виктор Федотович*Институт Сильноточной электроники СО РАН*Виноградов Никита Петрович*Институт Сильноточной электроники СО РАН**Бакиит Евгений Хаимович*Институт Сильноточной электроники СО РАН

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Благодаря многочисленным исследованиям разрядов в мезосфере и стратосфере, накоплены значительные сведения об их форме и природе [1,2,3]. Однако определение формы и спектров излучения красных спрайтов, которые наиболее изучены в настоящее время, является сложной задачей. В-первых, эти разряды наблюдаются только над грозовыми облаками на высотах над уровнем моря 40 – 100 км. Соответственно, их можно наблюдать с Земли в горах или на больших расстояниях от места их появления. Другой вариант – проводить измерения с самолетов, спутников, аэростатов и Международной космической станции. Все эти измерения требуют больших материальных затрат. Во-вторых, хотя спрайты появляются над грозовыми облаками во время положительных молний, время этих разрядов и их место, а также форма нестабильны и изменяются от импульса к импульсу. В настоящее время удаётся регистрировать спектры излучения спрайтов, для их различных частей (стримеров, как распространяющихся вниз к поверхности Земли, так и вверх; областей яркого свечения “glow”; отдельных ярких точек “beads”, но только с малым спектральным и временным разрешением, а также в ограниченных спектральных диапазонах [4].

В настоящей работе, при формировании в воздухе низкого давления плазменных диффузных струй (ПДС), реализованы условия, при которых удаётся получить области свечения, подобные наблюдаемым в области «glow» красных столбчатых спрайтов, а также отдельные яркие точки, которые являются аналогами “beads”.

Разряд формировался в трубках с внутренним диаметром 5, или 8.4, или 14.2 см при подключении к кольцевым внешним электродам высоковольтного генератора с амплитудой импульсов напряжения при холостом ходе $U \sim 10$ кВ. В импульсно-периодическом режиме ($f = 1$ кГц и более) U уменьшалось до ~ 7 кВ при длительности импульса напряжения на полувысоте ~ 1.5 мкс. Длительности фронта и спада U были одинаковы и при появлении ПДС равнялись ~ 350 нс. Кроме того, при вариации условий возбуждения импульсы напряжения подавались в модернизированных установках на торцевые электроды, изготовленные из металла. Эмиссионные спектры излучения разрядной плазмы на её продольной оси в области 120-550 нм регистрировались при помощи вакуумного монохроматора VM-502 (Acton Research Corp.). Для регистрации спектров излучения через боковую поверхность кварцевых трубок использовались спектрометры HR2000+ES и HR4000 (оба производства OceanOptics Inc.), оснащенные световодом. Чувствительности спектрометров и пропускание световода в диапазоне $\Delta\lambda = 250\text{--}1000$ нм были известны. Спектральное разрешение оптической системы с монохроматором VM-502 было не хуже ~ 0.4 нм при ширине входной щели 100 мкм, а со спектрометрами HR2000+ES и HR4000 не хуже ~ 0.9 и ~ 0.2 нм, соответственно. Регистрация спектров излучения, а также фотографирование свечения разрядной плазмы проводились в темноте. Часть результатов, полученных в 2022 - 2025 годах при изучении лабораторных аналогов красных спрайтов, опубликована в работах [5–9].

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ за счет гранта № 24-29-00166.

[1]. Литература.

- Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Stendel M., Singh R., Siingh D. // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. P. 496.
- Neubert T., Chanrion O., Heumesser M., Dimitriadou K., Husbjerg L., Rasmussen I. L., Østgaard N., Reglero V. // Nature. 2021. V. 589(7842). P. 371.
- Marskar R. // Plasma Sources Science and Technology. 2024. V. 33. Art. no. 025024.
- Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Haaland R., Luque A. // J. of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125. Art. no. e2020JD033170.
- Tarasenko V., Vinogradov N., Baksht E., Sorokin D. // J. of Atmospheric Science Research. 2022. V. 5(4). P. 26.
- Тарасенко В. Ф., Бакшт Е. Х., Панарин В. А., Виноградов Н. П. // Физика плазмы. 2023. Т. 49(6). С. 590.
- Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Baksht E.K., Vinogradov N.P. // Physics of Plasmas. 2023. V. 30. Art. no. 083515.
- Тарасенко В. Ф., Панарин В. А., Скаун В.С., Виноградов Н. П. // Прикладная физика. 2024. № 2. С. 31.
- Тарасенко В.Ф., Панченко А.Н., Бакшт Е.Х., Виноградов Н.П. // Оптика и спектроскопия. 2025. Т. 133, В. 1. С. 5–13.

Структурные и оптические свойства гетероструктур на основе материалов IV группы (Ge, Si, Sn)

Тимофеев Вячеслав Алексеевич¹

Скворцов Илья Владимирович¹, Машанов Владимир Иванович¹, Гайдук Алексей Евгеньевич¹, Блошкин Алексей Александрович¹, Никифоров Александр Иванович¹, Коляда Дмитрий Владимирович², Фирсов Дмитрий Дмитриевич², Комков Олег Сергеевич²

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

E-mail: Vyacheslav.t@isp.nsc.ru

Актуальной задачей на пути развития электронно-фотонных интегральных схем является получение новых материалов, совместимых с кремниевой технологией, позволяющих расширить рабочий спектральный диапазон устройств, а также продвинуться в направлении их миниатюризации, повышения быстродействия и энергоэффективности. Класс материалов Ge-Si-Sn является одним из наиболее перспективных для решения вышеобозначенных задач. Добавление Sn в матрицу GeSi позволяет контролируемо управлять зонной структурой исходного материала, уменьшая ширину запрещенной зоны. Это дает возможность регулировать рабочую длину волны устройств нанопотоники на основе материалов GeSiSn в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне от 1.55 до 8 мкм, тогда как рабочая длина волны устройств на основе Ge и Si ограничена ближним инфракрасным (ИК) диапазоном.

В результате проведенных исследований разработана технология роста многослойных структур, включающих квантовые ямы и квантовые точки GeSiSn/Si(Ge) с содержанием Ge до 84% и Sn до 18%, методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Установлена кинетическая диаграмма роста слоев GeSiSn с высоким содержанием Sn в диапазоне температур 100–300 °С. На основании этих кинетических диаграмм выявлен диапазон толщин, соответствующий псевдоморфному состоянию пленок. Преимуществом таких пленок перед более толстыми слоями является отсутствие дислокаций. При сравнении измерений параметров гетероструктур GeSiSn/Si методами спектроскопии доплеровского уширения аннигиляционной линии и ИК-фотолюминесценции (ФЛ) показано, что полоса излучения, состоящая из ряда отдельных пиков в диапазоне энергий 0.3–0.55 эВ, связана с излучением вакансионных комплексов. Плотность этих дефектов существенно уменьшается при отжиге структуры за счет образования вакансионных комплексов, что в свою очередь приводит к снижению интенсивности ФЛ дефектов и способствует росту интенсивности ФЛ от множественных квантовых ям (МКЯ) GeSiSn/Si. Установлено, что отжиг структур МКЯ GeSiSn/Si в диапазоне температур 500–700 °С приводит к смене механизмов ФЛ от люминесценции с участием излучательных вакансионных комплексов к межзонной люминесценции. Межзонная ФЛ получена для структур МКЯ с шириной квантовых ям GeSiSn от 0.5 до 3 нм, а также с различным содержанием Ge и Sn. Положение пика ФЛ для отожженных образцов МКЯ GeSiSn/Si смещается в длинноволновую область вплоть до 2 мкм. Для гетероструктур с множественными квантовыми ямами GeSiSn/Si экспериментально продемонстрировано смещение пика фотолюминесценции до 0.541 эВ (2.3 мкм) при добавлении в структуру Ge квантовых точек, что расширяет рабочий диапазон светоизлучающих и фотоприемных устройств до спектральной области 2–2.3 мкм.

Применение ИК-Фурье-спектроскопии фотоотражения для исследования зонной структуры твердых растворов GeSiSn позволило экспериментально наблюдать прямые межзонные переходы в эпитаксиальных слоях GeSn и GeSiSn различного состава. Для исследованных образцов получены энергии переходов, определены их температурные зависимости и продемонстрировано влияние отжига на оптические свойства образцов. В спектрах фотоотражения гетероструктур GeSn/Ge обнаружено расщепление основного пика, свидетельствующее о расщеплении валентной зоны GeSn на подзону тяжелых и легких дырок вследствие механических напряжений в структуре. Это наблюдение иллюстрирует возможность бесконтактной оценки степени механических напряжений в слое GeSn путем измерения величины расщепления в ИК-спектрах фотоотражения.

Методами численного моделирования рассчитаны электромагнитные характеристики полупроводниковых и гибридных метаматериальных структур для усиления фотоотклика в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне. Показано, что структуры на основе полупроводниковых полос на высокоиндексной подложке позволяют концентрировать электрическое поле в активном слое благодаря резонансам Ми, а также гибридным колебаниям, образованным перекрытием резонанса Ми и плазмонного резонанса. Были изготовлены р-і-п фотодиоды на основе слоев GeSiSn, сопряженных с массивом Ми-резонаторов и гибридными металлдиэлектрическими метаповерхностями. Показано, что использование метаповерхности приводит к увеличению фототока по сравнению с исходными фотодиодами в области спектра 1.6–2.0 мкм. Усиление фототока на порядок по сравнению с исходной структурой вызвано локализацией электрического поля в активной области фотодиода и обусловлено возбуждением резонансов Ми.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации № FWGW-2024-0001.

Исследование эпитаксиальных структур Ge/Si методом рентгеновской дифрактометрии с построением карт обратного пространства

Турцев Евгений Сергеевич

Лошкарев Иван Дмитриевич, Василенко Антон Павлович, Фрицлер Константин Бернгардович,
Дерябин Александр Сергеевич, Шеховцов Андрей Сергеевич, Никифоров Александр Иванович
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: nurseitmuhta@mail.ru

Гетероструктуры Ge/Si перспективны для создания эффективных фотодетекторов для кремниевых фотонных интегральных схем, поскольку они могут принимать сигнал в инфракрасном диапазоне длин волн 1,31–1,55 мкм. Германий обладает большим коэффициентом поглощения, который составляет $7,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ и $3,5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-1}$ на данных длинах волн [1], также его можно относительно легко интегрировать в технологическую линию КМОП. Главной проблемой создания фотодетектора является возникновение большой плотности пронизывающих дислокаций из-за несоответствия параметров решеток между кремнием и германием. Данные дислокации ведут к ухудшению электрофизических параметров прибора. Из этого следует одна из ключевых задач – получение качественных эпитаксиальных слоев германия на кремнии.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии были получены образцы [2]: Ge/Si с несоответствием параметров решеток 4,2%; Ge/GeSi/Si с несоответствием параметров решетки между Ge и буферным слоем GeSi ~3%, и между GeSi и Si ~1%.

Для анализа структурного качества эпитаксиальных слоёв Ge применялись методы селективного травления и рентгеновской дифрактометрии. Пронизывающие дислокации проявлялись в виде ямок на поверхности, в результате селективного травления. Плотность образовавшихся ямок травления анализировали методом атомно-силовой микроскопии. Рентгеноструктурные исследования выполнены на трёхосовом рентгеновском дифрактометре ДСО-1Т в излучении $\text{CuK}\alpha 1$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$).

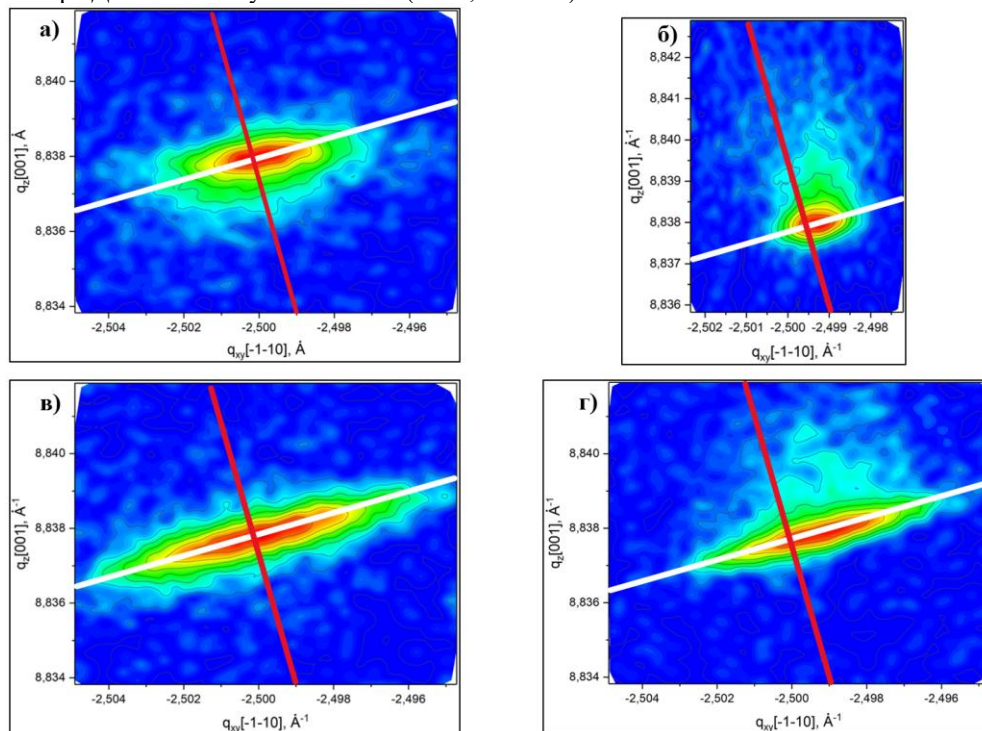


рис.1 Карты обратного пространства вокруг узла Ge(-1-15) для образцов: а) Ge/Si до отжига; б) Ge/Si после отжига; в) Ge/GeSi/Si до отжига (германий, выращенный через буферный слой); г) Ge/GeSi/Si после отжига.

На рис.1 изображены карты распределения интенсивности в обратном пространстве, на которых видны узлы Ge(-1-15), для гетероструктур Ge/Si и Ge/GeSi/Si до и после отжига. Наклоненная от вертикали линия (рис.1) была проведена из нулевого узла через узел подложки Si(-1-15) и является линией полной релаксации. Положение узла Ge(-1-15) на данной линии соответствует полностью релаксированной пленке германия. Видно, что до отжига (рис.1 а, в) пленка Ge почти полностью релаксирована, так как узел находится близко к линии полной релаксации. После отжига (рис.1 б, г) узлы не лежат на линии полной релаксации, следовательно, пленки находятся в напряженном состоянии, латерально растянуты. На картах белой наклонной прямой показана линия ориентации. Распределение интенсивности вдоль белой линии происходит от решеток с одинаковым параметром, но отличной ориентацией.

Анализ формы узла на карте обратного пространства позволяет получить информацию о сетке дислокаций несоответствия. В [3] показано отличие узлов обратной решетки плёнки для двух предельных случаев: сеток 60- и 90-градусных дислокаций несоответствия (ДН). Последним соответствует меньший уровень ориентационных искажений, они эффективнее снимают несоответствие, но являются «сидячими» [4]. Кроме

того, 60-градусные ДН более подвижны, что повышает вероятность аннигиляции пронизывающих участков. Анализ карт обратного пространства (*рис.1 а-г*) и данных АСМ позволил определить влияние типа дислокаций несоответствия (ДН) и отжига на структурное совершенство слоёв Ge. В границе раздела Ge/Si (*рис.1 а*) сформировалась сетка ДН, в которой преобладают 60-градусные ДН, что привело к умеренным ориентационным искажениям и высокой плотности пронизывающих дислокаций (ПД) – $8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. В процессе отжига часть 60-градусных ДН удлиняются, вступают в реакцию между собой, образуют 90-градусные ДН, происходит аннигиляция пронизывающих участков дислокаций. В результате отжига уменьшилась ширина узла вдоль линии ориентации (*рис.1 б*), соответственно в плёнке снизился уровень ориентационных искажений, т.к. существенно повысилась доля 90-градусных ДН в границе раздела. Следствием реакций аннигиляции пронизывающих участков дислокаций стало уменьшение плотности ПД ($4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$). Форма узла для структуры Ge/GeSi/Si до и после отжига (*рис.1 в, г*) соответствует структурам с большими ориентационными искажениями. Данные искажения характерны для сетки 60-градусных ДН [3], которые обеспечивают эффективную аннигиляцию пронизывающих участков: до и после отжига плотность ПД составляет порядка 10^6 см^{-2} . Таким образом, несмотря на большие ориентационные искажения, системы с сеткой 60-градусных ДН демонстрируют меньшую плотность ПД по сравнению с гетеросистемами, содержащими 90-градусные ДН. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии были получены образцы Ge/Si и Ge/GeSi/Si. С точки зрения плотности пронизывающих дислокаций, структуры Ge/GeSi/Si являются менее дефектными, что подтверждается результатами селективного травления, рентгеновской трёхосевой дифрактометрии и АСМ. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 23-91-01007).

Список публикаций:

- [1] Benedikovic D., Virot L., Aubin G. et al. Silicon-germanium receivers for short-wave-infrared optoelectronics and communications // *Nanophotonics*. 2020. 10, Iss. 3. P. 1059-1079.
- [2] Молекулярно-лучевая эпитаксия германия на Si(001) для фотодетекторов спектрального диапазона 1,31–1,55 мкм / К.Б. Фрицлер, А.С. Дерябин, И.Д. Лошкарев [и др.] // *Автометрия* — Новосибирск, 2024 — Т. 60. — № 4. — С. 14–19.
- [3] Kaganer V. M., Köhler R., Schmidbauer M. et al. X-ray diffraction peaks due to misfit dislocations in heteroepitaxial structures // *Phys. Rev. B*. 1997. 55, Iss. 3. P. 1793–1810.
- [4] Bolkhovityanov Yu. B., Sokolov L. V. Ge-on-Si films obtained by epitaxial growing: Edge dislocations and their participation in plastic relaxation // *Semiconductor Sci. and Technol.* 2012. 27, N 4. 043001. DOI: 10.1088/0268-1242/27/4/043001.

Генерация лазерного излучения в полимерных планарных волноводах

Федоткин Максим Григорьевич¹

Тельминов Евгений Николаевич¹, Солодова Татьяна Александровна¹, Бердыбаева Ширин¹,
Гадиров Руслан Магомедтахирович²

¹Томский государственный университет

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: sheirn@mail.ru

Разработка и использование источников когерентного излучения становится все более актуальными в связи с тем, что фотонные интегральные схемы (ФИС) получили широкое распространение в оптоэлектронике, в качестве различных датчиков и в оптических вычислениях. Поэтому создание полимерных лазерно-активных сред приобретает особый интерес, так как возможно формирование фотовозбуждаемых тонкопленочных излучающих структур в виде планарных активных волноводов.

Особенность лазерно-активных планарных волноводов, в отличие от пассивных, состоит в том, что в активных волноводах одновременно с генерацией излучения происходит формирование и распространение лазерного излучения в виде волноводных мод. При этом ввиду активности волновода образуется целый набор различных мод, которые, в свою очередь, могут быть направляемыми и излучательными. Направляемые делятся на два типа ТМ и ТЕ и могут быть четными и нечетными. Спектр направляемых мод дискретен, поскольку отражение от границы раздела сред налагает специальные условия и представляет собой суперпозицию близких по частоте волн. Спектр же излучательных мод непрерывен, поскольку специальных условий не налагается.

Цель работы – создание активного планарного волновода с заданными параметрами и получение лазерной генерации в нем, а также изучение особенностей возникновения и распространения лазерного излучения в созданных волноводах (спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики) и дальнейшая оптимизация параметров волноводов. В экспериментах реализована поперечная схема возбуждения. Накачка производилась второй гармоникой YAG-Nd³⁺ лазера LQ-215 (532 нм). Геометрические размеры пучка накачки в поперечном сечении составляли: длина 9-10 мм, ширина 0,45-0,5 мм. Планарный волновод представлял собой трехслойную структуру, состоящую из матрицы полиметилметакрилата (ПММА), допированной красителем хромен-3, согласующего слоя из гидролизованного тетраэтоксисилана и стеклянной подложки.

В работе выявлена оптимальная толщина волноводного слоя Хромена-3 в ПММА, сформированного из раствора тетрагидрофурана (ТГФ), для достижения минимального значения пороговой плотности мощности накачки (рис. 1). Наблюдается насыщение полуширины спектральной линии генерации 9 нм не зависимо от толщины планарного активного волновода на основе ПММА, допированного красителем Хромен-3 в одномодовом режиме (рис. 2).

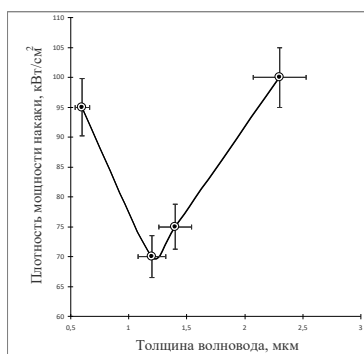


рис. 1 — Зависимость пороговой плотности мощности накачки от толщины волновода для Хромена-3 в ПММА, сформированного из ТГФ

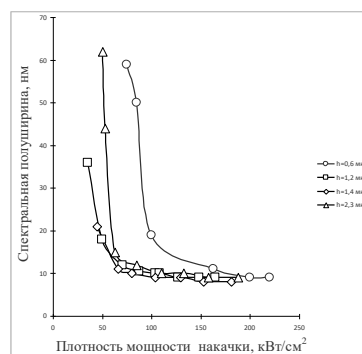


рис. 2 — Зависимость ширины линии генерации на полувысоте от плотности мощности накачки для Хромена-3 в ПММА, сформированного из ТГФ

Исследованы динамика сужения спектральных линий генерации и пороговые характеристики по уровню накачки активных планарных волноводов матрицы из ПММА, допированного красителем Хромен-3, при возбуждении излучением второй гармоникой YAG-Nd³⁺ лазера.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации. (Проект № FEWM-2024-0001).

Эпитаксиальные структуры Ge/Si, сформированные методом МЛЭ для изготовления PIN фотодетекторов

Шеховцов Андрей Сергеевич, Никифоров Александр Иванович, Фрицлер Константин Бернгардович, Лошкарев Иван Дмитриевич, Соколов Леонид Валентинович, Дерябин Александр Сергеевич, Чистохин Игорь Борисович
Институт физики полупроводников имени Ржанова, Новосибирск
E-mail: asehovcov4@gmail.com

Эпитаксиальные пленки германия на кремниевой подложке широко применяются для изготовления фотонных и электронных приборов. Одним из наиболее перспективных направлений использования данных гетероструктур является формирование фотодетекторов на основе германиевых pin фотодиодов [1]. Германий обладает хорошим поглощением на телекоммуникационных длинах волн 1,3–1,55 мкм, а также полностью совместим с технологией КМОП. Это открывает возможности применения фотодетекторов на основе структур Ge/Si в фотонных интегральных схемах на кремнии, которые являются одним из наиболее эффективных компонентов для организации высокоскоростной оптической передачи данных и обработки сигналов. Одной из важнейших проблем является создание интегрированных с волноводами Ge фотодетекторов для сопряжения кремниевых фотонных интегральных схем с оптоволоконными линиями связи.

Структурное совершенство эпитаксиальных систем Ge/Si определяет качество изготавливаемых фотодетекторов и возможности их практического применения. Формирование совершенных слоев германия на кремниевой подложке является сложной задачей из-за высокого несоответствия параметров решетки Ge и Si, которое достигает 4,2%. Рост Ge сопровождается генерацией большого количества пронизывающих дислокаций (ПД), что ухудшает рабочие характеристики фотодетекторов. Актуальной задачей является получение качественных малодефектных слоев Ge и уменьшение плотности ПД.

В настоящей работе для получения структур Ge/Si применялся метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Были использованы различные подходы для уменьшения плотности пронизывающих дислокаций в слоях Ge: двухстадийная схема роста, буфер твердого раствора GeSi, постростовой отжиг, проведен анализ их эффективности. Дефектность полученных слоев Ge исследована с использованием методов селективного травления, атомно-силовой микроскопии и рентгеновской дифрактометрии.

Двухстадийный метод был разработан для получения слоев Ge на Si методом газовой эпитаксии [2] и адаптирован для метода МЛЭ [3,4]. В представленной работе на первом этапе производился низкотемпературный рост Ge (при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$) толщиной 100 нм, на этой стадии обеспечивается подавление островкового роста и уменьшение шероховатости поверхности. На втором этапе формируется высокотемпературный слой толщиной 900 нм при температуре 550 $^{\circ}\text{C}$. На данном этапе плотность пронизывающих дислокаций уменьшается за счет скольжения и аннигиляции.

Для уменьшения плотности ПД в камере МЛЭ проводилась постростовая температурная обработка выращенных эпитаксиальных структур. Данная процедура облегчает процесс скольжения и аннигиляции дислокаций. Были применены различные режимы отжига. Циклический отжиг включал 5 циклов нагрева гетероструктуры до температуры 850 $^{\circ}\text{C}$ и понижение до 725 $^{\circ}\text{C}$, с выдержкой при каждой температуре в течение 5 минут. Кроме циклического, использовался непрерывный режим отжига при температуре 850 $^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа. Исследовано влияние постростовой термообработки на дефектность гетероструктур.

Показано, что двухстадийный метод, включающий постростовой отжиг, обеспечивает уменьшение плотности пронизывающих дислокаций до уровня менее 10^8 см^{-2} . Наиболее эффективна модификация технологии двухстадийного роста с отжигом и применением слоя твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ толщиной $\sim 500\text{ нм}$. Применение данного подхода позволяет уменьшить плотность пронизывающих дислокаций до уровня $\sim 10^7\text{ см}^{-2}$.

Получены и исследованы легированные различными методами слои Ge. Легирование осуществлялось в камере МЛЭ in-situ в процессе роста Ge и методом ионной имплантации. Концентрация примеси в исследованных образцах составляет 10^{19} см^{-3} , плотность пронизывающих дислокаций $\sim 10^8\text{ см}^{-2}$.

Был разработан технологический процесс получения PIN структур для изготовления Ge/Si фотодетекторов. На первом этапе производился низкотемпературный рост слоя Ge толщиной 100 нм, in-situ легированного бором до уровня $\sim 10^{19}\text{ см}^{-3}$. Затем формировался собственный слой Ge толщиной 1500 нм при температуре 550–600 $^{\circ}\text{C}$. По окончании роста i-слоя структура в вакуумной камере установки МЛЭ подверглась высокотемпературной обработке. Затем выращивался слой Ge толщиной 200 нм, in-situ легированный сурьмой до уровня $\sim 10^{19}\text{ см}^{-3}$. Исследована дефектность полученных структур, плотность пронизывающих дислокаций составила $\sim 2 \cdot 10^7\text{ см}^{-2}$.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 23-91-01007).

Литература

- 1) Chen, G., Yu, Y., Shi, Y. et al. High-Speed Photodetectors on Silicon Photonics Platform for Optical Interconnect // *Laser & Photonics Reviews*. 2022. Т. 16. №. 12. С. 2200117.
- 2) Michel J., Liu J., Kimerling L. C. High-performance Ge-on-Si photodetectors // *Nature Photonics*. – 2010. – Т. 4, № 8. – С. 527–534.
- 3) Oehme M., Werner J., Kaschel M., Kirfel O., Kasper E. Germanium waveguide photodetectors integrated on silicon with MBE // *Thin Solid Films*. 2008. V. 517, № 1. P. 137–139.
- 4) Молекулярно-лучевая эпитаксия германия на Si(001) для фотодетекторов спектрального диапазона 1,31–1,55 мкм / К.Б. Фрицлер, А.С. Дерябин, И.Д. Лошкарев [и др.] // *Автоматрица* — Новосибирск, 2024 — Т. 60. — № 4. — С. 14–19.

Формирование Ми-резонаторов GeSi на окисленной поверхности Si(001)**Майер Ксения Александровна¹***Дирко Владимир Владиславович¹, Кукунов Олжас Игоревич¹, Коханенко Андрей Павлович¹**¹Национальный исследовательский Томский государственный университет**E-mail: kseniamayer955@gmail.com*

Разработка передовых технологий создания оптических приборов является ключевой задачей современной фотоники, стремящейся к миниатюризации и повышению производительности устройств. Особый интерес в этой области представляют резонаторы Ми – микроскопические частицы, способные эффективно концентрировать электромагнитное поле [1]. Благодаря этому свойству они служат базовыми элементами для фотонных интегральных схем и сверхчувствительных сенсоров [2-3]. Наиболее перспективными материалами для таких резонаторов являются кремний (Si) и германий (Ge). Их преимущество заключается не только в совместимости со стандартной КМОП-технологией, но и в высоком показателе преломления, который обеспечивает сильную локализацию поля. Тем не менее, их оптические характеристики напрямую зависят от качества изготовления: структурные несовершенства или отклонения в геометрии могут свести к минимуму все достоинства. Следовательно, основной задачей для практического внедрения этих устройств становится детальное изучение и управление их ростовыми процессами, что позволит обеспечить высокую воспроизводимость и заданные параметры резонаторов. Поэтому, целью работы является определение влияния ростовых параметров на характеристики кремний-германиевых микрорезонаторов.

Для получения структур с требуемыми морфологическими и кристаллическими характеристиками был выбран метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Данная технология обеспечивает рост в условиях сверхвысокого вакуума, что позволяет получать гетероструктуры с резкими границами и низким уровнем фоновых примесей [4]. На подложку Si(001) с тонким оксидным слоем порядка 1 нм наносился аморфный твёрдый раствор $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с заданным процентным составом. Далее осуществлялся послеростовой отжиг. Регулируя процентный состав $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, толщину твёрдого раствора, температуру отжига и его время можно управлять характеристиками структур [5]. Переход от аморфной фазы к кристаллической отслеживался в реальном времени с помощью дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Этот метод основан на анализе дифракционной картины, возникающей при отражении электронов от кристаллической решетки образца. После создания структуры, образцы исследовались методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в высоком вакууме для построения карты рельефа поверхности и получения геометрических характеристик микро-резонаторов. АСМ-снимки были сделаны в полуконтактном режиме на установке «Solver-HV» с помощью кантилеверов NSG_30SS с радиусом скругления до 2 нм.

Таким образом, в работе методом молекулярно-лучевой эпитаксии на окисленной подложке Si(001) были синтезированы GeSi микрорезонаторы. Анализ образцов осуществлялся методом дифракции быстрых электронов в процессе роста, и методом атомно-силовой микроскопии после синтеза. Определено, что длительный отжиг структуры приводит к коалесценции: островки группируются в более крупные структуры в форме дисков с латеральными размерами в среднем около 450 нм. Увеличение температуры и понижение времени отжига способствует формированию округлых структур с основанием порядка 350 нм и высотой 55 нм с чёткими границами.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 25-12-20004, <https://rscf.ru/project/25-12-20004/>.

Список публикаций:

[1] Dorodnyy A., Smajic J., Leuthold J. // *Laser & Photonics Reviews*. 2023. V. 17. №. 9. P. 2300055.

[2] Jahani S., Jacob Z. // *Nature Nanotechnology*. 2016. V. 11. № 1. P. 23–36.

[3] Aouassa M., Bouabdellaoui M., Pessoa W. B. [et al.] // *ACS Applied Electronic Materials*. 2024. V. 6. № 5. P. 3290–3296.

[4] Dirko V. V., Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P. [et al.] // *Russian Physics Journal*. – 2020. – V. 22. – P. 19318–19325.

[5] Shklyayev A. A. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1461. №. 1. P. 012160.

Формирование строительных единиц в изломах и динамика А и В ступеней на вицинальной поверхности Si(100)-2x1

Эрвье Юрий Юрьевич

Томский государственный университет

E-mail:ervye@mail.tsu.ru

Динамика моноатомных А и В ступеней на реконструированной 2x1 поверхности кремния (100) при эпитаксиальном росте и сублимации определяет доменную структуру и рельеф поверхности, что представляет интерес в плане формирования различных полупроводниковых структур [1]. Наличие реконструкции обуславливает особенности протекания элементарных процессов роста, не учитываемые в стандартных моделях движения ступеней. В частности, существенно, что строительная единица в изломах ступеней на данной поверхности представляет собой два димера кристаллического ряда, отлагаемого изломом при его движении вдоль края ступени [2]. Одиночный атом в изломе в данном случае не может считаться встроившимся в кристалл. Стоянов [3] предложил модель образования димеров в изломах (димерных рядов) вследствие протекания элементарных процессов присоединения адатома к излому, отрыва одиночного атома из излома и диссоциации димера, в результате которой один атом покидает излом, а другой остается в положении одиночного атома в изломе. В работе [3] показано, что формирование двойных ступеней на вицинальной поверхности Si(100)-2x1 может происходить из-за различия кинетических коэффициентов шероховатой В-ступени и относительно гладкой А-ступени. При этом различие в энергиях одиночного атома в изломе и атома в составе димера влияет на значение минимального угла разориентации поверхности (максимального среднего расстояния между краями ступеней) при котором данный эффект существен. Следует отметить, что выражения для кинетических коэффициентов в [3] получены без учета возможности миграции адатомов вдоль края ступени и наличия барьеров Эрлиха-Швёбеля для присоединения адатомов к краю ступени. Кроме того, формулировка краевой задачи поверхностной диффузии в [3] не учитывает различие энергий активации поверхностной диффузии адатомов на А и В террасах [1], различие ширин террас и упругое взаимодействие ступеней. Поэтому полученные в [3] выражения для скоростей перемещения ступеней справедливы лишь в начальный момент эпитаксиального роста. В настоящей работе предлагается общая формулировка краевой задачи поверхностной диффузии, учитывающая указанные особенности формирования димеров в изломах и проводится численное моделирование сближения А и В ступеней. Формулировка краевой задачи включает стационарные уравнения непрерывности для концентраций адатомов кремния на террасах:

$$D_i \frac{d^2 n_i}{dx^2} + F = 0, \quad (1)$$

где x - координата вдоль оси, перпендикулярной краям ступеней, n_i - концентрация адатомов ($i = a, b$, обозначения a и b относятся к А и В-террасам, соответственно), D_i - коэффициент поверхностной диффузии, F - поток адсорбирующихся атомов Si. Краевые условия для уравнений (1) представляют собой уравнения материального баланса потоков атомов, поступающих к краю ступени за счет диффузии, и результирующих потоков атомов, присоединяющихся к краю ступени и отрывающихся от него на исходную террасу. При выводе выражений для результирующих потоков использовался подход, предложенный ранее в работе [4]. В соответствии с [3], полагалось, что излом может находиться в двух неэквивалентных состояниях: с одиночным атомом в изломе и в отсутствии одиночного атома. Учитывалось, что при наличии миграции адатомов вдоль края ступени частоты элементарных актов присоединения, отрыва и диссоциации включают частоты обмена атомов с изломом как с ближайших адсорбционных центров на террасах, так и с ближайших положений адсорбции на крае ступени. Как и в [3], рассматривался рост при слабых отклонениях от равновесия. Это позволило выразить концентрацию адатомов на крае ступени в виде линейной комбинации концентраций адатомов на террасах используя решение линейной краевой задачи диффузии адатомов вдоль края ступени. В результате показано, что краевые условия для уравнения (1) можно представить в “стандартном” виде (обозначения А и В относятся к А и В-ступеням, “+” и “-” обозначают нижнюю и верхнюю террасы):

$$\begin{aligned} D_a \frac{dn_a}{dx} \Big|_{x=0} &= \beta_B^+ (n_a(0) - \tilde{n}_B) + \beta_B^p (n_a(0) - n_b(L_b)), & -D_a \frac{dn_a}{dx} \Big|_{x=L_a} &= \beta_A^- (n_a(L_a) - \tilde{n}_A) + \beta_A^p (n_a(L_a) - n_b(0)), \\ D_b \frac{dn_b}{dx} \Big|_{x=0} &= \beta_A^+ (n_b(0) - \tilde{n}_A) + \beta_A^p (n_b(0) - n_a(L_a)), & -D_b \frac{dn_b}{dx} \Big|_{x=L_b} &= \beta_B^- (n_b(L_b) - \tilde{n}_B) + \beta_B^p (n_b(L_b) - n_a(0)), \end{aligned} \quad (2)$$

где $L_{a,b}$ - ширины А и В террас, $\tilde{n}_{A,B}$ - равновесные концентрации адатомов. Фигурирующие в (2) кинетические коэффициенты ступеней и коэффициенты проницаемости ступеней имеют вид (для краткости не указан тип ступени и рассматривается присоединение с нижней террасы) $\beta^+ = k_{att}^+ p_{inc}$ и $\beta^p = k_{att}^+ k_{att}^- (1 - p_{inc}) / (k_{att}^+ + k_{att}^-)$, соответственно, где k_{att}^\pm - константы скоростей присоединения адатомов к ступени и

$$p_{inc} = \frac{2\theta_k}{2+\kappa} \left(1 + \frac{\kappa\varphi(q, \kappa)}{(2+\kappa)(2\theta_k q \tanh(q) + 1)} \right) + (1-\theta_k)\varphi(q, \kappa)f(q)$$

- вероятность встраивания адатома в ступень. Здесь $\varphi(q, \kappa) = (1 + 2(\theta_k q)^2) / [1 + 2(\theta_k q)^2 + \kappa\theta_k q^2(\theta_k + f(q))]$, где $f(q) = \tanh(q) / [q(2\theta_k q \tanh(q) + 1)]$ - вероятность того, что адатом за счет миграции вдоль края ступени достигнет излома прежде, чем оторвется от края ступени на одну из террас [4]. В приведенных выражениях параметр $q = 1/(2\theta_k \lambda_e)$, где θ_k - концентрация изломов и λ_e - длина миграции адатома вдоль края ступени до отрыва на террасу. Для регулярно расположенных ступеней ($L_a = L_b = L_0$): $\tilde{n}_A = \tilde{n}_B = \exp[-\Delta E / (2k_B T)]$, где $\Delta E = (\Delta E_{dis} + \Delta E_{det})/2$. Здесь ΔE - работа образования адатома на террасе, ΔE_{det} и ΔE_{dis} - глубины потенциальных ям для одиночного атома в изломе и атома в составе димера. Параметр $\kappa = \cosh[(\Delta E - \Delta E_{det}) / (k_B T)] - 1$ отражает различие потенциальных энергий одиночного атома в изломе и атома в составе димера. При одинаковых энергиях $\kappa = 0$. В этом случае выражения для коэффициентов β^+ и β^p совпадают с полученными в [4].

При интенсивной миграции $q \ll 1$ и $f(q) \approx 1$ имеем $p_{inc} \approx 1 / [(2+\kappa)(1+\theta_k)\theta_k q^2 + 1]$. Из данного выражения следует, что в случае непроницаемых [4] ступеней влияние особенностей формирования строительных единиц в изломах существенно лишь при очень больших значениях κ ($\kappa \gg 1/(\theta_k q^2)$). В отсутствие миграции адатомов вдоль края ступени $\theta_k q \gg 1$ и $f(q) \ll \theta_k$. Тогда $p_{inc} = 2\theta_k / (2+\kappa)$ и выражение для кинетического коэффициента соответствует полученному для В-ступени в работе [3]. На рис. 1 представлены результаты численного моделирования движения ступеней, аналогичного проведенному в работах [5,6], но с использованием полученных выражений для кинетических коэффициентов. Как и в [5,6], В-ступень считалась непроницаемой. Для А-ступени при заданном $\Delta E = 0.85$ эВ варьировались значения ΔE_{det} и величины обратного барьера Эрлиха-Швёбеля ΔE^+ (уменьшение ΔE_{det} и увеличение ΔE^+ приводит к увеличению κ и к уменьшению константы скорости k_{att}^+ , соответственно). Очевидно, что необходимость формирования димеров в изломах играет роль эффективного барьера для необратимого встраивания адатомов в ступень, снижающего скорость движения А-ступени и уменьшающего ширину А-террасы. Однако, в отличие от барьера Эрлиха-Швёбеля, увеличение κ слабо влияет на обменный поток атомов между А и В-ступенями, возникающий при уменьшении ширины террасы из-за упругого отталкивания ступеней [5,6]. Поэтому минимальная ширина А-террасы остается значительной при любых κ .

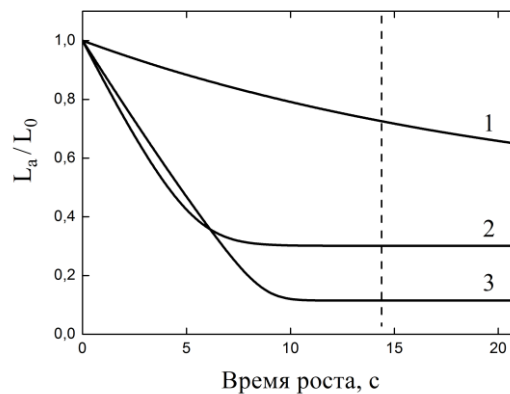


рис.1 Зависимости ширины А-террасы от времени: 1 - $\kappa=0$, $\Delta E^+ = 0$ эВ; 2 - $\kappa=429$, $\Delta E^+ = 0$ эВ;

3 - $\kappa=0$, $\Delta E^+ = 0.2$ эВ. Штриховая линия показывает время роста монослоя

Список публикаций:

- [1] Dabrowski J., Mussig H.-J. / *Silicon Surfaces and Formation of Interfaces: Basic Science in the Industrial World*. - World Scientific, 2000. - 576 p.
- [2] Markov I.V. / *Crystal Growth for Beginners: Fundamentals of Nucleation, Crystal Growth and Epitaxy, second ed.* - World Scientific: Singapore, 2003. - 546 p.
- [3] Stoyanov S. // *Europhys. Lett.* 1990. V. 11. P. 361.

[4] Filimonov S.N., Hervieu Yu.Yu. // *Surf. Sci.* 2004. V. 553. P. 133.

[5] Hervieu Yu.Yu. // *Russ. Phys. J.* 2020. V. 63. N 6. P. 901.

[6] Hervieu Yu.Yu., Yesin M.Yu., Deryabin A.S., Kolesnikov A.V., Nikiforov A.I. // *Modern Electronic Materials.* 2024. V. 10. P. 243.



СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА И ТЕХНОЛОГИИ

АПР 2025
16-18 сентября 2025
Томск, Россия

Разработка аппаратно-программного комплекса контроля технического состояния протяженных объектов при помощи распределенных волоконно-оптических датчиков

Азилханов Рымхан Корганбаевич¹, Нешина Елена Геннадьевна²

¹Томский политехнический университет

²Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова

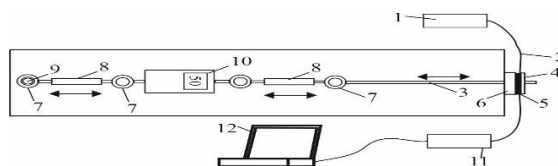
E-mail: alif07972@gmail.com

Развитие современных технологий мониторинга состояния протяжённых объектов (шахтные выработки, тоннели, магистральные трубопроводы, транспортная инфраструктура) требует внедрения интеллектуальных систем диагностики, обеспечивающих высокую надёжность, взрывобезопасность и возможность дистанционного контроля. Традиционные электрические и механические методы обладают рядом ограничений: опасность искрообразования, высокая стоимость сертификации, необходимость регулярного визуального контроля [1].

В качестве альтернативы предлагается использование распределённых волоконно-оптических датчиков (ВОД), функционирование которых основано на передаче световой волны по сердцевине оптического волокна. Это полностью исключает вероятность возникновения искры и обеспечивает взрывобезопасность даже в условиях угольных шахт, опасных по метану и угольной пыли [2].

На базе Карагандинского технического университета разработан аппаратно-программный комплекс, включающий одномодовое оптическое волокно в качестве чувствительного элемента, полупроводниковый лазерный источник, фотоприёмник и систему интеллектуальной обработки сигналов. Программное обеспечение использует методы машинного обучения для выделения изменений пиксельной картины светового пятна, что позволяет идентифицировать деформации с высокой точностью и минимизировать ложные срабатывания. Система реализует многоуровневую систему предупреждений (зелёный, жёлтый и красный сигналы), обеспечивая раннее оповещение о критических изменениях состояния объекта.

Результаты лабораторных испытаний показали линейную зависимость между величиной смещения и оптическими потерями, а также продемонстрировали возможность построения квази-распределённой системы мониторинга с подключением нескольких датчиков одновременно.



1 - источник света, 2 - чувствительный элемент, 3 – натяжная шпилька, 4 – подвижный диск, 5 – демпфер, 6 – неподвижный диск, 7 - соединительное кольцо, 8 - натяжная муфта, 9 - неподвижная опора, 10 - измеритель нагрузки, 11 – телевизионная матрица, 12 - компьютер

Рис.1 Схема проведения эксперимента

На рисунке 1 представлена схема проведения эксперимента с указанием основных элементов волоконно-оптического датчика (ВОД). В качестве источника света (1) использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 650 нм и выходной мощностью 10 мВт. Чувствительным элементом (2) служило одномодовое оптическое волокно типа G652. Для закрепления датчика применялся каркас, установленный на ровной поверхности стола. Нагрузка на оптическое волокно создавалась с помощью вращения двух натяжных муфт (8), между которыми был размещён измеритель нагрузки (10). Волокно фиксировалось между двумя металлическими дисками (4 и 6): диск 4 крепился к подвижной шпильке (3), перемещавшейся в направлении, указанном стрелкой. Между дисками располагался эластичный демпфер (5), обеспечивающий возврат системы в исходное положение после снятия нагрузки и защищающий волокно от повреждений. Шпилька (3) с резьбой М6 служила для соединения дисков и демпфера в единый узел. Соединительное кольцо (7) одной из натяжных муфт фиксировалось на неподвижной опоре (9), обеспечивая необходимое натяжение. Световой сигнал от лазера (1) проходил через оптическое волокно (2) и попадал на поверхность телевизионной матрицы, размещённой в блоке предварительной обработки данных (11), связанного с компьютером (12). На мониторе компьютера отображались окна программного обеспечения для анализа результатов измерений. Эксперименты проводились при комнатной температуре (22 °С).

Проведённые лабораторные исследования подтвердили работоспособность и высокую чувствительность аппаратно-программного комплекса, что доказывает его эффективность при контроле технического состояния протяжённых объектов различного назначения. Система может применяться как в горнодобывающей отрасли (для мониторинга кровли шахтных выработок и тоннелей), так и в других областях — при контроле состояния магистральных трубопроводов, мостовых сооружений, линий электропередачи и транспортной инфраструктуры. Таким образом, разработанный аппаратно-программный комплекс обладает следующими ключевыми преимуществами:

- Непрерывный дистанционный контроль состояния объектов. Система обеспечивает круглосуточный

мониторинг с возможностью передачи данных в режиме реального времени, что исключает необходимость постоянного присутствия обслуживающего персонала и позволяет оперативно реагировать на критические изменения.

– Взрывобезопасность и надёжность работы. Применение распределённых волоконно-оптических датчиков полностью исключает использование электрического тока в зоне измерений, что делает комплекс безопасным для эксплуатации в шахтах, тоннелях и других потенциально взрывоопасных средах.

– Экономическая эффективность. Внедрение системы снижает затраты на регулярные инспекционные обходы и визуальные проверки, минимизирует вероятность аварийных ситуаций и последующих затрат на устранение их последствий. При этом долговечность оптического волокна позволяет сократить расходы на обслуживание и замену датчиков.

– Повышение уровня промышленной безопасности. Интеллектуальные алгоритмы обработки данных и многоуровневая система предупреждений (индикаторы зелёного, жёлтого и красного уровня) позволяют своевременно обнаруживать начало деформационных процессов и предотвращать аварии, что существенно снижает риск угрозы для жизни и здоровья персонала.

В перспективе планируется дальнейшее развитие комплекса, включающее:

– масштабирование системы для работы с большим количеством каналов и протяжёнными объектами длиной в десятки километров;

– интеграцию с цифровыми платформами промышленной безопасности и системами предиктивной аналитики для создания «умных» производственных комплексов;

– проведение опытно-промышленных испытаний на реальных объектах, включая шахты Карагандинского угольного бассейна, трубопроводные системы и транспортные сооружения;

– разработку мобильных модификаций системы для применения в аварийно-спасательных и мониторинговых службах.

Таким образом, созданный аппаратно-программный комплекс представляет собой современное, надёжное и перспективное решение, способное обеспечить безопасную и экономичную эксплуатацию протяжённых объектов в условиях высоких рисков и динамических нагрузок.

Список публикаций:

[1] Yurchenko A.V., Mekhtiyev A. D., Bulatbaev F.N., Neshina E.G., Al'kina A.D.// The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Workings. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. Vol. 54. №7. P.528–533.

[2] Мехтиев А.Д., Юрченко А.В., Ожигин С.Г., Нешина Е.Г., Алькина А.Д. Разработка квазираспределенной системы мониторинга горного давления на свод выработки с использованием оптических волокон. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. №2. С. 192-198 DOI: 10.15372/FTPRPI20210219

Настольная климатическая камера

Андрияхин Илья Константинович

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: shecot2@mail.ru

Климатические камеры [1] являются примером основного оборудования исследовательских лабораторий и научных центров, специализирующихся как на изучении свойств материалов, так и на разработке измерительных устройств. С их помощью возможно проводить лабораторное моделирование различных климатических условий, таких как температура и влажность, с целью изучения воздействия этих параметров на различные объекты. Камеры тепла-холода-влаги являются самыми распространенными на рынке, что связано с универсальностью таких климатических камер. В них можно испытывать не только печатные платы с электрическими схемами, но и разнообразные материалы на устойчивость к высоким/низким температурам, металлоконструкции на устойчивость к коррозии. На рынке Российской Федерации не представлены малогабаритные настольные климатические камеры тепла-холода-влаги российского производства.

Цель работы заключается в разработке настольной климатической камеры с возможностью повышения/понижения температуры и влажности.

Для осуществления данной цели были решены следующие задачи: управление климатической камерой реализовано с помощью микроконтроллера, отображение параметров отображается на дисплее. Объем полезного пространства климатической камеры составляет 6 литров. На текущий момент в климатической камере реализованы функции повышения температуры и понижения влажности.

На рис. 1 приведен разработанный макет корпуса настольной климатической камеры.



рис. 1 настольная климатическая камера

Пробные промежуточные испытания камеры были проведены с помощью терморезистора с отрицательным ТКС, он был помещен в климатическую камеру и включен режим нагрева. На рис. 2 представлен график зависимости сопротивления термистора от температуры в объеме камере.

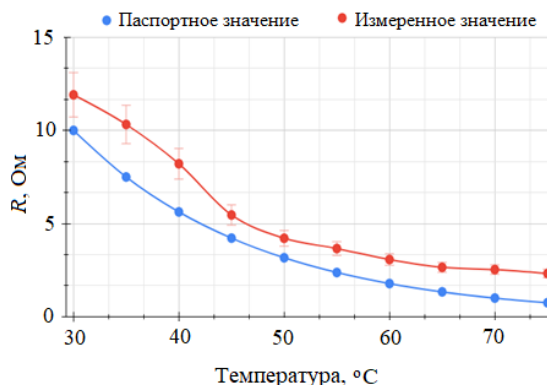


рис. 2 график зависимости сопротивления термистора от температуры

Результаты испытаний показали сходство зависимости сопротивления от температуры с информацией с документации. Различие можно объяснить тем, что произошло старение терморезистора из-за условий хранения. Список публикаций:

[1] Климатические камеры для испытаний (тепло-холод-влага) [Электронный ресурс]: URL: <https://vilitek.ru/products/klimaticheskie-ispytatelnye-kamery/klimaticheskie-kamery-dlya-ispytaniy/> (дата обращения: 07.07.2025)

Программно-аппаратный комплекс LabView-NI ELVIS II+ для измерения характеристик и параметров полевых транзисторов

Жуков Андрей Александрович

Седов Никита Сергеевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: gyk@mail.tsu.ru

Полевые транзисторы являются ключевыми элементами современной электроники. Они широко применяются в усилительных схемах, цифровых устройствах и системах управления. Изучение их вольтамперных (ВАХ) характеристик необходимо для понимания принципов работы полупроводниковых приборов и проектирования электронных устройств, а также оценки ключевых параметров транзисторов, определяющих их поведение в электронных схемах.

В лабораторных практикумах по радиотехническим дисциплинам, изучаемым на радиофизическом факультете ТГУ [1-3], используется измерительное оборудование компании National Instruments, в частности комплекты измерительных приборов NI Elvis II+ [4] и NI Elvis III [5]. Однако приборы, входящие в состав этих комплектов позволяют измерять вольтамперные характеристики только биполярных транзисторов.

Авторами на базе системы программирования LabVIEW [6] и комплектов измерительных приборов NI Elvis II+ разработан программно-аппаратный комплекс для измерения выходных и передаточных характеристики полевых транзисторов и определения их основных параметров.

Комплекс позволяет измерять характеристики полевых и определять основные параметры как полевых транзисторов с управляющим р-п переходом, так и МОП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналом. Комплекс измеряет характеристики и параметры п- и р-канальных транзисторов

Схема комплекса представлена на рисунке 1. Она состоит из: реле K1 для переключения полярности напряжения, резистора Rs для измерения силы тока и соединительных линий для подключения к измерительным шинам комплекта приборов NI Elvis II+ и полевому транзистору.

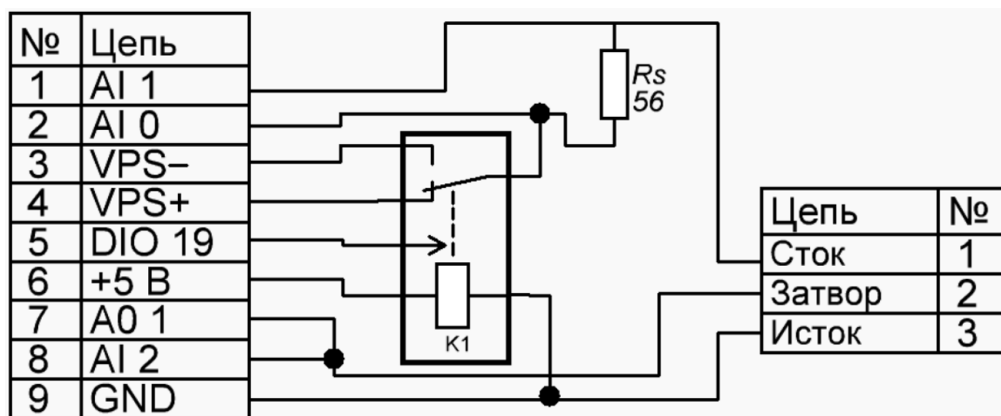


Рис.1 Схема измерительного комплекса

В схеме комплекса используются определенный набор линий комплекта NI Elvis II+, а именно входные аналоговые линии AI0, AI1 и AI2 для определения уровня напряжений в контрольных точках измерительной схемы, выходная аналоговая линия AO1 для подачи напряжения на затвор, линии цифрового вывода DIO19 для управления работой реле, выводы VPS+ и VPS- регулируемых источников для подачи питающего напряжения для измерительной схемы, линии заземления GND, а также линии напряжения +5В для питания электромеханического реле K1.

Управление работой измерительного комплекса реализовано в виде программы (виртуального прибора (ВП)) в системе программирования LabVIEW 2012. Лицевая панель разработанного ВП приведена на рисунке 2.

На лицевой панели виртуального прибора размещены индикаторы и элементы управления работой программы: окно выбора комплекта NI ELVIS II+, подключенного к измерительному комплексу, окно «Rs, Ом» задания величины сопротивления резистора Rs, меню «Тип ПТ и тип ВАХ» выбора типа полевого транзистора и типа измеряемой характеристики, кнопок START и STOP для запуска и остановки процесса измерений, окон ввода значений напряжений, блока «Текущие значения» для отображения измеряемых напряжений и токов в реальном времени, графических окон для отображения текущих и итоговых результатов измерений, легенды семейства характеристик, область для отображения вычисленных по измеренной характеристике параметров полевого транзистора.

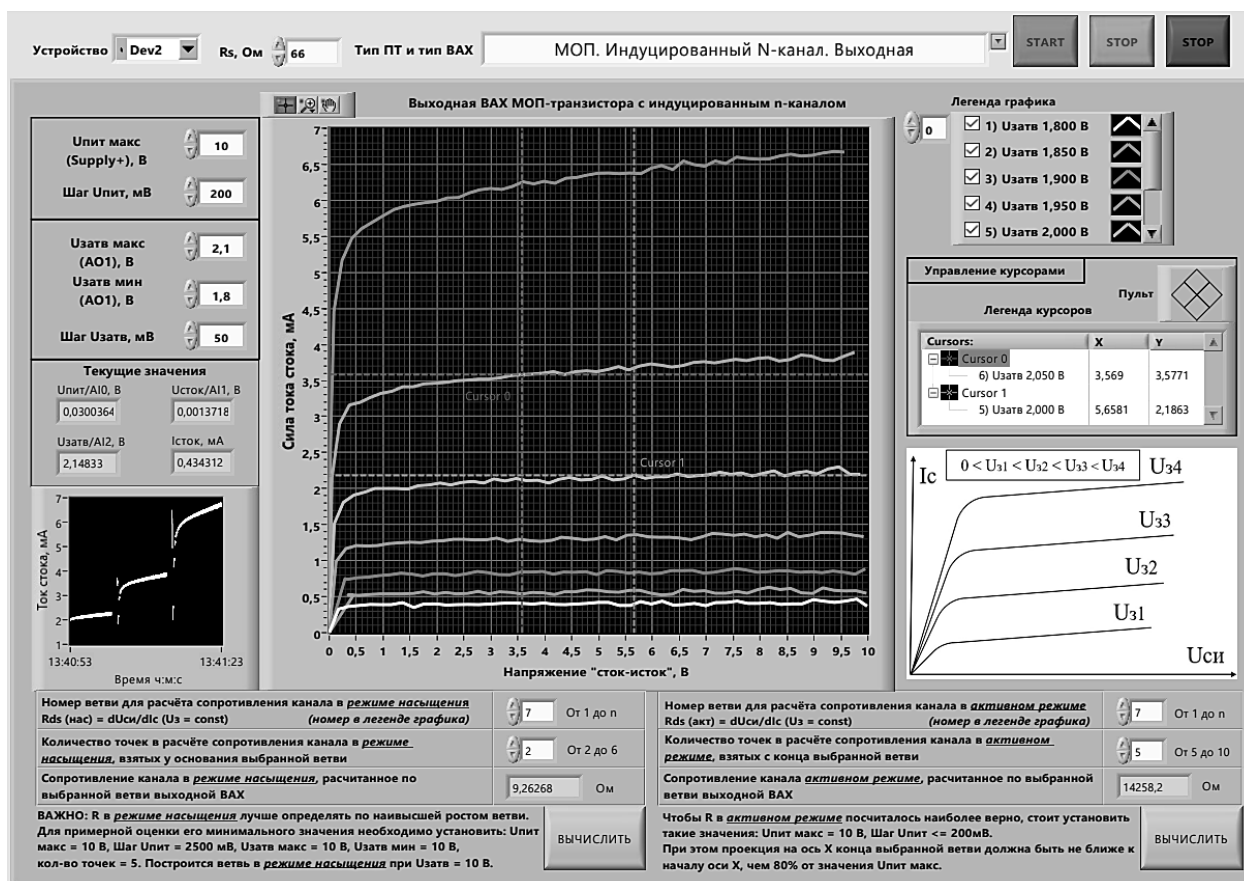


Рис.2 Лицевая панель ВП для измерения характеристик и параметров полевых транзисторов

Блок-диаграмма созданного ВП включает набор функциональных узлов: структуры событий Events для фиксации типа транзистора и вида вольтамперной характеристики, цикла While, структуры выбора Case и подприборов (подВП) для определения параметров транзисторов по измеренным ВАХ.

Разработанный измерительный комплекс реализован в виде печатной платы, подключаемой к комплекту приборов NI ELVIS II+. Печатная плата подготовлена в онлайн платформе EasyEDA [7].

Для эффективного использования разработанного измерительного комплекса в лабораторном практикуме разработан электронный учебный ресурс в среде электронного обучения iDO TГУ (Moodle), объединяющий в себе подробное описание комплекса, методические указания и варианты заданий для студентов. Также подготовлена инструкция для студентов по использованию программно-аппаратного комплекса для измерения ВАХ полевых транзисторов.

Опыт использования измерительного комплекса в лабораторных практикумах показывает, что он позволяет автоматизировать процесс измерения, повысить точность результатов и сократить время, затрачиваемое на проведение лабораторных работ. Это способствует развитию компетенций студентов в области анализа и проектирования электронных схем. Внедрение подобных комплексов в учебный процесс способствует повышению качества подготовки специалистов в области электроники.

Список публикаций:

- [1] Доценко О.А., Жуков А.А. // Методические, технологические и организационные аспекты электронного обучения: сб. ст. по результатам науч.-метод. конф. Томск: НИИ ТГУ, 2022. С. 8–13.
- [2] Zhukov A.A., Dotsenko O.A., Kochetkova T.D., Novikov S.S., Pavlova A.A. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings. - 2015. - С. 7147045.
- [3] Жабин О.С., Василенко Р.А., Маленко Г.И. и др. // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Тринадцатой Международной конференции. - Томск: ТГУ, 2020. - С. 39–40.
- [4] NI ELVIS II – Руководство пользователя. – URL: <https://nitech.nstu.ru/upload/lib/NI%20ELVIS%20II%20User%20Manual.pdf> (дата обращения 05.06.2025).
- [5] About the NI ELVIS III // Официальный сайт National Instrument ni.com. – URL: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-elvis-iii-feature/page/about-ni-elvis-iii.html> (дата обращения 05.06.2025).
- [6] Жуков А.А. Система программирования LabVIEW. Основы работы: Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во СТТ, 2020. – 150 с.
- [7] EasyEDA. Электронный ресурс. – URL: <https://easyeda.com> (дата обращения 05.06.2025).

Программно-аппаратный комплекс LabVIEW-NI ELVIS для работы с регулируемыми источниками напряжения и тока

Жуков Андрей Александрович

Духанов Александр Сергеевич

Черкашин Михаил Анатольевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: gyk@mail.tsu.ru

Изучение регулируемых источников напряжения и тока является важным этапом в подготовке специалистов в области электроники. Знание принципов работы, умение проектировать и использовать такие источники позволяет решать широкий круг задач, связанных с разработкой, тестированием и оптимизацией электронных устройств. Использование современных программно-аппаратных комплексов и систем программирования позволяет автоматизировать процесс разработки электронных устройств и значительно повысить эффективность их работы.

На радиофизическом факультете ТГУ в течении ряда лет в лабораторных практикумах по радиотехническим дисциплинам [1-3] используются комплекты измерительных приборов NI Elvis II+ [4] и NI Elvis III [5]. В состав этих комплектов входят и регулируемые источники напряжения. Эти источники позволяют регулировать напряжение в небольшом диапазоне значений от 0 до ± 12 В (NI Elvis II+) и от 0 до ± 15 В (NI Elvis III). Однако в составе NI Elvis II+ и NI Elvis III нет регулируемых источников тока.

Авторами на базе системы программирования LabVIEW [6] и комплектов измерительных приборов NI Elvis II+ разработаны программно-аппаратные комплексы для управления работой регулируемых источников напряжения и тока.

Источник регулируемого напряжения реализован на ИС LM1875 [7], включенной по схеме неинвертирующего усилителя. Напряжение, подаваемое на вход этой ИС, регулируется с помощью цифрового потенциометра X9C103 [8]. Программно-аппаратный комплекс подключается к источнику напряжения 9В из которого с помощью DC-DC преобразователей LM7805 [9] и XL6009 [10] получаются напряжения 5В и 34В для питания ИС X9C103 и LM1875 соответственно. Управление цифровым потенциометром X9C103 осуществляется с помощью цифровых линий DIO0 и DIO1 комплекта NI Elvis II+. Использование цифрового потенциометра X9C103 позволяет в программном режиме изменять напряжение на выходе схемы от 0В до 30В. Лицевая панель и блок-диаграмма виртуального прибора (ВП), регулирующего напряжение на выходе схемы, приведены на рисунке 1.

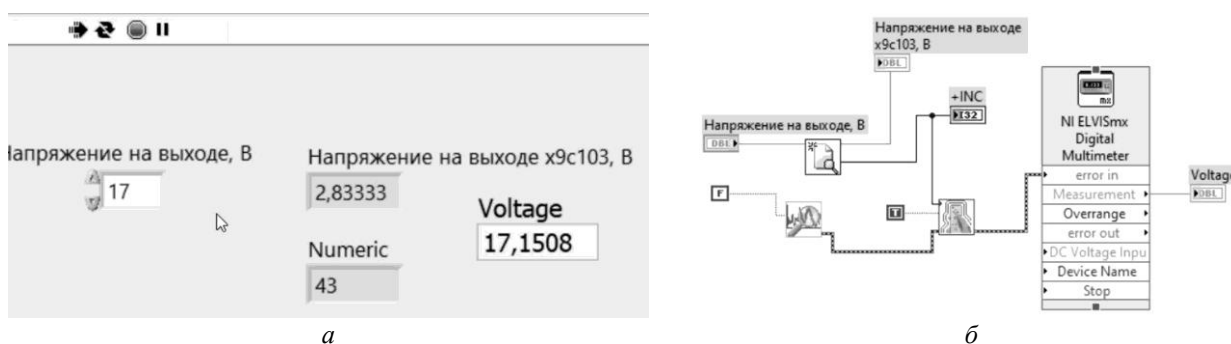


Рис.1 Лицевая панель (а) и блок-диаграмма (б) ВП, регулирующего напряжение на выходе схемы

На лицевой панели ВП пользователь задает требуемое выходное напряжение источника, а программа определяет необходимое напряжение на выходе цифрового потенциометра и измеряет напряжение на выходе схемы. Блок-диаграмма ВП содержит подприборы для работы с цифровым потенциометром X9C103 и экспресс-прибор «NI ELVISmx Digital Multimeter» для измерения напряжения на выходе схемы.

Разработанный измерительный комплекс реализован в виде печатной платы, подключаемой к комплекту приборов NI ELVIS II+. Печатная плата подготовлена в онлайн платформе EasyEDA [11].

Регулируемый источник тока реализован на основе ИС усилителя мощности TDA2030 [12]. Программное управление таким источником осуществляется также с помощью цифрового потенциометра X9C103, подключенного ко входу ИС TDA2030. Управление работой источника тока осуществляется с помощью комплекта приборов NI ELVIS II+. Программно-аппаратный комплекс подключается к источнику напряжения, из которого с помощью DC-DC преобразователя LM7805 получается напряжение 5В для питания ИС X9C103. Управление цифровым потенциометром X9C103 осуществляется с помощью цифровых линий DIO0 и DIO1 комплекта NI Elvis II+.

Лицевая панель и блок-диаграмма виртуального прибора (ВП), регулирующего величину тока на выходе схемы, приведены на рисунке 2.

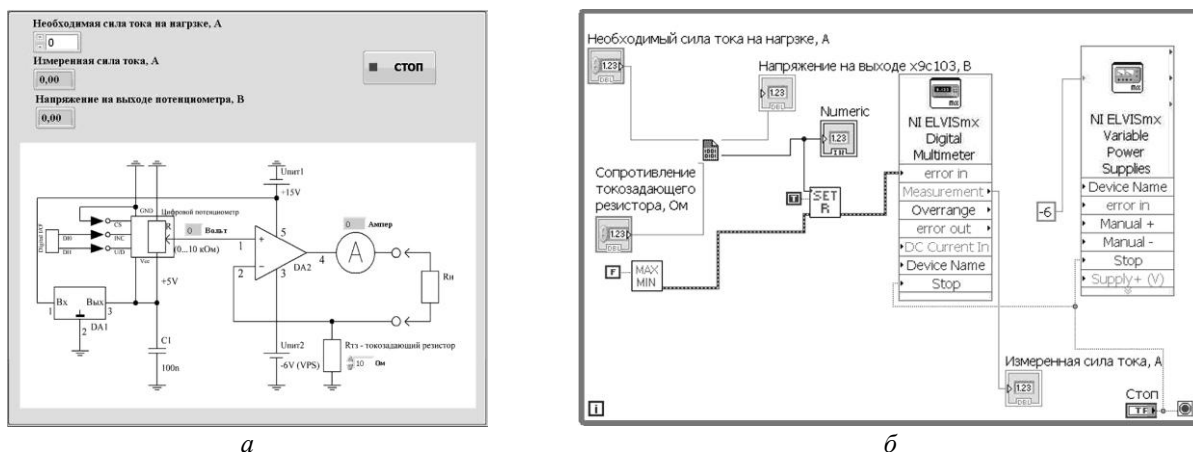


Рис.1 Лицевая панель (а) и блок-диаграмма (б) ВП, регулирующего ток на выходе схемы

На лицевой панели ВП пользователь задает необходимую величину выходного тока, а программа определяет необходимое напряжение на выходе цифрового потенциометра, измеряет напряжение на токозадающем резисторе и определяет величину выходного тока как отношение измеренного напряжения к сопротивлению этого резистора. Блок-диаграмма ВП содержит подприборы для работы с цифровым потенциометром X9C103 и экспресс-приборы: «NI ELVISmx Digital Multimeter» для измерения напряжения на выходе потенциометра и «NI ELVISmx Variable Power Supplies» для задания отрицательного напряжения для ИС TDA2030.

Разработанный измерительный комплекс также реализован в виде печатной платы, подключаемой к комплекту приборов NI ELVIS II+. Печатная плата подготовлена в онлайн платформе EasyEDA. На плате предусмотрена возможность подключения различных токозадающих резисторов и сопротивлений нагрузки.

Рассмотренные программно-аппаратные комплексы значительно упрощают процесс управления источниками тока и напряжения, делая их более гибкими и точными, а также позволяют существенно расширить возможности комплекта приборов NI ELVIS II+ при проведении лабораторных практикумов по радиоэлектронике, аналоговой схемотехнике и другим дисциплинам.

Список публикаций:

- [1] Доценко О.А., Жуков А.А. // Методические, технологические и организационные аспекты электронного обучения: сб. ст. по результатам науч.-метод. конф. Томск: НИИ ТГУ, 2022. С. 8–13.
- [2] Zhukov A.A., Dotsenko O.A., Kochetkova T.D., Novikov S.S., Pavlova A.A. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings. - 2015. - С. 7147045.
- [3] Жабин О.С., Василенко Р.А., Маленко Г.И. и др. // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Тринадцатой Международной конференции. - Томск: ТГУ, 2020. - С. 39–40.
- [4] NI ELVIS II – Руководство пользователя. – URL: <https://nitec.nstu.ru/upload/lib/NI%20ELVIS%20II%20User%20Manual.pdf> (дата обращения 05.06.2025).
- [5] About the NI ELVIS III // Официальный сайт National Instrument ni.com. – URL: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-elvis-iii-feature/page/about-ni-elvis-iii.html> (дата обращения 05.06.2025).
- [6] Жуков А.А. Система программирования LabVIEW. Основы работы: Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во СТТ, 2020. – 150 с.
- [7] Datasheet LM7805. – URL: <https://ece-classes.usc.edu/ee459/library/datasheets/LM7805.pdf> (дата обращения 01.06.2025).
- [8] Datasheet LM1875. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/150/DOC000150745.pdf> (дата обращения 10.06.2025).
- [9] Datasheet X9C103. – URL: <https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/ef-X9C104PIZ.pdf> (дата обращения 10.06.2025).
- [10] Datasheet XL6009. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/977/DOC002977102.pdf> (дата обращения 10.06.2025).
- [11] EasyEDA. Электронный ресурс. – URL: <https://easyeda.com> (дата обращения 05.06.2025).
- [12] Datasheet TDA2030. – URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00000129.pdf> (дата обращения 10.06.2025).

Метрологическое обеспечение единицы относительной влажности в Республике Казахстан

Жумагали Асылбек Кайратулы
Томский политехнический университет
wap.aseke.kz@mail.ru

В статье представлен анализ текущего состояния метрологического обеспечения измерений влажности газа в Республике Казахстан. Обозначена проблема отсутствия государственного первичного эталона единицы объемной доли влаги, а также риски, связанные с существующей системой прослеживаемости. Предложены пути решения, включая разработку национального первичного эталона влажности газа на базе существующего оборудования РГП «КазСтандарт».

Ключевые слова: эталоны, измерения, системы контроля, метрологические характеристики.

Актуальность

Измерение влажности газа является критически важным параметром в различных отраслях: от энергетики и нефтегазового сектора до фармацевтики и высокоточных технологических производств. В Республике Казахстан функционируют государственные эталоны относительной влажности и температуры точки росы/иней, однако в настоящее время отсутствует государственный эталон единицы объемной доли влаги. Это приводит к необходимости регулярной калибровки эталонных установок в зарубежных Национальных Метрологических Институтах (НМИ), что обуславливает финансовую и техническую зависимость, а также потенциальные риски утраты прослеживаемости. Учитывая данные вызовы, разработка собственного первичного эталона влажности газа является стратегически значимой задачей.

Анализ ситуации

В целях обеспечения единства измерений влажности газа в Республике Казахстан были введены в эксплуатацию следующие государственные эталоны:

- Государственный эталон единицы относительной влажности (рег. № KZ.01.01.00033–2007);
- Государственный эталон температуры точки росы/иней (рег. № KZ.01.01.00062–2017).

Оба эталона представляют собой калибровочные системы, функционирующие по вторичным методикам, не реализующим фундаментальные принципы воспроизведения единицы. Более того, разграничение между единицами относительной влажности и температуры точки росы увеличивает риск отсутствия внутренней метрологической согласованности между системами.

В рамках анализа были изучены эталонные установки, используемые в калибровочных и поверочных лабораториях страны. Установлено, что метрологические характеристики лабораторных установок по точности и диапазону не уступают характеристикам существующих государственных эталонов, что снижает эффективность национальной эталонной системы.

Международный опыт и подходы к формированию эталонов влажности

Анализ международной практики показывает, что ведущие НМИ, такие как NIST (США) [1-2], PTB (Германия) [3], LNE-CNAM (Франция) [4], VNIIFTRI (Россия) [5], применяют первичные генераторы влажного газа, основанные на принципах фазового равновесия и многоступенчатого регулирования температуры. Такие установки обеспечивают воспроизведение единицы с высокой точностью в широком диапазоне температур и концентраций влаги.

Ключевыми особенностями международных эталонов являются:

- автоматизированное управление параметрами (температура, давление, поток),
- применение специализированного программного обеспечения для расчёта термодинамических величин,
- наличие модулей самообслуживания и самодиагностики для повышения стабильности воспроизведения.

Создание аналогичного подхода в Республике Казахстан обеспечит эквивалентность национальных решений международным и позволит РГП «КазСтандарт» участвовать в ключевых сличениях CIPM и COOMET на правах равноправного партнёра.

Теоретические аспекты и выбор конструкции эталона

Разработка эталона базируется на фундаментальных принципах термодинамики влажного воздуха, в частности — фазовом равновесии между паром и жидкой фазой. Точность воспроизведения температуры точки росы напрямую зависит от стабильности термостатирования и равномерности насыщения воздушного потока.

Конструкция насытителя разработана с учётом:

- минимизации тепловых потерь;
- создания ламинарного потока воздуха;
- увеличения длины пути насыщения.

Использование перегородок внутри насытителя обеспечивает более полное насыщение и снижает отклонения от заданных параметров. Камера калибровки, где размещаются средства измерений, выполнена с учетом изоляции от внешних колебаний температуры и давления.

Метод воспроизведения

В качестве принципа действия эталона выбран метод фазового равновесия или однонапорного давления (1-Р) с двухтемпературным режимом (2-Т), широко применяемый в международной практике [6-8].

На базе имеющегося оборудования РГП «КазСтандарт» была собрана установка генератора влажного газа,

включающая:

- эталонные платиновые термометры сопротивления (Fluke 5699S, ЭТС-100),
- барометр БОП-1М,
- жидкостные термостаты (Fluke 7841, Neslab RTE 17),
- разработанный насытитель и калибровочную камеру.

Насытитель и камера являются ключевыми элементами установки: в насытителе осуществляется воспроизведение температуры точки росы/иней, а в камере — воспроизведение и контроль относительной влажности, необходимой для поверки и калибровки термогигрометров.

Принцип работы установки

- Сжатый воздух поступает от компрессора в осушитель.
- Осушенный поток направляется в генератор влажного газа, где формируется заданная температура точки росы.
- Температура точки росы синхронизируется с температурой термостата для обеспечения термодинамического равновесия и предотвращения конденсации в трубопроводах.
- Скорость потока регулируется вентилем на выходе.
- Влажный воздух направляется в насытитель, где насыщается при контакте с поверхностью воды/льда.
- Далее он поступает в камеру через теплообменник, где достигает второй заданной температуры и используется для калибровки гигрометров относительной влажности.

В данном генераторе влажного газа единица объемной доли влаги будет определяться [9-10] по формуле:

$$x_v = \frac{e(t_n) \times f(P_n, t_n)}{P_n} \quad (1)$$

где t_n - температура насыщения и P_n - абсолютное давление в насытителе, $e(t_n)$ - давление насыщенного пара при t_n , а $f(P_n, t_n)$ - коэффициент эффективности водяного пара при t_n и P_n .

Заключение

Разработка национального первичного эталона влажности газа, основанного на методе фазового равновесия и реализующего единицы относительной влажности, температуры точки росы/иней и объемной доли влаги, представляет собой значительный шаг в укреплении метрологической инфраструктуры Республики Казахстан.

На текущий момент собрана и испытана часть эталонной установки — генератор влажного газа 1-Р/1-Т, включая оригинально разработанный насытитель, конструкция которого защищена патентом на полезную модель №9626 от 04.10.2024 [11].

В целях подтверждения калибровочных и измерительных возможностей эталон участвовал в региональном ключевом сличении СООМЕТ.Т-К6.1 [12], по результатам которого была подтверждена эквивалентность полученных данных. Согласно предварительной оценке, расширенная неопределённость разработанного эталона составляет $\pm 0,14$ °C в диапазоне от -50 °C до $+20$ °C.

Список публикаций:

- [1] Meyer C. W. et al. Performance and validation tests on the NIST hybrid humidity generator //International journal of thermophysics. – 2008. – Т. 29. – С. 1606-1614.
- [2] Meyer C. W. et al. Design and performance of the new NIST hybrid humidity generator //NCSLI Measure. – 2009. – Т. 4. – №. 2. – С. 28-36.
- [3] Mackrodt P. A new attempt on a coulometric trace humidity generator //International Journal of Thermophysics. – 2012. – Т. 33. – С. 1520-1535.
- [4] Berg R. F., Chiodo N., Georgin E. Silicone tube humidity generator //Atmospheric Measurement Techniques. – 2022. – Т. 15. – №. 3. – С. 819-832.
- [5] Dubovikov N. I. et al. The Russian national standard of gases humidity and traceability system of humidity measurements //International Journal of Thermophysics. – 2016. – Т. 37. – С. 1-12.
- [6] Sairanen H. et al. Low-pressure and low-temperature dew/frost-point generator //International Journal of Thermophysics. – 2018. – Т. 39. – №. 9. – С. 104.
- [7] Oğuz Aytekin S. et al. A New Primary Dew-Point Generator at TUBITAK UME //International Journal of Thermophysics. – 2018. – Т. 39. – С. 1-13.
- [8] Sestan D., Zvizdic D., Sariri K. New Submersed Chamber for Calibration of Relative Humidity Instruments at HMI/FSB-LPM //International Journal of Thermophysics. – 2018. – Т. 39. – С. 1-8.
- [9] Heinonen M. Uncertainty in humidity measurements //EUROMET Workshop P. – 2006. – Т. 758. – С. 2006.
- [10] Nielsen J. et al. Uncertainty in the generation of humidity //Measurement. – 2003. – С. 1-33.
- [11] Патент на полезную модель KZ 9626. Насытитель. Заявитель: Жумагали А.К.; опубл. 04.10.2024. Бюл. №40
- [12] Zhumagali A. K., Vinge M. A. Bilateral key comparisons of dew point temperature standards of national metrological institutes //Metrologia. – 2025. – Т. 62. – №. 1A. – С. 03002.

Гидрологический зонд для удаленного мониторинга электрофизических параметров водоемов

Казанин Владислав Александрович

Южаков Михаил Сергеевич, Берзин Артем Константинович, Бадьин Александр Владимирович,

Кулешов Григорий Евгеньевич

Томский государственный университет

E-mail: vladislav.kazanin.00@yandex.ru

Ухудшение состояния водных ресурсов вследствие антропогенного воздействия и климатических изменений требует разработки современных методов мониторинга. Традиционные подходы, основанные на периодическом сборе проб, не обеспечивают оперативности и полноты данных, необходимых для принятия управленческих решений. Особую сложность представляет мониторинг удаленных или труднодоступных водоемов, где регулярный отбор проб силами персонала экономически нецелесообразен или физически затруднителен. В последние годы технологии Интернета вещей (IoT) и беспроводной передачи данных, такие как LoRaWAN, активно применяются для создания автономных систем мониторинга окружающей среды [1]. В данной работе представлен гидрологический зонд, разработанный для непрерывного контроля ключевых параметров водоемов — pH, температуры и общего содержания растворенных веществ (TDS).

Зонд построен на базе микроконтроллера ATmega328p, обеспечивающего управление датчиками и обработку данных. В сферическом корпусе диаметром 20 см из ABS пластика с четырьмя отверстиями размещены датчики pH для измерения кислотности в диапазоне 0–14 с точностью ± 0.1 , TDS для определения содержания растворенных веществ от 0 до 1000 ppm с точностью $\pm 2\%$ и температуры DS18B20 для контроля температуры в диапазоне от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ с точностью $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Конструкция корпуса с отверстиями обеспечивает свободный доступ воды к сенсорам при сохранении их защиты от механических повреждений и крупного мусора. Для передачи данных используется модуль LoRa E19 868M20S, работающий на частоте 868 МГц с дальностью до 5 км в условиях прямой видимости. Энергоснабжение осуществляется двумя аккумуляторами 18650 общей емкостью 5200 мА·ч, дополненными солнечной панелью мощностью 5 Вт. Программное обеспечение разработано в среде Arduino IDE на языке C++ с использованием библиотек для работы с LoRa и датчиками. Калибровка датчиков проводилась в лабораторных условиях с применением стандартных растворов (pH 4.0, 7.0, 10.0; TDS 500 ppm). Тестирование системы проводилось в контролируемых условиях для оценки стабильности работы и передачи данных.

Лабораторные тесты зонда подтвердили его работоспособность и стабильность. Датчики показали ожидаемые характеристики для измерения pH, TDS и температуры. Передача данных на базовую станцию осуществлялась с частотой 1 пакет/10 минут, процент потери пакетов не превышал 2%. Была также подтверждена устойчивость передачи данных при слабом уровне сигнала и в условиях легких помех, характерных для прибрежных зон. Солнечная панель обеспечивала подзарядку аккумуляторов, поддерживая автономность устройства при средней освещенности 4 часа/сутки. Данные успешно передавались на сервер и отображались через веб-интерфейс, демонстрируя потенциал для мониторинга в реальном времени.

Разработанный зонд выгодно отличается от аналогов благодаря сочетанию автономности, энергоэффективности и применения технологии LoRaWAN, которая превосходит традиционные GSM-модули по дальности и энергопотреблению [2]. Использование солнечной энергии снижает эксплуатационные расходы и экологический след устройства. Сравнительный анализ с коммерческими системами, такими как YSI EXO, показывает, что предложенный зонд обладает конкурентоспособной точностью при значительно меньшей стоимости. Простота конструкции и использование открытого ПО (Arduino) также снижают порог входа для воспроизведения и адаптации решения под специфические задачи. Среди перспектив развития — интеграция датчиков растворенного кислорода и мутности, а также разработка алгоритмов машинного обучения для прогнозирования изменений параметров воды.

Гидрологический зонд представляет собой надежное и экономически эффективное решение для удаленного мониторинга водоемов. Низкая стоимость развертывания и эксплуатации делает решение привлекательным для широкого круга пользователей, включая муниципальные службы, научные группы и эко-активистов. Его внедрение может способствовать своевременному выявлению загрязнений, улучшению управления водными ресурсами и поддержанию экологического баланса. Перспективы дальнейших исследований включают масштабирование системы для мониторинга сети водоемов и интеграцию с глобальными платформами экологических данных.

Список публикаций:

[1] Костин В.Е., Хлобжева И.Н., Соколова Н.А. и др. // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». 2022. № 2. С. 1–11.

[2] Капанский А.А. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 52–55.

Разработка и обучение нейросетевой модели для семантической сегментации данных в терагерцовой дефектоскопии

Пидотова Диана Андреевна,

Бердюгин Александр Игоревич, Перевалов Александр Вячеславович, Берзин Артём Константинович,

Бадьин Александр Владимирович, Дорожкин Кирилл Валерьевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: thzlab@mail.ru

В работе представлены результаты разработки и обучения нейросетевой модели для автоматического обнаружения и локализации дефектов на терагерцовых снимках элементов корпусных изделий [1,2]. Семантическая сегментация представляет собой задачу компьютерного зрения [3], в которой каждому пикселю изображения присваивается определенный класс. Для задачи обнаружения дефектов на терагерцовых снимках [4] семантическая сегментация была выбрана ввиду возможности точной локализации дефектов, что позволяет не только обнаружить наличие дефекта, но и точно определить его форму, размер и положение на снимке. Данный подход также обеспечивает возможность классификации различных типов дефектов. Применение семантической сегментации [5,6] в данной задаче обеспечивает возможность количественной оценки дефектов, включая измерение их площади, периметра и других геометрических характеристик. Это особенно важно для последующего анализа и принятия решений о пригодности изделий. Разработанная модель основана на специализированной архитектуре, адаптированной для задачи сегментации дефектов на терагерцовых снимках, которые могут иметь различные размеры в зависимости от параметров сканирования и размеров исследуемых деталей. Основным строительным блоком модели является MBConv (Mobile Inverted Bottleneck Convolution). В отличие от классических архитектур типа U-Net, предложенная модель не использует операции понижения и повышения разрешения, что позволяет сохранить детали на всех этапах обработки. Это особенно важно для точной локализации границ дефектов, которые могут иметь сложную форму и небольшие размеры. В качестве функции потерь в разработанной модели используется взвешенная кросс-энтропия.

Оценка качества сегментации проводилась с использованием метрики IoU (Intersection over Union), также называемой коэффициентом Жаккара. Эта метрика измеряет степень перекрытия между предсказанной и истинной масками сегментации. В реализации используется Mean IoU, которая вычисляет среднее значение IoU по всем классам, исключая фоновый класс. Исключение фонового класса из расчета Mean IoU позволяет сосредоточиться на качестве сегментации непосредственно дефектов, что практичнее, поскольку основной интерес представляет именно точность обнаружения и локализации дефектов, а не фоновых областей.

Для повышения обобщающей способности модели и предотвращения переобучения применяются трансформации обучающих данных, включающие дополнение изображения, горизонтальное отражение, аффинные преобразования, гауссов шум, нормализацию и конвертацию в тензор. Выбор данных трансформаций обусловлен спецификой задачи сегментации дефектов на терагерцовых снимках. Горизонтальное отражение и аффинные преобразования увеличивают разнообразие обучающих данных, что особенно важно при ограниченном размере обучающей выборки. Интерполяция ближайшего соседа при аффинных преобразованиях обеспечивает сохранение целочисленных значений в масках сегментации, что критически важно для корректного обучения модели. Добавление гауссова шума моделирует естественные вариации в терагерцовых снимках, связанные с процессом сканирования и свойствами материалов, повышая устойчивость модели к шуму в реальных данных.

Для тестового набора данных применяются только необходимые трансформации (дополнение до нужного размера, нормализация и конвертация в тензор) без аугментаций данных. Это обеспечивает корректную оценку производительности модели на неаугментированных данных, приближенных к реальным условиям применения. Такой подход соответствует стандартной практике в машинном обучении и обеспечивает объективную оценку качества модели.

Для увеличения надежности и улучшения обобщающей способности модели используется кросс-валидация с 15 разбиениями, что позволяет оценить устойчивость к вариациям данных, получить более надежную оценку производительности, минимизировать влияние случайных факторов и сформировать ансамбль моделей для улучшения точности. Для каждого разбиения данных обучается отдельная модель с идентичной архитектурой и гиперпараметрами. Обучение проводится в течение 500 эпох с промежуточной валидацией каждые 50 эпох, что обеспечивает достаточное время для сходимости модели и позволяет отслеживать процесс обучения с оптимальными вычислительными затратами.

Для динамического управления скоростью обучения используется планировщик OneCycleLR, который, сначала линейно увеличивает скорость обучения от малого значения (обычно 1/10 от максимального) до заданного максимального значения, а затем плавно снижает до значения ниже начального, при этом одновременно с изменением скорости обучения происходит обратное изменение момента. Этот метод реализует концепцию "суперсходимости", обеспечивая: ускоренную сходимость за меньшее число эпох, преодоление локальных минимумов функции потерь, снижение риска переобучения благодаря регуляризующему эффекту и более стабильную сходимость по сравнению с постоянной скоростью обучения.

Обучение выполняется в формате BF16 — 16-битном формате с плавающей точкой, сохраняющем

диапазон FP32, но с меньшей точностью. Его структура (1 бит знака, 8 бит экспоненты, 7 бит мантиссы) отличается от FP32 (1 бит знака, 8 бит экспоненты и 23 бита мантиссы) и обеспечивает двукратное снижение потребления памяти, ускорение вычислений на GPU и численную стабильность благодаря полноразмерной экспоненте и меньшую вероятность переполнения. В отличие от стандартного полуточного формата (FP16), формат BF16 имеет больший диапазон значений за счет сохранения 8-битной экспоненты, что делает его более устойчивым при обучении нейронных сетей.

Для предотвращения проблемы взрыва градиентов применяется техника ограничения градиентов (Gradient Clipping) с пороговым значением 0.1: вычисляется L2-норма градиента по всем параметрам, и при превышении порога градиент масштабируется до заданной нормы. Этот метод стабилизирует обучение, предотвращает расходимость оптимизации, уменьшает влияние выбросов и особенно эффективен для глубоких и рекуррентных сетей.

После обучения моделей на всех разбиениях данных производится сбор предсказаний. Полученные предсказания используются для оценки производительности отдельных моделей, формирования ансамбля моделей путем усреднения или голосования, анализа ошибок и выявления сложных случаев, а также визуализации результатов сегментации. Это обеспечивает комплексную оценку качества разработанной модели и позволяет выявить ее сильные и слабые стороны.

Анализ результатов показывает, что разработанная модель обеспечивает высокую точность сегментации дефектов на терагерцовых снимках. Значения метрики IoU для классов дефектов стабильно превышают 0.7, что соответствует хорошему качеству сегментации. Использование ансамбля моделей, обученных на различных разбиениях данных, позволяет дополнительно повысить точность и устойчивость результатов. Визуальный анализ результатов сегментации подтверждает способность модели точно локализовать дефекты различных типов и размеров, что является ключевым требованием для практического применения модели в системах неразрушающего контроля. Использование современных техник оптимизации, включая AdamW, OneCycleLR, BF16 и Gradient Clipping, обеспечивает эффективное обучение модели и достижение высоких показателей качества сегментации.

Потенциальные направления дальнейшего развития включают расширение типологии дефектов для детальной классификации аномалий, интеграцию с трехмерными данными через расширение модели для работы с объемными терагерцовыми данными (3D-сегментация), а также разработку методов интерпретации решений модели для повышения доверия к системе. Адаптация модели для работы на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами обеспечит возможность ее применения в производственных условиях, где требуется обработка данных в реальном времени. Разработка стратегий активного обучения позволит эффективно пополнять обучающую выборку с минимальными затратами на разметку новых данных, что особенно актуально для специализированных задач, где получение размеченных данных может быть трудоемким и дорогостоящим процессом.

Разработанная модель является эффективным решением для автоматизации процесса контроля качества деталей с использованием терагерцовой томографии. Высокая точность сегментации дефектов, вычислительная эффективность и адаптация к специфике задачи обеспечивают возможность практического применения модели в промышленности и научных исследованиях. Дальнейшее развитие модели в указанных направлениях позволит расширить область применений и повысить эффективность систем неразрушающего контроля на основе терагерцовой томографии.

Научное исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 24-79-00314.

Список публикаций:

- [1] Perevalov A. V., Berdyugin A. I., Badin A. V., Pidotova D. A., et al. Terahertz nondestructive evaluation of objects produced by additive manufacturing // Russian Physics Journal. 2025. P.1-8.
- [2] Ryan K. R., Down M. P., Hurst N. J., Keefe E. M., Banks C. E. Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications // EScience. 2022. V. 2. No. 4. P. 365-381.
- [3] Voulodimos A., Doulamis N., Doulamis A., Protopapadakis E. Deep learning for computer vision: A brief review // Computational intelligence and neuroscience. 2018. V. 2018. No. 1. P. 7068349.
- [4] Berdyugin A. I., Badin A. V. Continuous terahertz wave imaging of microelectronics objects // Journal of Physics: Conference Series (IOP Publishing). 2021. V. 1862. No. 1. P. 012030.
- [5] Guo Y., Liu Y., Georgiou T., Lew M. S. A review of semantic segmentation using deep neural networks // International journal of multimedia information retrieval. 2018. V. 7. No. 2. P. 87-93.
- [6] Nani P., Das S., Dey S. Enhancing object recognition: a comprehensive analysis of CNN based deep learning models considering lighting conditions and perspectives // Evolutionary Intelligence. 2025. V. 18. No. 4. P. 72.

Измерительная установка для определения скорости дрейфа электронов в плазменных слоях ионосферы

Романов Илья Владимирович

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова

E-mail: romanov@ipg.geospace.ru

Системы наземной спутниковой радиосвязи и позиционирования используют ионосферу как среду распространения радиоволн. Ионосферные измерения приобретают ключевое значение для обеспечения надежной работы этих систем связи, навигации. Ионосфера, как динамичный и изменчивый слой атмосферы, оказывает существенное влияние на распространение радиоволн и точность спутниковых измерений, что делает ее мониторинг критически важным для различных технологических приложений. Регулярные измерения ионосферы позволяют оптимизировать частотный план радиосвязи, прогнозировать качество каналов связи, минимизировать потери сигнала, обеспечивать устойчивую связь в условиях ионосферных возмущений, компенсировать ошибки позиционирования, повышать точность навигации, разрабатывать корректирующие алгоритмы, обеспечивать работу прецизионных систем позиционирования. Для ионосферных измерений в настоящее время применяются методы многочастотного радиозондирования, методы измерений ПЭС на глобальных сетях ГНСС-приемников, радиотомографические методы, доплеровские методы.

Доплеровские методы, основаны на анализе изменения частоты радиосигналов, отраженных от ионосферы, и позволяют с высокой точностью детектировать и исследовать динамические процессы в ионосфере, что особенно важно для прогнозирования её возмущений. Эти методы измерений используют анализ доплеровского смещения частоты отраженного сигнала, измерение скорости изменения фазы радиоволн, многочастотные измерения для получения пространственного распределения параметров, высокочувствительные приемные системы с точной временной привязкой. По сравнению со способами мониторинга доплеровские системы обладают высокой чувствительностью к малым изменениям скорости дрейфа электронов, возможностью работы в реальном времени, способностью детектировать быстротекущие процессы, относительной простотой аппаратной реализации. Доплеровские измерения находят применение в исследованиях ионосферных неоднородностей, мониторинге акустико-гравитационных волн, изучении влияния геомагнитных бурь, прогнозировании распространения радиоволн, контроле состояния ионосферы для спутниковой навигации.

Работа измерительной установки (доплеровской станции) для определения скорости дрейфа электронов в ионосфере основана на приеме диагностических сигналов радиовещательных станций, КВ радиомаяков и, в первую очередь, станций точного времени КВ диапазона. Установка находится на территории ионосферной станции «Электроугли» (Московская область). Она позволяет проводить длительную непрерывную регистрацию четырех коротковолновых радиосигналов одновременно. Также возможна работа в режиме восстановления углов прихода отраженного от ионосферы сигнала на одной выбранной частоте с использованием четырех разнесенных в пространстве антенн. В состав аппаратуры входят: рубидиевый стандарт частоты, промышленный компьютер, прецизионный генератор, двухканальный генератор, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), четыре КВ приемника, накопитель на жестких дисках, источник бесперебойного питания и четырехканальный смеситель сигналов.

В качестве источника диагностических сигналов используется КВ радиопередатчик с позывным RWM, расположенный на территории Радиоцентра № 3 (Талдом, Московская область), находящийся на расстоянии 115 км от места приема. С точки зрения приемной антенны доплеровского комплекса радиопередатчик находится за горизонтом и прямой сигнал отсутствует, однако отраженные от ионосферных слоев радиоволны хорошо принимаются. Поскольку разнесение передатчика и приемника является небольшим по сравнению с типичной высотой ионосферного слоя F, распространение отражаемых радиоволн можно считать квазивертикальным. Радиопередатчик RWM представляет собой источник эталонного сигнала времени, синхронизированным с Главным метрологическим центром Государственной службы времени и частоты. Сигнал передается на трех частотах: 4996 кГц, 9996 кГц, 14 996 кГц. Мощности передатчиков составляют соответственно 5 кВт, 8 кВт и 8 кВт. Близкое расположение передатчика и относительно большая мощность передатчика позволяет регистрировать диагностические сигналы не только ниже критической частоты, но и выше, по крайней мере, в некоторых случаях, благодаря эффекту рассеяния мощности на ионосферных неоднородностях и от различных плазменных слоев ионосферы.

Таким образом, измерительная установка на станции «Электроугли» предоставляет новый тип геофизической информации для мониторинга ионосферы Институтом прикладной геофизики, позволяющая вести наблюдения изменений скорости дрейфа электронов в ионосфере по измерениям сдвига частот КВ радиовещательных станций и станций точного времени.

Анализ долговременных характеристик пассивных водородных стандартов частоты и времени

Смагулов Султанбек Берикулы^{1,2}

Мишагин Константин Геннадьевич^{3,4},

¹ РГП «КазСтандарт», Астана, Казахстан

² Томский политехнический университет, Томск, Россия

³ АО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия

⁴ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия

E-mail: s.smagulov@ksm.kz

Введение

Критическая информационная инфраструктура, охватывающая такие ключевые секторы, как телекоммуникации, радиовещание, энергетика, транспорт, финансовые и банковские системы, а также информационная безопасность, требует высокоточной синхронизации по времени для надёжного и непрерывного функционирования. Основой такой синхронизации служит национальная временная шкала, которая должна соответствовать международным метрологическим требованиям и быть совместимой с глобальной системой координации времени.

В Республике Казахстан формирование, хранение и передача точного времени осуществляется РГП «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» (КазСтандарт), исполняющим функции национального метрологического института (НМИ). Национальная шкала времени Казахстана обозначается как UTC(KZ) и представляет собой локальную реализацию Всемирного координированного времени (UTC), формируемого Международным бюро мер и весов (МБМВ) на основе данных, поступающих от более 85 лаборатории времени по всему миру.

Национальная шкала времени Республики Казахстан UTC(KZ) реализуется на основе пассивных водородных стандартов частоты и времени VCN-1008. Данные измерений UTC(KZ) относительно глобальных навигационных систем и данные внутренних сличений стандартов частоты ежедневно передаются в МБМВ. На основе полученных данных МБМВ формирует раз в месяц протоколы Circular T и раз в неделю протоколы UTCr [1] с информацией об отклонении шкалы UTC относительно участвующих в измерениях шкал лабораторий, включая UTC(KZ) за соответствующий период, а также присваивает веса отдельным стандартам частоты. В большинстве ведущих метрологических лабораторий шкалы времени формируются на основе активных водородных стандартов, которые обладают высокой стабильностью и предсказуемостью. Такие шкалы можно корректировать не чаще одного раза в месяц на основе данных Circular T и достигать сходимости с UTC в пределах единиц наносекунд. Пассивные водородные стандарты частоты обладают большей нестабильностью частоты, поэтому для достижения сопоставимой высокой точности подстройки шкалы, формируемой на их основе, под UTC требуется более частое управление. В работах [2, 3] анализируется поведение шкалы UTC(KZ), автоматически подстраиваемой по данным UTCr.

В 2021 году Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени Республики Казахстан (ГЭВЧ) был оснащён эталонным комплексом времени и частоты ЯКУР.411735.024 производства АО «Время-Ч», Россия.

Для задачи формирования шкалы атомного времени ключевыми характеристиками водородных стандартов являются долговременная нестабильность частоты (девиация Аллана) и предсказуемость дрейфа частоты. В работе анализируются эти характеристики на основе данных непрерывных измерений в течение более двух лет. Существенное влияние на результат воспроизведения и хранения единиц времени, частоты и национальной шкалы времени оказывает изменение температурного режима. В связи с этим в данной работе исследуется влияние изменения температуры на характеристики стандартов частоты.

Целью работы является анализ долговременных характеристик пассивных водородных стандартов частоты и оценка динамики основных параметров, влияющих на поведение атомных часов, участвующих в формировании национальной шкалы времени UTC(KZ).

Научная новизна или практическая (прикладная) значимость

UTC(KZ) – это первая национальная шкала времени, которая формируется на основе только пассивных водородных стандартов частоты.

Впервые представлены результаты долговременных характеристик пассивных водородных стандартов частоты на интервале времени наблюдения более 2 лет.

Проведено экспериментальное исследование основных характеристик пассивных водородных стандартов частоты VCN-1008, производства АО «Время-Ч», Россия.

Результаты данной работы представляют интерес для национальных лабораторий времени и частоты, частотно-временного обеспечения спутниковых навигационных систем, систем связи, а также будут использоваться для дальнейшего улучшения метрологических характеристик Государственного первичного эталона времени и частоты Республики Казахстан и ведения национальной шкалы времени UTC(KZ).

Полученные результаты

Долговременная нестабильность частоты и дрейф

Основу ГЭВЧ составляют три стандарта частоты и времени водородных VCH-1008 два из которых (PHM1 и PHM2) расположены в климатической камере VCH-A18, в которой поддерживается температура в пределах $\pm 0,2^\circ\text{C}$, а третий (PHM3) расположен вне камеры. При этом температура в помещении ГЭВЧ за время наблюдения изменялась в достаточно больших пределах от 18°C до 31°C .

На начальном этапе работы модернизированного ГЭВЧ (декабрь 2021 – февраль 2022) была выполнена оценка дрейфа частоты каждого стандарта на основе данных кодовых измерений сигналов глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) в дифференциальном режиме относительно UTC(SU). Были получены следующие величины суточного дрейфа: $-3,9 \cdot 10^{-16}$, $-2,1 \cdot 10^{-16}$, $-2,7 \cdot 10^{-16}$ соответственно для PHM1, 2 и 3. Следует отметить, что такие значения считаются достаточно малыми для пассивных водородных стандартов частоты, они на порядок меньше характерной величины суточной нестабильности частоты и приводят к увеличению девиации Аллана уже на более длительных интервалах времени измерения (более 10 суток). При выпуске дрейф частоты пассивных водородных стандартов может составлять величину порядка нескольких единиц 10^{-15} . Тем не менее для задачи хранения времени имеет смысл предельно минимизировать величину дрейфа. Начиная с конца февраля 2022 года с помощью программного обеспечения в автоматическом режиме осуществляется компенсация дрейфа частоты путем коррекции кода синтезатора на 10^{-15} с периодом, рассчитанным для соответствующей величины дрейфа.

На (рис. 1а) представлены совмещенные графики температуры и относительных разностей частот стандартов. На (рис. 1б) представлены графики нестабильности частоты PHM2 и PHM3 относительно PHM1.

Полученные результаты свидетельствуют о высоких метрологических характеристиках современных пассивных водородных стандартах частоты. Усредненные суточные дрейфы разности частот равны $1,75 \cdot 10^{-17} \pm 2,2 \cdot 10^{-18}$ и $-1,62 \cdot 10^{-17} \pm 6,6 \cdot 10^{-18}$ (доверительные интервалы указаны для вероятности 95%). Получены следующие оценки усредненного суточного дрейфа для каждого стандарта в отдельности относительно UTC(SU): $1,25 \cdot 10^{-17} \pm 1,34 \cdot 10^{-17}$, $2,31 \cdot 10^{-17} \pm 1,09 \cdot 10^{-17}$, $-1,33 \cdot 10^{-17} \pm 1,33 \cdot 10^{-17}$. Результаты подтверждают эффективность системы автоматической компенсации дрейфа, уменьшающей его более, чем на порядок.

Суточная нестабильность частоты для стандартов, расположенных в климатических камерах, составляет величину около 10^{-15} , что соответствует характеристике активных водородных стандартов предыдущего поколения, таких как VCH-1005. Суточная нестабильность частоты третьего стандарта, расположенного вне климатической камеры и подверженного сильным температурным колебаниям, тем не менее, при усреднении на длительном интервале показывает величину $2,1 \cdot 10^{-15}$, что укладывается в требования спецификации для VCH-1008.

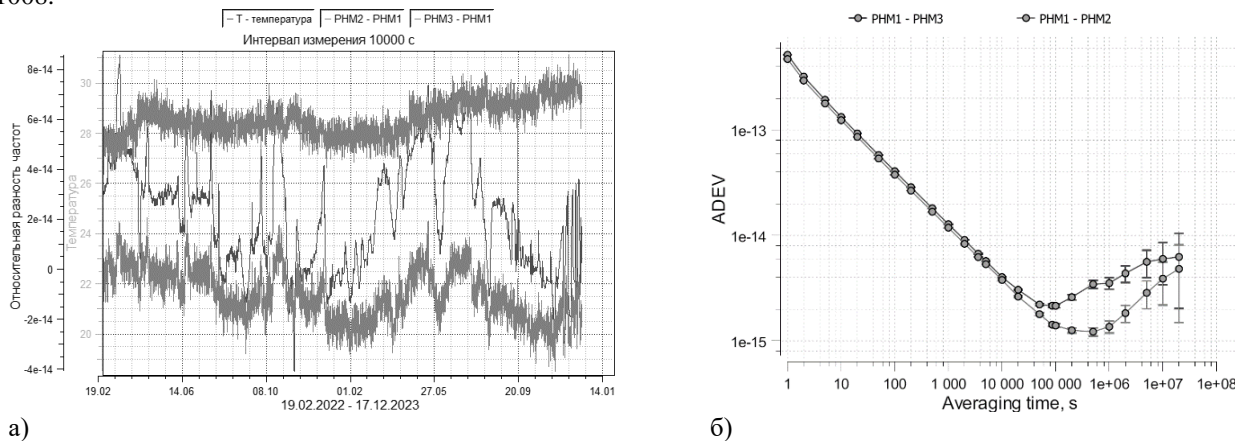


Рис. 1: а) разность частот PHM2 (красный) и PHM3 (зеленый) относительно опорного PHM1, график температуры (синий); б) нестабильность частоты PHM2 и PHM3 относительно опорного PHM1.

Влияние температуры

Отсутствие стабилизации температуры в помещении ГЭВЧ дает возможность оценить температурную чувствительность пассивного водородного стандарта PHM3, а также проверить не изменяется ли эта чувствительность со временем.

Данные о температуре в помещении поступают от термогигрометра ИВТМ-7М и записываются с интервалом в 10 секунд. Для анализа используются данные, представленные на (рис. 1а) (с 19.02.2022 по 17.12.2023), в которых с помощью медианного фильтра исключены выбросы. Интервал усреднения разности частот равен 10000 с.

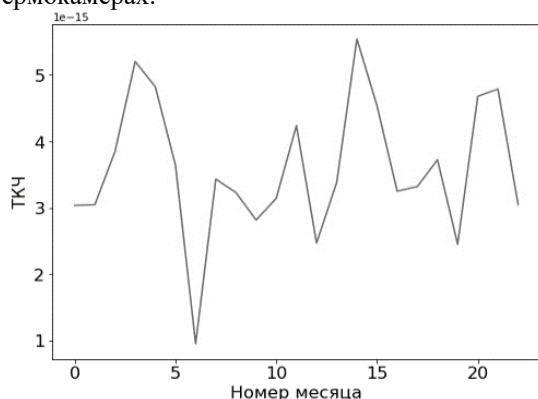
Рассмотрим разность частот PHM3–PHM1 и воспользуемся статистическими методами библиотеки SciPy для оценки влияния температуры на частоту стандарта PHM3, пренебрегая влиянием температуры на стандарт PHM1, который расположен в термокамере. Важно отметить, что компаратор, на котором измеряются разности частот также расположен в термокамере.

Коэффициент корреляции Пирсона между значениями температуры и разности частот PHM3–PHM1 равен 0,79 при нулевом Р-значении. Для сравнения коэффициент корреляции с разностью частот PHM2–PHM1 на порядок меньше ($\sim 0,079$), хотя Р-значение, равное $2,4 \cdot 10^{-9}$, говорит хоть и о слабой, но статистически значимой связи

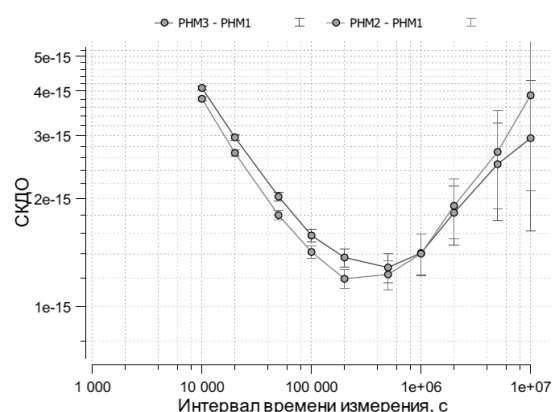
между температурой в помещении и разностью частот стандартов, размещенных в термокамерах. Коэффициент линейной зависимости частоты от температуры составил $3,72 \cdot 10^{-15} \pm 8 \cdot 10^{-17}$ на 1°C (доверительный интервал указан для вероятности 95%). Согласно спецификации VCH-1008 [4] температурный коэффициент частоты не должен превышать $1 \cdot 10^{-14}$.

Для исследования постоянства температурной зависимости частоты запись была разделена на отрезки продолжительностью около одного месяца. На каждом отрезке методом линейной регрессии оценивался температурный коэффициент частоты. Результат, представленный на (рис. 2а), демонстрирует отсутствие явной тенденции к изменению температурной чувствительности со временем.

На (рис. 2б) представлен график нестабильности преобразованной разности частот РНМ3–РНМ1 из которой вычтена составляющая, обусловленная изменением температуры. Используется один коэффициент температурной зависимости для всей записи ($3,72 \cdot 10^{-15}$). График нестабильности в случае искусственной термокомпенсации в результате обработки данных близок к графику нестабильности стандартов, находящихся в термокамерах.



а)



б)

Рис. 2: а) динамика зависимости температурного коэффициента частоты (ТКЧ); б) сравнение нестабильности разности частот РНМ3–РНМ1 (с термокомпенсацией в постобработке) и нестабильности для РНМ2–РНМ1

Выводы

Результаты проведенного анализа подтверждают высокие метрологические характеристики современных пассивных водородных стандартов частоты типа VCH-1008. Установлена эффективность алгоритмов автоматической компенсации дрейфа частоты, что позволяет значительно повысить стабильность формируемой временной шкалы. Исследована температурная чувствительность стандартов, показано, что применение термостатированных камер существенно снижает влияние внешних температурных колебаний и способствует достижению лучшей долговременной стабильности частоты.

В условиях отсутствия активной термостабилизации возможно применение программной термокомпенсации – введения поправки к частоте на основе данных встроенного температурного датчика. Вместе с тем, эффективность такого подхода требует дополнительной экспериментальной валидации.

Список публикаций:

- [1] G. Petit, F. Arias, A. Harnegnies, G. Panfilov and L. Tisserand, "UTCr: a rapid realization of UTC" *Metrologia*, vol. 51, 2023, pp. 33-39.
- [2] Смагулов С.Б. Алгоритм формирования национальной шкалы времени UTC(KZ) на основе пассивных водородных стандартов частоты и времени/ С.Б. Смагулов, А.В. Юрченко // Сборник материалов V Международного форума «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции», – 2023. – Томск: STT, – С.44-46.
- [3] Смагулов С.Б., Мишагин К.Г. Реализация метода автоподстройки национальной шкалы времени UTC(KZ) с помощью еженедельных данных Rapid UTC // Сборник тезисов докладов II Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ» и X Международного конкурса «Лучший молодой метролог КОООМЕТ-2023». – 2023. – Екатеринбург. – С. 29-35.
- [4] Метрологические характеристики стандартов частоты и времени Ч1-1007, производства ЗАО «Время-Ч». <https://www.vremya-ch.com/index.php/product/passivehm-ru/ch1-1007-ru/index.html>.

Наземная система мониторинга параметров почвы для дистанционного зондирования Земли

Спешилов Илья Валерьевич

Бадьин Александр Владимирович, Южаков Михаил Сергеевич, Ситников Серафим Андреевич,

Казанин Владислав Александрович

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: aero.ilya@gmail.com

Современное сельское хозяйство требует высокоточного мониторинга почвенно-климатических параметров для оптимизации ресурсов и повышения урожайности [1]. Одним из ключевых инструментов для этого является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), однако данные со спутников могут содержать погрешности из-за атмосферных искажений, особенностей аппаратуры и других факторов [2]. Для повышения достоверности спутниковых данных необходимы наземные системы валидации, обеспечивающие прямые измерения параметров почвы. В данной работе представлена разработка наземной системы мониторинга на базе комплекса «РЭКС-Т», предназначенной для измерения температуры и влажности почвы на глубинах 5, 10 и 15 см с последующей передачей данных для сопоставления со спутниковыми снимками.

Система состоит из сети автономных агроклиматических зондов, базовой станции и веб-интерфейса для визуализации данных. Каждый зонд включает микроконтроллер ATmega328P-AU, датчики температуры DS18B20 (интерфейс 1-Wire) и ёмкостные датчики влажности почвы, подключённые через 16-битный АЦП ADS1115 по шине I²C (рис.1). Для обеспечения автономности зонды оснащены солнечными панелями и Li-Ion аккумуляторами. Передача данных осуществляется по радиоканалу LoRaWAN (модуль EBYTE E19-868M20S) на базовую станцию на базе ESP32, которая агрегирует информацию и отправляет её на сервер в формате JSON для отображения в веб-интерфейсе.

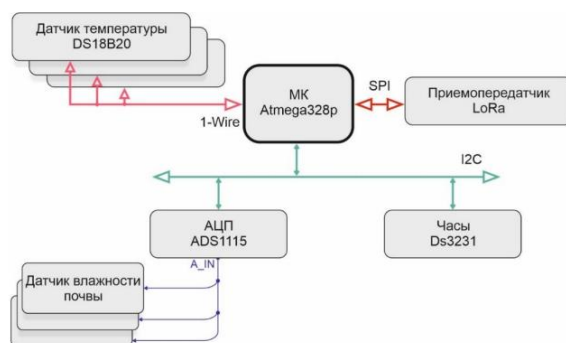


рис.1 Структурная схема агрозонда

В ходе работы проведены исследования температурной зависимости показаний датчиков влажности, что позволило выявить незначительное влияние температуры в диапазоне 3–19 °С на точность измерений. Построены калибровочные кривые для перевода сырых данных АЦП в значения относительной влажности, что обеспечило унификацию показаний для разных экземпляров датчиков. Также определён оптимальный диапазон питающего напряжения (3,5–4,5 В), при котором система работает стабильно. Тестирование системы проводилось на лабораторном стенде с имитацией различных условий влажности почвы, подтвердив её работоспособность и точность измерений.

Разработанная система позволяет не только автоматизировать мониторинг почвенных параметров, но и служит основой для дальнейшего применения методов машинного обучения в анализе спутниковых данных. Перспективы развития системы включают расширение функционала для интеграции с другими IoT-решениями в сельском хозяйстве и повышение энергоэффективности зондов.

Список публикаций:

- [1] И. Н. Минин, А. В. Бадьин, С. А. Ситников [и др.] // Мониторинг почвенно-климатических параметров в сельском хозяйстве с использованием автономной системы. Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023: Сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Томск, 26–29 сентября 2023 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2023. – С. 321-323
- [2] Искусственные спутники Земли // Википедия: свободная энциклопедия. – [Б.м.], 2025. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственный_спутник_Земли (дата обращения: 12.07.25)

Влияние дефектов образцов на результаты расчётов комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости при измерениях в коаксиальной волноводной ячейке

Холодов Роман Евгеньевич

Кулешов Григорий Евгеньевич

Томский государственный университет

E-mail: kringener.roman@mail.ru

В настоящее время большинство исследований электромагнитных параметров в СВЧ диапазоне проводятся волноводными методами с использованием коаксиальных измерительных ячеек [1, 2]. Данный метод обеспечивает приемлемую точность измерений [3], а также позволяет исследовать материалы в широком частотном диапазоне. Однако образцы при этом должны быть изготовлены с большой точностью и установлены в измерительной ячейке без перекосов и зазоров. Наличие любых неоднородностей структуры и формы у образцов может приводить к недостоверным результатам измерений и ошибочным выводам о возможном применении материалов на практике. Поэтому актуальной задачей является оценка влияния дефектов образцов на результаты расчётов комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости.

В данном исследовании с помощью программы CST Studio проводилось моделирование электромагнитного отклика от образцов (коаксиальных шайб) в стандартной коаксиальной ячейке ($d_{\text{внеш.}} = 7$ мм, $d_{\text{внут.}} = 3.04$ мм). В процессе работы были созданы ряд моделей измеряемого образца, содержащие отклонения геометрических параметров от размеров ячейки (внутренний и внешний диаметр) или дефекты (воздушные поры и полости). В качестве электромагнитных параметров материала в модели использовались ранее измеренные данные для композита на основе феррита с углеродными нанотрубками. Из полученных в результате моделирования S -параметров по модернизированной методике Беккера-Джарвиса для заданной толщины образца рассчитываются комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости [4].

Моделирование показало, что из рассмотренных дефектов образцов наибольший вклад в изменение расчётных значений электромагнитных параметров вносит изменение внутреннего диаметра образца. Далее представлены результаты по влиянию изменения (переточенного) внутреннего диаметра образца на результаты расчётов действительной части комплексной диэлектрической (рис. 1).

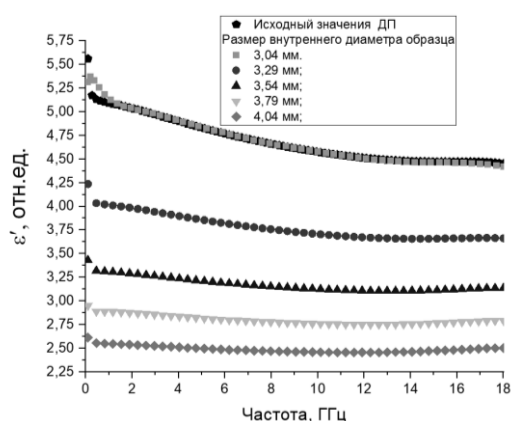


Рис. 4 Зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости от частоты для образцов с различным отклонением внутреннего диаметра от заданного (3,04 мм)

Увеличение внутреннего диаметра образца на 1 мм уменьшает получаемую из расчетов действительную составляющую комплексной диэлектрической проницаемости почти в два раза. При этом мнимая часть диэлектрической проницаемости может уменьшиться до 4 раз с уменьшением диаметра внутреннего на 1 мм. В тоже время увеличение внутреннего диаметра образца на 1 мм приводит к уменьшению действительной части комплексной магнитной проницаемости лишь на 5%, а мнимой на 8%.

Таким образом, точное изготовление образца под размеры коаксиальной волноводной ячейки или учет дефектов экспериментального образца является критически важным для точного расчёта магнитной и диэлектрической проницаемостей материала. Измерения выполнены на оборудовании ЦКП “Центр радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов” Национального исследовательского Томского государственного университета.

Список публикаций:

- [1] Krupka J. // Materials. 2021. V. 14. №. 17. P. 5097.
- [2] Ulmaskulov M. R., Shunailov S. A. // Journal of Applied Physics. 2021. V. 130. №. 23
- [3] Guraliuc A. R. et al. // IEEE transactions on antennas and propagation. 2011. V. 59. №. 11. P. 4318-4321.
- [4] Chalapat K. et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2009. V. 57. №9. P. 2257–2267.

Адаптивные алгоритмы цифровой обработки сигналов в волоконно-оптических системах связи с учётом изменяющихся параметров среды

Авторы:

Тажибаев И.Б.^{1,2}

1. Ферганский государственный технический университет

2. Томский политехнический университет

Абдусаматов Х.А.¹

1. Ферганский государственный технический университет

E-mail: ibt5@tpu.ru

Аннотация

Рассматриваются методы адаптивной цифровой обработки сигналов (ЦОС) в волоконно-оптических системах связи, подверженных изменениям параметров среды. Предложена архитектура обработки, учитывающая температурные, механические и спектральные искажения. Реализован алгоритм адаптивной экранизации на основе анализа статистических характеристик принимаемого сигнала. Представлены результаты моделирования, подтверждающие повышение устойчивости передачи и снижение уровня ошибок.

Abstract: This paper presents adaptive digital signal processing (DSP) methods designed to enhance the performance of fiber-optic communication systems exposed to variable environmental conditions. An approach based on real-time adaptation of filter and equalizer parameters using statistical signal characteristics and machine learning is proposed. Simulation and modeling results confirm that the proposed method improves communication reliability and reduces bit error rate (BER).

Ключевые слова: волоконно-оптическая связь, цифровая обработка сигналов, адаптация, экранизация, изменение параметров среды

1. Введение

Современные волоконно-оптические системы связи обеспечивают высокую скорость и надёжность передачи информации. Однако физические и внешние факторы (температурные колебания, изгибы кабеля, старение компонентов) вызывают искажения сигнала. Это снижает качество передачи и требует постоянной корректировки параметров приёмной аппаратуры. Одним из перспективных подходов является внедрение адаптивных методов ЦОС, позволяющих подстраиваться к текущим условиям канала в реальном времени.

2. Методология

2.1 Архитектура адаптивной обработки

Предложенная система включает следующие модули:

- Блок оценки параметров среды (на основе датчиков или анализа сигнала);
- Адаптивный эквалайзер с возможностью автоматического изменения коэффициентов;
- Модуль управления на базе алгоритма наименьших квадратов (LMS) или градиентного спуска;
- Модуль обучения на основе машинного обучения для предсказания состояния канала.

Таблица 1. Классификация внешних воздействий и соответствующих компенсирующих алгоритмов

Воздействие среды	Признак искажения	Компенсирующий метод
Температурные колебания	Изменение задержки и дисперсии	Адаптивная фильтрация
Механические изгибы	Затухание и отражения	Динамическая экранизация
Старение компонентов	Нелинейные искажения	Машинное обучение, предсказание состояния

2.2 Математическая модель

Сигнал на выходе волоконного канала можно представить как:

$$y(t) = x(t) * h(t) + n(t)$$

где:

- $x(t)$ — переданный сигнал,
- $h(t)$ — импульсная характеристика изменяемого канала,
- $n(t)$ — аддитивный шум.

Адаптивный алгоритм строится на минимизации функции ошибки (1):

$$E = \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2 \quad (1)$$

где d_i — эталонный сигнал, y_i — выход адаптивного фильтра.

3. Результаты

Моделирование проводилось в среде MATLAB. Была реализована система, включающая адаптивный FIR-фильтр с обновлением коэффициентов по методу LMS (рис. 1.)

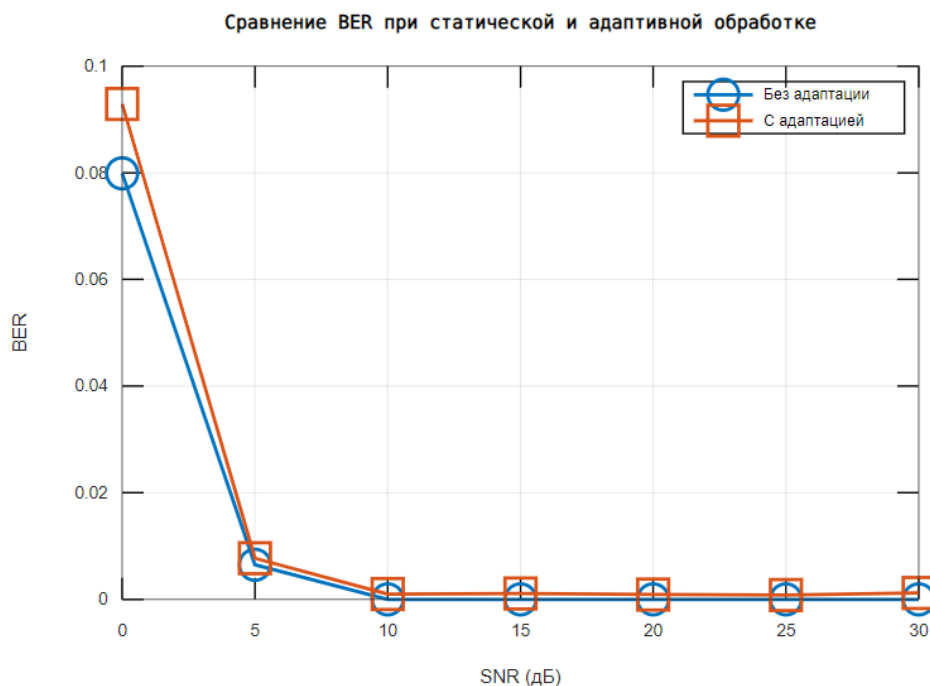


Рисунок 1. Сравнение ошибок передачи (BER) при статической и адаптивной обработке

Пример графика:

- Ось X — уровень шума/температуры
- Ось Y — BER
- Линии: "Без адаптации" и "С адаптацией"

Пояснения:

BER без адаптации: просто принимает сигнал по порогу (0).

BER с адаптацией: использует LMS-фильтр, настраивающийся на основе ошибки между принятым и эталонным сигналом.

SNR от 0 до 30 дБ: позволяет оценить устойчивость в разных условиях канала.

Фильтр FIR порядка 10 — достаточный минимум для демонстрации эффекта.

Таблица 2. Результаты моделирования при различных условиях среды

Температура (°C)	BER без адаптации	BER с адаптацией
25	0.0002	0.0001
40	0.0025	0.0005
60	0.0052	0.0013

4. Обсуждение

Результаты показывают значительное преимущество адаптивных методов в условиях изменяющихся параметров среды. Особенно важно применение таких алгоритмов в ответственных системах, где невозможно гарантировать стабильность условий передачи. Комбинация статистической оценки и ML-модулей даёт возможность обеспечить надёжность при непредсказуемых воздействиях.

5. Заключение

Адаптивные методы цифровой обработки позволяют существенно повысить устойчивость волоконно-оптических систем связи. Предложенная архитектура легко масштабируется и может быть интегрирована в существующие устройства с минимальными затратами. В дальнейших исследованиях планируется расширить алгоритмы на многоканальные конфигурации и исследовать влияние нелинейных искажений.

Список публикаций:

1. Оппенгейм А. В., Шеффер Р. В., Бак Дж. Р. Дискретная обработка сигналов. — М.: Техносфера, 2006.
2. Widrow B., Stearns S. D. Adaptive Signal Processing. — Prentice Hall, 1985.
3. Haykin S. Adaptive Filter Theory. — 5th ed. — Pearson, 2014.
4. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. — Wiley, 2010.
5. Дьяконов В. П. Цифровая обработка сигналов в системах связи. — М.: Радио и связь, 2010.
6. ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. — Электронный ресурс.

Применение оптоволоконных сенсорных систем для теплоконтроля промышленного оборудования

Автор:

Тажигаев И.Б.^{1,2}

1. Томский политехнический университет

2. Ферганский государственный технический университет

E-mail: ibt5@tpu.ru

Аннотация

Рассматриваются методы и средства оптического контроля на основе волоконно-оптических сенсоров для мониторинга температурных полей в промышленном оборудовании. Предложена архитектура распределенной сенсорной системы, использующая эффекты рассеяния Бриллюэна и Рамана в оптическом волокне. Разработан алгоритм адаптивной обработки сигналов, позволяющий компенсировать влияние внешних дестабилизирующих факторов на точность измерений. Приведены результаты моделирования, подтверждающие повышение точности и надежности системы теплоконтроля в условиях производственной среды.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, теплоконтроль, распределенные системы, рассеяние Бриллюэна, адаптивная обработка сигналов, промышленное оборудование.

1. Введение

Контроль температурных режимов критически важен для обеспечения надежности, безопасности и эффективности промышленного оборудования (силовые трансформаторы, турбины, трубопроводы). Традиционные электронные датчики температуры обладают рядом недостатков, таких как чувствительность к электромагнитным помехам, ограниченная долговечность и сложность организации распределенных измерений. Волоконно-оптические сенсорные системы (ВОСС) лишены этих недостатков и позволяют осуществлять непрерывный распределенный контроль температуры вдоль всей длины волокна, что делает их перспективным решением для задач промышленного мониторинга.

2. Методология

2.1 Архитектура системы теплоконтроля

Предложенная система распределенного теплоконтроля включает следующие ключевые модули:

Источник оптического излучения и модуль ввода зондирующих импульсов;

Чувствительное оптическое волокно, выполняющее роль датчика;

Приемно-аналитический модуль на основе рефлектометра;

Блок адаптивной цифровой обработки сигналов для подавления шумов и компенсации нестабильностей;

Модуль интерпретации данных и визуализации температурного профиля.

Таблица 1. Сравнительные характеристики методов ВОСС для теплоконтроля

Метод	Физический принцип	Пространственное разрешение	Диапазон измерений	Применение
DTS (Рамановский)	Рамановское рассеяние	1-3 м	-50°C ... +300°C	Пожароопасные зоны, трубопроводы
BOTDA (Бриллюэновский)	Бриллюэновское рассеяние	0.1-1 м	-200°C ... +700°C	Ответственные объекты (ТЭС, ГЭС)

2.2 Математическая модель

Сигнал обратного рассеяния, зависящий от температуры, можно описать как:

$$P(z) = P_0 * \exp(-\alpha z) * S(T(z)) + n(z)$$

где:

$P(z)$ — мощность принятого сигнала на расстоянии z ,

P_0 — мощность зондирующего импульса,

α — коэффициент затухания в волокне,

$S(T(z))$ — температурно-зависимая функция рассеяния,

$n(z)$ — аддитивный шум.

Адаптивный фильтр используется для минимизации шумовой составляющей и улучшения отношения сигнал/шум. Критерий оптимизации — минимизация среднеквадратической ошибки между ожидаемым и измеренным сигналом:

$$E = \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2 \quad (1)$$

где d_i — эталонный сигнал, y_i — выход адаптивного фильтра.

3. Результаты

Моделирование системы проводилось в среде MATLAB. Была исследована эффективность адаптивного FIR-

фильтра с алгоритмом LMS для подавления шумов в сигнале обратного рассеяния. (рис.1.)

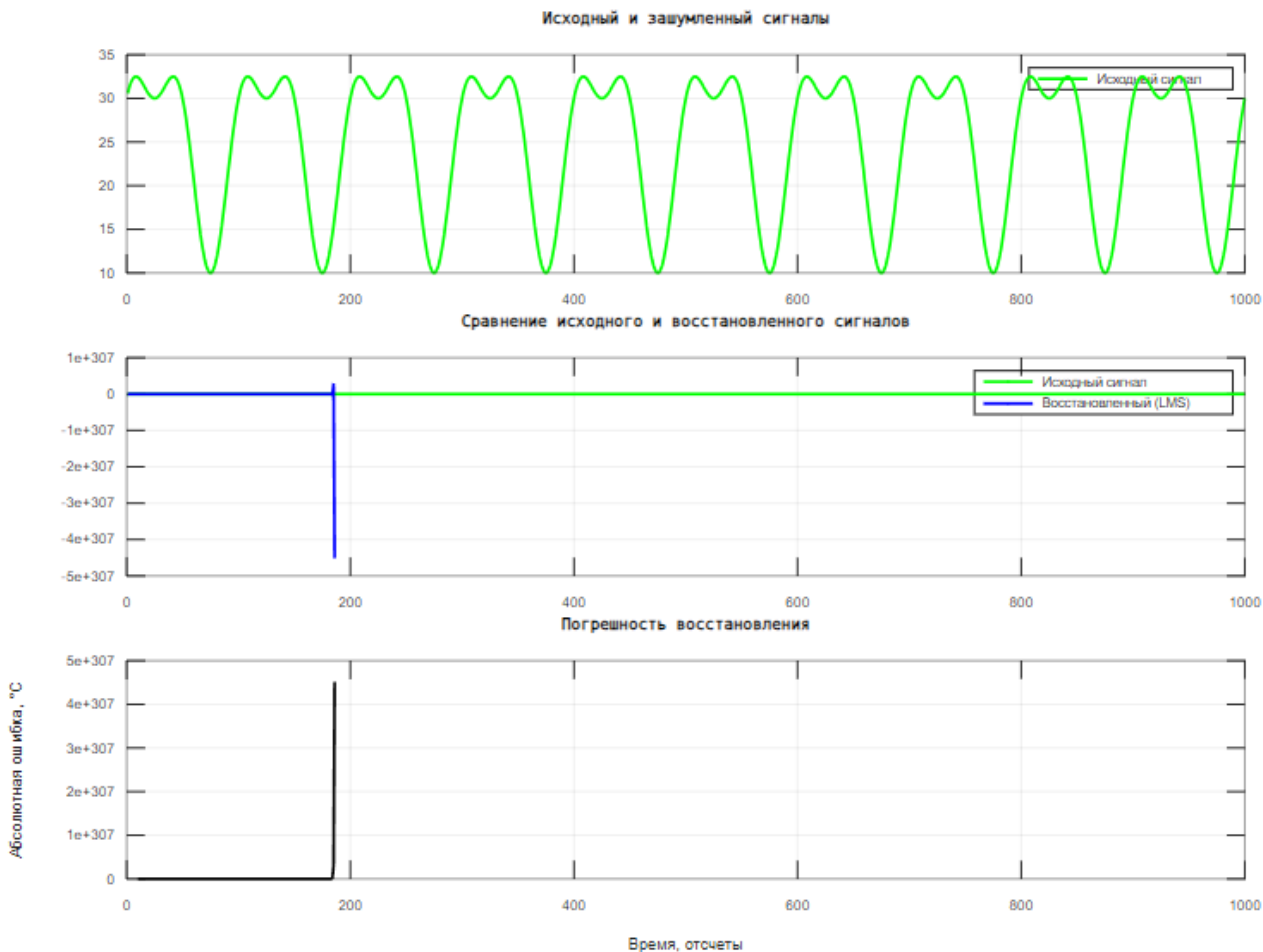


Рисунок 1. Сравнение точности измерения температуры при статической и адаптивной обработке сигнала
Описание графика:

Ось X — Внешняя температура/уровень помех
Ось Y — Погрешность измерения температуры, °C
Линии: "Базовая обработка" и "С адаптацией (LMS)"

Таблица 2. Результаты моделирования погрешности измерения температуры

Условия измерения	Погрешность, базовая обработка (°C)	Погрешность, с адаптацией (°C)
Стабильные (25°C)	±0.5	±0.2
Помехи (вибрация, ЭМП)	±2.5	±0.8
Резкий градиент температуры	±1.8	±0.6

4. Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют, что применение адаптивных алгоритмов ЦОС позволяет существенно повысить точность и устойчивость волоконно-оптических систем теплоконтроля в сложных производственных условиях. Подавление шумов и компенсация искажений обеспечивают надежное детектирование локальных перегревов и точное построение температурных профилей. Это особенно важно для предиктивного обслуживания и предотвращения аварийных ситуаций на энергетическом и технологическом оборудовании.

5. Заключение

Разработанная архитектура волоконно-оптической сенсорной системы с адаптивной обработкой сигналов является эффективным решением для задач распределенного теплоконтроля. Система обладает высокой помехозащищенностью, точностью и возможностью мониторинга протяженных объектов. Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией данных с различных типов датчиков (деформации, акустики) и разработкой интеллектуальных алгоритмов для прогнозирования термических режимов оборудования.

Литература

1. Culshaw B., Dakin J. Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends. — Artech House, 1997.

2. López-Higuera J.M., Cobo L.R., Incera A.Q., Cobo A. Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring. — Journal of Lightwave Technology, 2011.
3. Балакший В.И., Пашков В.А. Волоконно-оптические датчики: физические основы, методы и применения. — М.: Техносфера, 2010.
4. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. — Academic Press, 2013.
5. Дьяконов В.П. Цифровая обработка сигналов в системах связи. — М.: Радио и связь, 2010.
6. ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.

Термический отжиг светодиодов на основе гетероструктур GaP подвергнутые воздействию быстрыми нейтронами.

Автор:

Абдусаматов Х.А.¹

1. Ферганский государственный технический университет

E-mail: haa3@tpu.ru

Аннотация

В процессе исследования проводились измерения электрофизических и светотехнических характеристик светодиодов в результате термического отжига светодиодов, подвергнутых облучению быстрыми нейтронами. В результате исследования получен ряд закономерностей, который будет полезен для дальнейших исследований в данной области.

Abstract: During the study, measurements of the electrophysical and lighting characteristics of LEDs were carried out as a result of thermal annealing of LEDs subjected to irradiation with fast neutrons. As a result of the study, a number of regularities were obtained that will be useful for further research in this area.

Ключевые слова: быстрые нейтроны; термический отжиг; светодиод; гетероструктура; радиационная стойкость.

1. Введение

Стремительное развитие технологии производства излучающих структур в последние годы привело к значительным успехам в области повышения качества приборов на их основе. Существенно увеличилось количество конструкций и типов серийно производимых кристаллов, изготовленных на основе эпитаксиальных гетероструктур твердых растворов AlGaInP и AlGaInN, позволяющих создавать источники излучения с любыми необходимыми характеристиками для различных сфер применения. Большой выбор цветов свечения, комбинация мощного излучения с любой формой его пространственного распределения и возможностью получения различных цветовых оттенков в широком динамическом диапазоне интенсивностей излучения открывают огромные перспективы использования светоизлучающих диодов на основе этих структур в качестве источников света для различных устройств.

2. Методика измерения

Для того чтобы проанализировать изменения основных светотехнических и электрофизических характеристик светодиодов GaP подвергнутые влиянию термического отжига после воздействия быстрыми нейтронами, проводилась в несколько этапов. На основании полученных измерений делались выводы, как термический отжиг влияет на светодиоды подвергнутые воздействию быстрыми нейтронами. После получения исследуемых светодиодов от руководителя, с исследуемых образцов снимались начальные характеристики, а именно ВАХ и ВтАХ. Всего было исследовано 16 светодиодов.

Далее анализ влияния облучения нейтронами на электрофизические характеристики СД. В заключении рассматриваем влияние термического отжига на ВАХ и ВтАХ СД.

1 партия: СД 8шт. Данные эксперимента приведены в таблицах 3.1, 3.2.

Таблица 2.1 Мощность облучения быстрыми нейтронами для партии 1

СД1, СД2, СД5, СД6	$F_n = 2 * 10^{12} \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2}$
СД3, СД4, СД7, СД8	$F_n = 5 * 10^{13} \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2}$

Таблица 2.2 Режимы термического отжига для партии 1

№ эксперимента	Время отжига, час	Температура отжига
1	0	T = +65°C
2	1	
3	2	
4	5	
5	7	
6	10	
7	25	
8	50	
9	100	

3. Анализ результатов исследования термического отжига светодиодов

В соответствие с изложенной выше методикой прежде всего рассмотрим характеристики СД до облучения

нейтронами.

3.1 Анализ характеристик исходных светодиодов

На рисунке 3.5 показана типичная ВАХ СД-1 и СД-2 до облучения нейтронами в линейных ординатах (а) и в двойных логарифмических координатах (б).

Из представленных результатов видно, что на ВАХ СД можно выделить область низкого и высокого токов (НТ и ВТ, соответственно). Характерной особенностью исследуемых СД является идентичность наклона ВАХ в области ВТ. При этом в области НТ наклон ВАХ СД-1 заметно превышает наклон ВАХ СД-2.

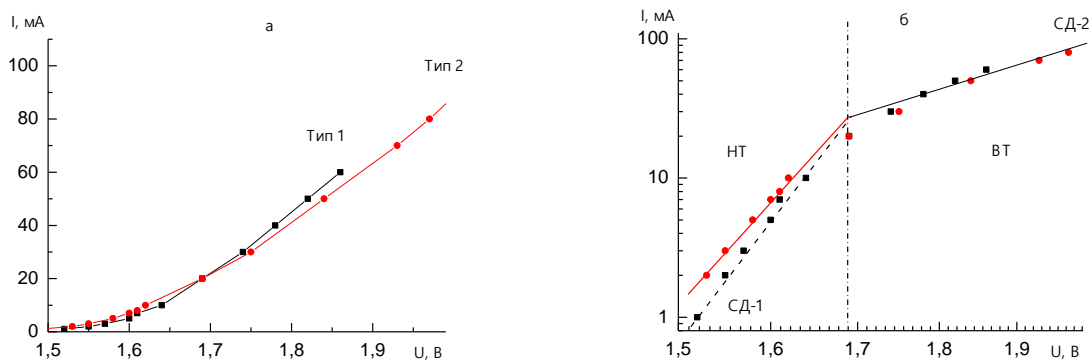


Рисунок 3.1 Типичная ВАХ СД исследуемых СД до облучения нейтронами

4. Обсуждение

Аналогично на ВАХ исходных СД до облучения выделены области НТ и ВТ (см. рисунок 3.5). Исследуемые СД заметно отличаются друг от друга. Для каждого типа характерен свой наклон как в области НТ, так и в области ВТ. Причина такого поведения ВАХ в данный момент непонятна.

5. Заключение

Подводя итоги, суммируем полученные результаты исследований влияния термического отжига на СД изготовленных на основе гетероструктур GaP подвергнутых воздействию быстрыми нейтронами.

В следствии выполненных исследований установлено, что при облучении нейтронами наблюдаемый сдвиг ВАХ СД в область более высоких токов.

Литература

1. Spagnolo, Giuseppe Schirripa. / LED Applications in Railway Signals: Wavelength and Intensity vs Temperature Variation [Text] / Giuseppe Schirripa Spagnolo, Donato Papalillo, Andrea Martocchia // Journal of Transportation Technologies. – 2012. – N 2. – P. 78-83.
2. Полупроводниковая лампа – источник освещения, альтернативный лампам накаливания и электролюминесцентным лампам [Текст] / В.Н. Гридин [и др.] // Компьютерная оптика. – 2009. – Т 32, №4. – С. 375-383.
3. Орлова, К.Н. Радиационные модели AlGaInP светоизлучающих диодов [Текст] / К.Н. Орлова, А.В. Градобоев. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. – 204с. ISBN: 978-5-9909463-2-3
4. Ерохин, С. Ю. Диоды на основе эпитаксиального фосфида галлия для высокотемпературной термометрии [Электронный ресурс] / С.Ю. Ерохин и др. // Журнал радиоэлектроники. – 2007. – № 11.
5. Коган Л. М. Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов //Новости светотехники. – 2001. – №. 7-8. – С. 34-35.
6. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. – Физматлит, 2008.
7. Chang M. H. et al. Light emitting diodes reliability review //Microelectronics Reliability. – 2012. – Т. 52. – №. 5. – С. 762-782.
8. Craford M. G. LEDs for solid state lighting and other emerging applications: status, trends, and challenges //Fifth International Conference on Solid State Lighting. – International Society for Optics and Photonics, 2005. – Т. 5941. – С. 594101.

Стабилизация параметров светодиодов среднего инфракрасного диапазона для оптоэлектронных устройств

Авторы:

Жураева, Гулноза Фазлитдиновна¹

Старший преподаватель

Ферганского государственного технического университета
gulnozajorayeva1984@gmail.com

Эргашев Шохбозжон Умарали ўгли²

Старший преподаватель

Ферганского государственного технического университета
ergashevshoh1992@gmail.com

Аннотация

В работе рассматриваются проблемы нестабильности параметров светодиодов среднего инфракрасного диапазона (2-5 мкм), используемых в современных оптоэлектронных технологиях для неразрушающего контроля, медицинской диагностики и газоанализа. Анализируются основные причины изменений характеристик светодиодов, включая термическую нестабильность, деградацию активной области и влияние внешней среды. Проведён экспериментальный анализ температурной зависимости излучательного потока, показавший значительные колебания параметров в диапазоне температур +10...+80 °С. Для повышения стабильности предложен двухволновой метод с применением схемы обратной связи и аналоговой памяти, обеспечивающий равенство начальных опорных и измерительных потоков излучения.

Разработанная схема позволяет эффективно компенсировать временные и температурные отклонения, что улучшает метрологические характеристики оптоэлектронных систем. Полученные результаты имеют важное практическое значение для создания надёжных и точных приборов среднего ИК-диапазона и открывают перспективы для дальнейшего совершенствования методов активной стабилизации.

Ключевые слова: оптоэлектроника, светодиод, стабильность, прибор, измерение, контроль, аналоговая память.

Введение

Средний инфракрасный (ИК) диапазон (длина волны 2-5 мкм) приобретает всё большее значение в развитии современных оптоэлектронных технологий. Светодиоды, работающие в этом спектральном диапазоне, находят применение в различных областях: от неразрушающего контроля и медицинской диагностики до газоанализа и сенсорных систем окружающей среды. Одним из ключевых требований к таким приборам является высокая стабильность параметров в процессе длительной эксплуатации, поскольку она определяет точность, надёжность и воспроизводимость результатов измерений [1]. Несмотря на значительный прогресс в разработке материалов и конструкций ИК-светодиодов, стабильность их параметров остаётся одной из наиболее острых научно-технических проблем. Параметры излучения подвержены изменениям как под воздействием внешней среды (температура, влажность), так и вследствие внутренних деградиационных процессов. Особенно чувствительны к нестабильности оптоэлектронные системы, работающие в составе измерительных и диагностических комплексов, где метрологические характеристики напрямую зависят от излучателя [2].

К числу факторов, вызывающих нестабильность характеристик ИК-светодиодов, относятся [3-4]:

- термическая нестабильность, приводящая к сдвигу спектра излучения и снижению мощности;
- деградация активной области полупроводниковой структуры;
- изменения токово-напряжностных характеристик;
- влияние внешней среды (влажность, механическое воздействие, химические реагенты).

Кроме того, на долговременную стабильность влияют режимы эксплуатации, качество теплового отвода и эффективность упаковки.

Стабильность параметров излучения светодиодов напрямую влияет на точность измерения концентраций газов в системах ИК-газоанализа, воспроизводимость диагностических сигналов в медицине и надёжность оптических каналов связи в условиях переменной среды. Нестабильность может вызывать систематические ошибки и приводить к снижению чувствительности и селективности сенсоров [5]. Поэтому необходима разработка комплексных подходов к метрологическому обеспечению, включая калибровку, мониторинг параметров и корректировку отклонений в реальном времени.

Для повышения стабильности ИК-светодиодов предлагаются следующие подходы:

- использование новых материалов с высокой термической стабильностью;
- внедрение интегрированных температурных стабилизаторов;
- усовершенствование конструктивных решений (например, гетероструктуры на основе InAsSb или InAs/GaSb);
- применение методов активной коррекции параметров (обратная связь, терморегулирование);
- автоматизированный контроль деградации с использованием эталонных характеристик.

Разработка новых подходов к стабилизации параметров светодиодов среднего инфракрасного диапазона и исследование их влияния на характеристики оптоэлектронных устройств неразрушающего контроля представляют собой актуальное научное направление, обладающее значительным потенциалом новизны и практической значимости.

Методы стабилизации параметров светодиодов средней ИК-области

Основными недостатками светодиодов средней инфракрасной области являются временная и температурная нестабильность ключевых параметров. Температура р–п-перехода является критическим фактором, влияющим на эксплуатацию светодиодов в оптоэлектронных системах автоматического контроля.

Работа светодиода обусловлена протеканием электрического тока через р–п-переход полупроводникового кристалла и рекомбинацией носителей зарядов. Как показано в ряде исследований [6], коэффициент полезного действия (КПД) светодиода не обеспечивает стабильную работу гетероструктуры без выделения тепла. В типовом светодиоде большая часть потребляемой электрической энергии преобразуется в тепло, при этом КПД составляет порядка 10–12 %. Помимо температуры окружающей среды, существенное влияние на параметры светодиода оказывает внутренний нагрев кристалла, который накладывается на внешние температурные воздействия. Величина внутреннего нагрева напрямую пропорциональна потребляемой электрической мощности, что формирует сложную температурную характеристику светодиода, учитывающую совокупность внешних и внутренних факторов.

Экспериментальные исследования нестабильности излучательного потока светодиодов средней ИК-области проводились в температурном диапазоне от +10 °С до +80 °С. Нестабильность излучательного потока рассчитывалась по формуле:

$$\Delta F_T = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}}{\bar{F}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Рассмотрены следующие параметры, определяющие нестабильность основных характеристик светодиодов средней ИК-области:

- излучательная мощность;
- длина волны излучения;
- интенсивность излучения;
- поток излучения.

Полученные данные по температурной нестабильности излучательного потока светодиодов в диапазоне +10 °С – +80 °С представлены в таблице 1.

Таблица – 1. Нестабильность потока излучения
светодиодов средней ИК – области

Тип <i>СД</i>	Длина волны, <i>мкм</i>	Ток <i>СД</i> , <i>мА</i>	Время наработки, <i>ч</i>	Температурный диапазон, °С	ΔF , %
LED 19	1.94	50	12 000	+20...+60	6.50
LED 22	2.2	50	12 000	+20...+60	7.25
LED 34	3.39	50	12 000	+20...+60	6.80
LED 15	1.55	50	12 000	+20...+60	6.59

Технологий стабилизации параметров светодиодов среднего ИК-диапазона

Основу оптоэлектронных устройств, функционирующих на базе полупроводниковых излучателей, составляет наличие светодиода, оптически связанного с фотоприемником через контролируемую среду. Излучение, формируемое светодиодом, проходит через заданную среду и регистрируется фотоприемным элементом. В подобных устройствах оптическое излучение выступает в качестве информационного носителя. Это излучение характеризуется высокой помехоустойчивостью, так как не создает электромагнитных помех и, одновременно, не подвержено их воздействию [7].

Указанные свойства, а также конструктивная и технологическая простота реализации, создают предпосылки для активного развития оптоэлектронных устройств различного назначения, основанных на применении инфракрасного (ИК) излучения.

В оптоэлектронных измерительных системах точность измерений может существенно снижаться из-за ряда факторов, включая влияние влажности, рассеяние излучения в исследуемом веществе, его толщину и другие параметры. Для компенсации указанных погрешностей применяется двухволновой метод измерений, основанный на сравнении потоков излучения на двух различных длинах волн.

Потоки излучения, прошедшие через контролируемый объект, могут быть описаны следующими выражениями:

$$\begin{cases} F_{\lambda 1} = \gamma_{\lambda 1} \cdot F_{0\lambda 1} \\ F_{\lambda 2} = \gamma_{\lambda 2} \cdot F_{0\lambda 2} \cdot e^{-km} \end{cases}$$

где: $\gamma_{\lambda 1}, \gamma_{\lambda 2}$ – коэффициенты пропускания опорной и измерительных длинах волн, k – коэффициент поглощения, m – масса влаги.

$$\text{Пусть } F_{\lambda 1} = A \cdot e^{-t/\tau} \text{ тогда } \begin{cases} F_{\lambda 1} = \gamma_{\lambda 1} \cdot A \cdot e^{-t/\tau} \\ F_{\lambda 2} = \gamma_{\lambda 2} \cdot F_{0\lambda 2} \cdot e^{-km} \end{cases}$$

В момент сравнения потоков излучения опорной и измерительной длины волны, т.е. $F_{\lambda 1} = F_{\lambda 2}$ или $\gamma_{\lambda 1} \cdot A \cdot e^{-t/\tau} = \gamma_{\lambda 2} \cdot F_{0\lambda 2} \cdot e^{-km}$, обычно $\gamma_{\lambda 1} = \gamma_{\lambda 2}$, тогда $m = -\frac{1}{K \cdot \tau}$. т.е. масса влаги контролируемого объекта пропорционально сравнению временных интервалов.

Таким образом, измерение временного интервала t , при котором потоки излучения на опорной и измерительной длинах волн становятся равными, позволяет определить массу влаги в исследуемом объекте. Это делает двухволновой метод эффективным инструментом для бесконтактного измерения влажности с высокой степенью точности.

Разработанный двухволновой оптоэлектронный метод позволяет исключить температурные и временные нестабильности параметров светодиодов средней ИК-области, используемых в оптоэлектронных устройствах. Однако необходимо обеспечить равенство начальных измерительных и опорных потоков излучения светодиодов.

Для этого разработана блок-схема (рис. 1), предназначенная для обеспечения равенства начальных опорных и измерительных излучательных потоков, что определяет точность измерений в двухволновом оптоэлектронном устройстве. Здесь задающий генератор (1) вырабатывает импульсы с необходимой частотой повторения, которые поступают на вход делителя импульсов (2). С выхода делителя импульсов прямоугольные импульсы подаются соответственно на входы первого (3) и второго (4) электронных ключей, выходы которых подключены к светодиодам на опорной (5) и измерительной (6) длинах волн. В электрическую цепь дополнительно введён фотоприёмник (7) для реализации оптической обратной связи. Электрический сигнал с выхода фотоприёмника поступает на вход аналоговой памяти (8), выход которой соединён с источником опорного напряжения (9). Выходы источника опорного напряжения связаны с первым (10) и вторым (11) регуляторами.

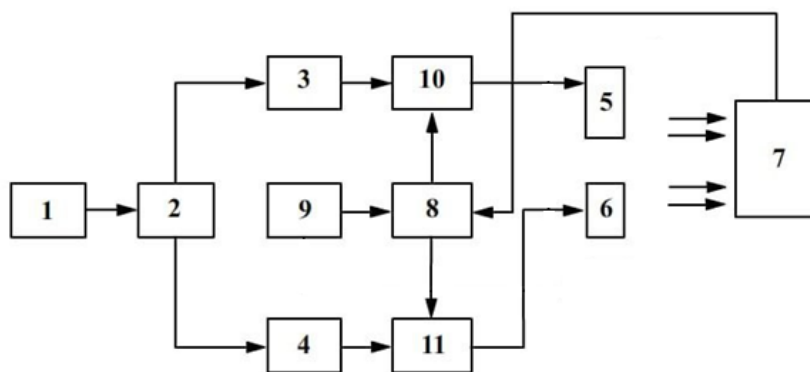


Рис 1. Блок-схема для обеспечения равенства начальных опорных и измерительных излучательных потоков, где: 1—задающий генератор, 2 — делитель импульсов, 3 — первый электронный ключ, 4 — второй электронный ключ, 5 — светодиод на опорной длине волн, 6 — светодиод на измерительной длине волн, 7 — фотоприёмник, 8 — аналоговая память 9 — источник опорного напряжения, 10 — первый регулятор, 11 — второй регулятор.

В измерительную схему интегрирован дополнительный фотоприёмник с отрицательной оптической обратной связью (7), выходные сигналы которого поступают на вход аналоговой памяти (8). На начальном этапе измерительного цикла аналоговая память фиксирует и удерживает уровни начальных оптических потоков светодиодов, соответствующих измерительной и опорной длинам волн, до завершения цикла.

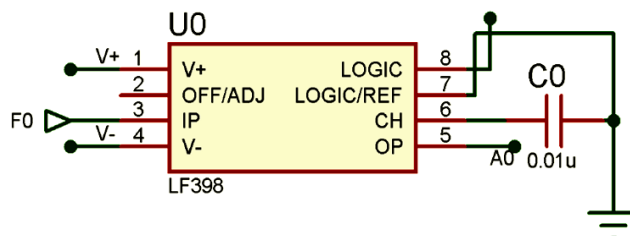


Рис. 2. Принципиальная схема аналоговой памяти

Где: U0 — порядковый номер микросхемы LF398, F0 — входной аналоговый сигнал, который необходимо запомнить, V+, V- — питание микросхемы, OFF/ADJ — управляющий вход, куда подключён сигнал «начало цикла», посредством которого уровень сигнала, полученного по входу F0, запоминается в течение всего периода измерительного цикла, LOGIC — сигнал отключения и включения выхода микросхемы, позволяющий исключить влияние выхода в начале цикла, во время измерения в нулевом такте. Управление режимом удержания реализовано через управляющий сигнал «Начало цикла», подаваемый на управляющий вход микросхемы OFF/ADJ. В течение всего измерительного цикла выходные сигналы аналоговой

памяти используются для формирования управляющих напряжений, которые подаются на регуляторы измерительного и опорного каналов (рисунок 2). Данный механизм обеспечивает стабилизацию оптических потоков светодиодов 5 и 6, поддерживая их работу в заданных диапазонах длин волн и обеспечивая соблюдение условия равенства начальных уровней излучения.

Заключение

В данной работе рассмотрены основные причины нестабильности параметров светодиодов среднего инфракрасного диапазона, включая термическую нестабильность, деградацию активной области и влияние внешних факторов. Проведён анализ температурной зависимости излучательного потока, подтверждающий необходимость комплексных методов стабилизации для обеспечения высокой точности и надёжности оптоэлектронных устройств.

Разработанный двухволновой оптоэлектронный метод с использованием схемы обратной связи и аналоговой памяти позволяет эффективно компенсировать временные и температурные колебания параметров светодиодов, обеспечивая равенство начальных опорных и измерительных излучательных потоков. Это существенно повышает метрологические характеристики систем неразрушающего контроля и диагностических комплексов, использующих средне инфракрасные светодиоды.

Полученные результаты имеют практическую значимость для создания стабильных и долговечных оптоэлектронных приборов в различных областях, включая медицинскую диагностику, газоанализ и сенсорные технологии.

В дальнейшем планируется совершенствование конструктивных решений и расширение спектра применяемых методов активной стабилизации.

Таким образом, проведённое исследование вносит вклад в развитие современных технологий стабилизации параметров светодиодов среднего ИК-диапазона и способствует повышению эффективности и точности оптоэлектронных систем.

Литература

1. Иванов И.И., Петров П.П. Исследование эффективности светодиодов в среднем ИК-диапазоне // Журнал оптоэлектроники. 2019. Т. 35, № 4. С. 57–65.
2. Сидоров А.А., Кузнецова М.В. Влияние температуры на характеристики InAsSb гетероструктур // Физика полупроводников. 2020. Т. 54, № 3. С. 691–694.
3. Беляев В.В., Михайлова Н.Н. Методы стабилизации ИК-светодиодов в газоанализаторах // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 2. С. 42–44.
4. Ковалев Ю.С., Новиков Д.Д. Терморегулирование в оптоэлектронных устройствах // Электроника и связь. 2020. Т. 45, № 1. С. 58–60.
5. Смирнов В.И., Орлов С.С. Коэффициент полезного действия ИК-светодиодов // Техническая физика. 2018. Т. 63, № 7. С. 112–113.
6. Захаров А.Н., Федорова Е.А. Анализ деградационных процессов в полупроводниковых светодиодах // Вестник науки и техники. — 2017. Т. 29, № 5. С. 69–72.
7. Kuldashov O.Kh., Kuldashov G.O., Mamasodikova Z.Y. Infrared sensor for remote monitoring of moisture content in raw cotton // J. Opt. Technol. 2019. № 6. P. 77 - 80.

Исследование диэлектрической проницаемости горных пород в диапазоне частот 20 МГц – 2 ГГц

Цветков Максим Олегович
Спирин Олег Викторович
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
E-mail: mo.tsvet@mail.ru

На сегодняшний день метод георадиолокации активно используется для решения широкого круга геологических и инженерно-геологических задач [1]. Однако, большое разнообразие условий применения георадара порождает широкий диапазон электрических свойств исследуемых объектов, что в ряде случаев затрудняет параметризацию зондируемых сред и приводит к снижению достоверности интерпретации данных. Основные параметры, определяющие распространение георадарного сигнала – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость (ДП) и удельная электропроводность, обобщающий диапазон которых для горных пород можно найти в базовых трудах по методу георадиолокации [2,3,4]. Тогда как для пересчета временного разреза в глубинный зачастую требуется точное значение ДП для определения скорости отдельных типов грунтов, геологических горизонтов или фаций. Кроме косвенных способов, таких как калибровка на скважинах или шурфах, или подбора гиперболы дифрагированной волны, наиболее очевидным методом нахождения электрических параметров является петрофизическое исследование образцов. Как правило подобные измерения выполняются в специальных ячейках, которые позволяют симитировать прохождение электромагнитной волны через образец с учетом частотного диапазона и возможных потерь. Для измерений в первую очередь подходят высокочастотные нерезонансные методы, позволяющие определить диэлектрическую проницаемость исследуемого образца через коэффициент отражения (S_{11}) или пропускания (S_{21}), регистрируемые при помощи векторного анализатора в частотной области [5]. Наиболее широкое распространение данный подход получил для изучения образцов рыхлых грунтов [6,7,8].

В свою очередь, исследования ДП кристаллических горных пород различных типов выполнены в гораздо меньшем объеме. Известно, что для таких пород характерно увеличение ДП от основных и ультраосновных к кислым, отмечается влияние рудной минерализации, а также макроанизотропии, вызванной трещинами и ориентацией минералов [9]. Например, изучение образцов гранитов, гнейсов и сиенитов в коаксиальной ячейке показало изменчивость ДП в интервале 4–8 [10]. Наибольший диапазон вариаций наблюдался для диапазона частот 0.2–1.0 ГГц. На сегодняшний день, закономерности изменений ДП (ϵ^*) и электропроводности (σ) в зависимости от минеральных и структурно-текстурных особенностей горных пород в георадарном диапазоне частот еще недостаточно изучены. Развитие данного направления особенно актуально в связи с применением георадиолокации на месторождениях природного камня из кристаллических горных пород для описания трещиноватости и других неоднородностей [11,12,13]. В связи с чем в этом исследовании рассмотрены способы определения ДП образцов кристаллических горных пород в ячейках разных конструкций в диапазоне частот 1 ГГц–1.5 ГГц, с целью нахождения оптимального способа измерений искомого параметра. Предполагается, что лабораторное определение ДП может повысить достоверность георадарных исследований скальных массивов. Исследование ДП образцов емкостным методом является достаточно простым и надежным способом. Данный метод успешно применялся для оценки содержания влаги в каменных строительных блоках [14]. Однако он имеет свои ограничения, в первую очередь частотные. В качестве измерительной установки используются измерители иммитанса (устройства, предназначенные для определения параметров полного сопротивления или полной проводимости электрической цепи). Данные приборы, как правило, работают в частотном диапазоне от 1 ГГц до 10–15 МГц, что существенно ниже диапазона метода георадиолокации. Для исследования ДП был изготовлен образец в виде пластины с геометрическими размерами 70×30×4 мм, на которую с двух противоположных сторон наклеивался медный скотч толщиной 0.06 мм. К скотчу припаивались медные проводники для проведения измерений.

Для снятия показаний использовался измеритель иммитанса «МНИПИ Е7-20». Проводились замеры модуля комплексного сопротивления (Z) и угла фазового сдвига комплексного сопротивления (ϕ) образца в диапазоне частот от 25 ГГц до 1 МГц (максимальный частотный диапазон прибора). Для расчета действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости использовались формулы (1) и (2) соответственно.

$$\epsilon' = \frac{-\sin(\phi(\omega))}{\omega C_0 |Z(\omega)|} \quad (1)$$

$$\epsilon'' = \frac{\cos(\phi(\omega))}{\omega C_0 |Z(\omega)|} \quad (2)$$

где ω – циклическая частота, рад/с, C_0 – геометрическая емкость, Φ , рассчитанная по формуле (3).

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (3)$$

где S – площадь поверхности образца в м², d – толщина в мм, ϵ_0 – электрическая постоянная, равная 8.854×10^{-12} Ф/м.

Также был определён тангенс угла диэлектрических потерь (4).

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4)$$

Измерение ДП образца подобным методом невозможно на частотах свыше 1 МГц, поскольку начинает

сказываться частотная ограниченность измерителя иммитанса, однако все же результаты позволяют рассчитать действительную и мнимую части ДП в низкочастотной области. Поскольку эффективность работы емкостной ячейки не позволяет оценить ДП образцов в полном диапазоне частот, далее была изготовлена ячейка полоскового типа.

Для преодоления недостатков, возникающих в емкостной ячейке, была изготовлена ячейка полоскового типа. В качестве измерительного устройства используется векторный анализатор цепей (прибор для анализа и измерения характеристик электрических цепей). Рабочий диапазон частот таких приборов составляет от нескольких кГц до более 3 ГГц. Предварительно было проведено моделирование полосковой ячейки в программе «Ansoft HFSS», что позволило определить оптимальные размеры измерительной ячейки. Сконструированная ячейка состоит из 2 алюминиевых пластин с геометрическими размерами $40 \times 40 \times 2$ мм, между которыми помещается исследуемый образец горной породы с размерами $40 \times 40 \times 6$ мм. К алюминиевым пластинам прикручен высокочастотный латунный SMA-разъем (приемный/передающий порт). Для снятия показаний используется векторный анализатор цепей «LiteVNA 64». Связь между векторным анализатором цепей и полосковой ячейкой осуществляется с помощью высокочастотного коаксиального кабеля со строго выверенным внутренним сопротивлением 50 Ом. С векторного анализатора снимались показатели модуля комплексного сопротивления (Z) и угла фазового сдвига комплексного сопротивления (φ) образца в диапазоне частот от 30 МГц до 500 МГц. Расчеты ДП действительной и мнимой частей, а также тангенса угла диэлектрических потерь проводились согласно формулам (1), (2) и (3).

Полученные данные с емкостного и полоскового варианта исполнения показали, что для работы в георадарном диапазоне частот (до 2 ГГц) необходима более совершенная ячейка закрытого типа для исключения рассеивания поля во внешнюю среду и исключения влияния границ. В связи с этим возникла необходимость в разработке ячейки с плавной геометрией. На первом этапе также было проведено математическое моделирование в «Ansoft HFSS» для определения оптимальной геометрии рупорной ячейки и образца. В ходе моделирования были подобраны оптимальные геометрические размеры для её эффективной работы в широкой полосе частот. Теоретические расчеты коэффициента отражения в диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц подтвердили предполагаемую эффективность конструкции. Разработанная ячейка состоит из 3 основных частей: внешний конус, центральной жилы и крышки, в которую помещается исследуемый образец. Она имеет высоту 120 мм, внешний диаметр 50 мм и внутренний 30 мм для исследуемых образцов. Все элементы выполнены из немагнитного материала – бронзы. Внешний конус внутри имеет зеркальную полировку для равномерного распространения электрического поля. Внутренняя жила служит плавным переходом от тонкого конца латунного разъема к широкой части жилы, которая прижимается к образцу. К внешнему конусу прикручен высокочастотный латунный SMA-разъем, к которому подключается векторный анализатор цепей «Agilent E5071C» через коаксиальный провод. Исследуемые образцы изготавливаются в виде цилиндров диаметром 30 мм и высотой 20 мм. Проводятся измерения параметров модуля комплексного сопротивления (Z) и угла фазового сдвига комплексного сопротивления (φ) образца в диапазоне частот от 30 МГц до 2 ГГц. Расчет ДП проводится в среде «MathCad», поскольку это позволяет решать сложные системы уравнений с двумя неизвестными и значительно ускоряет процесс вычислений. В уравнениях также учитывается геометрия самой ячейки, ее краевые эффекты и другие дисперсионные явления, возникающие в результате распространения поля.

Для оценки достоверности работы полосковой и рупорной ячеек проведены расчеты действительной части ДП образца тефлона с известной диэлектрической проницаемостью, равной 2.5. Результаты показали эффективность работы ячеек в теоретически определенном диапазоне частот. Были построены графики изменения действительной и мнимой частей ДП, а также тангенса угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот для образцов горных пород различных типов на ячейках трех типов. На рисунке 1 приводится пример для образца габбро (магматическая горная порода основного состава, содержащая до 50% кремнезёма).

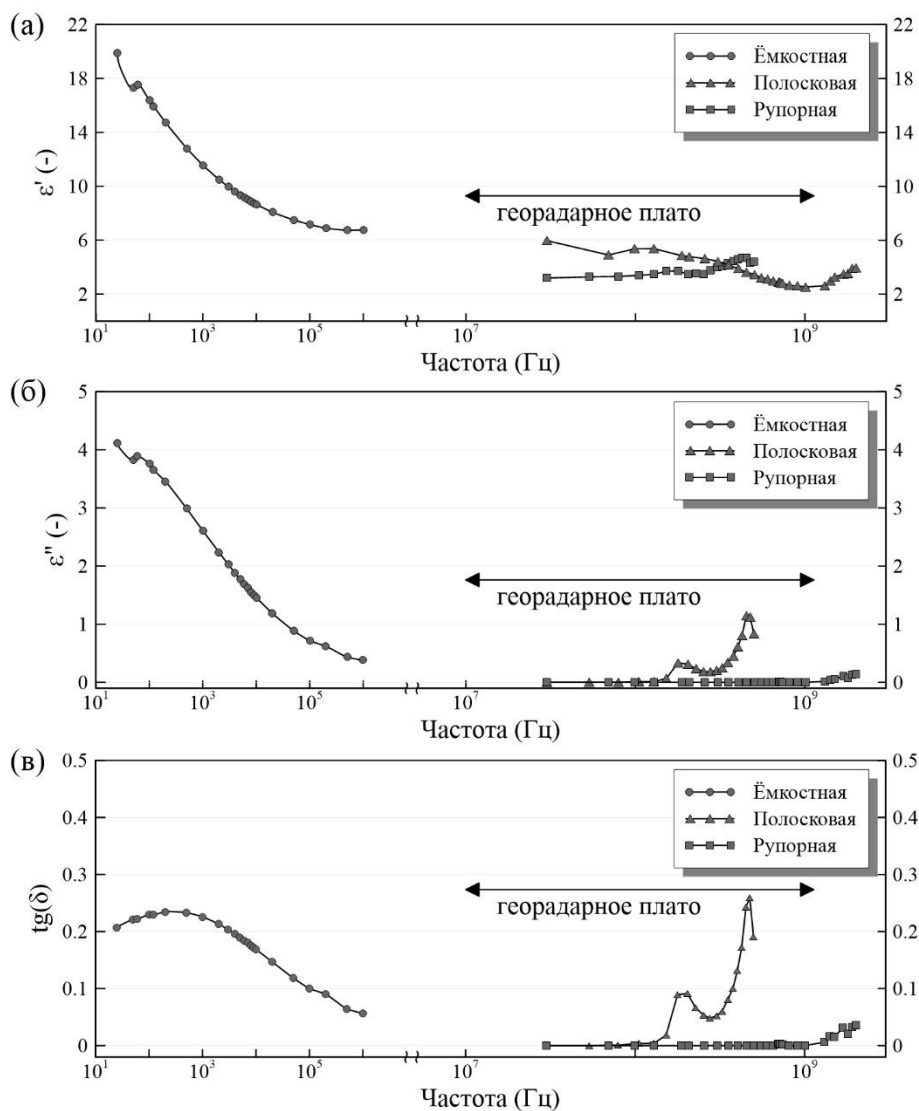


рис. 1. Графики зависимости действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей ДП, а также тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}(\delta)$) для трех типов ячеек.

По полученным данным видно, что ёмкостная ячейка не подходит для параметризации георадарных данных. Наблюдается завышение уровня ДП даже в относительно стабильной мегагерцовой части спектра, тогда как в области более низких частот поле приобретает диффузионный характер [3]. Также этот результат подчёркивает слабую применимость показателей ДП для метода георадиолокации из литературных источников, где использовались подобные способы измерений и частотный диапазон, например, [9]. В свою очередь полосковая и рупорная ячейки для «георадарного плато» продемонстрировали схожие результаты по уровню ϵ' . Расхождение ДП для образца габбро между значениями на частотах менее 100 МГц составляло 2.5 и постепенно стало практически эквивалентно на частоте 330 МГц. Однако анализ ϵ'' продемонстрировал иную картину. Для полосковой ячейки мнимая часть имеет выраженный характер, это вероятно связано с шероховатостью поверхности образца на контакте с пластинами. Данный эффект наблюдается и для $\text{tg}(\delta)$. Тогда как рупорная ячейка имеет около нулевой уровень ϵ'' и $\text{tg}(\delta)$. Можно сделать вывод о правомерности использования только действительной части ДП, полученной в рупорной ячейке, для оценки сухих образцов кристаллических горных пород. Однако во влажном состоянии при вариациях минерализации поровой влаги ситуация может измениться, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований. Кроме того, вызывает интерес снижение ДП с 6 начиная с частоты 30 МГц до 2.5 на частоте 1 ГГц. Это может быть следствием влияния некоторой минеральной компоненты габбро, например, рудных минералов, или же такой тренд характерен для магматических пород. Также нельзя исключать влияние оборудования – модуляции сигнала, вызванная неточностью векторного анализатора. В ходе работы также были проведены исследования ДП других кристаллических горных пород – сиенитов и мрамора. Результаты измерений также показали высокую эффективность рупорной ячейки для исследования электрофизических параметров образцов.

По итогу экспериментальных исследований было обосновано и сконструировано несколько вариантов ячеек для исследования ДП образцов горных пород. Каждая представленная ячейка обладает своими преимуществами и недостатками, однако наиболее эффективной является ячейка рупорного типа, поскольку она позволяет проводить измерения ДП с высокой точностью в георадарном диапазоне частот. Дальнейшее использование такой ячейки позволит более подробно исследовать влияние минералогического состава, текстурно-структурных

особенностей и уровня водонасыщения горных пород на регистрируемые электрофизические параметры. При этом остается проблема неоднозначности уровня ДП в краевых частях «георадарного плато», которую в перспективе следует принимать во внимание при работе с антенными блоками с разной частотой. В целом, полученные результаты еще раз подчеркивают важность параметризации среды для повышения достоверности изысканий методом георадиолокации.

Список публикаций:

- [1] Lombardi, F., Podd, F., Solla, M. From its core to the niche: Insights from GPR applications // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14, No. 13. – 3033.
- [2] Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие. – М.: ГЕОС, 2017. – 240 с.
- [3] Annan, A.P. Ground-Penetrating Radar / In: D.K. Butler (Ed.). *Near-Surface Geophysics*. – 2005. – Pp. 357–438.
- [4] Cassidy, N.J. Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids / In: H.M. Jol (Ed.). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. – 2009. – Pp. 41–72.
- [5] Chen, L.F., Ong, C.K., Neo, C.P., Varadan, V.V., Varadan, V.K. *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. – Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – 549 p.
- [6] Бобров, П.П., Беляева, Т.А., Крошка, Е.С., Родионова, О.В. Определение влажности образцов почв диэлектрическим методом // *Почвоведение*. – 2019. – № 7. – С. 859–871.
- [7] Родионова, О.В. Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов в широкой полосе частот: дисс. ... кандидата физико-математических наук: 01.04.03. – Омск: ОмГПУ, 2016.
- [8] Bobrov, P.P., Repin, A.V., Rodionova, O.V. Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Properties Measurements // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 53, № 5. – Pp. 2366–2372.
- [9] Пархоменко, Э.И. Электрические свойства горных пород. – Москва: Наука, 1965. – 164 с.
- [10] Sambuelli, L., Godio, A., Guo, T.J., Socco, L.V. Laboratory Determination of the Dielectric Permittivity of Building Stones in the 0.2–6 GHz Band // *Proceedings of the 4th EEGS Meeting*. – European Association of Geoscientists & Engineers, 1998. – Pp. 477–480.
- [11] Данильев, С.М., Данильева, Н.А., Исакова, Е.П., Ашкар, Г.Х. Исследование трещиноватости на месторождении облицовочного камня с привлечением метода георадиолокации // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331, № 9. – С. 140–145.
- [12] Luodes, H. Ground penetrating radar and assessment of natural stone / *Geological Survey of Finland, Report of Investigation 223*, 2015. – 46 p.
- [13] Rey, J., Martínez, J., Vera, P., Ruiz, N., Cañadas, F., Montiel, V. Ground-penetrating radar method used for the characterisation of ornamental stone quarries // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 77. – Pp. 439–447.
- [14] Zhao, J.H., Rivera, E., Mufti, A., Stephenson, D., Thomson, D.J. Evaluation of dielectric-based and other methods for moisture content measurement in building stones // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. – 2012. – Vol. 2. – Pp. 137–148.

Автоматизированная система управления высокотемпературным нагревателем

Чернышев Дмитрий Витальевич
Томский государственный университет
E-mail: XchernyshevX@mail.ru

Разработка автоматизированной системы управления высокотемпературным нагревателем направлена на создание экономичного решения для проведения исследований электрофизических и газочувствительных свойств материалов при температурах до 1000°C с возможностью контроля газовой среды. Актуальность работы обусловлена необходимостью замены ручного управления уже имеющийся измерительной установки, требующей постоянного присутствия оператора, а также значительным снижением затрат по сравнению с коммерческими аналогами, такими как установки Nextron стоимостью около пяти миллионов рублей. Основу системы составляет нагревательная камера из нержавеющей стали с двойными стенками (рис.1). В качестве нагревательного элемента используется нихромовая проволока, способная работать при температурах до 1100°C, а для измерения температуры применяется термопара S-типа (платина-платинародий) с диапазоном измерений от 0 до 1600°C. Управление системой осуществляется с помощью платы Arduino на базе микроконтроллера ATmega328P, который обеспечивает обработку сигналов, управление ШИМ-выходами и взаимодействие с другими компонентами.

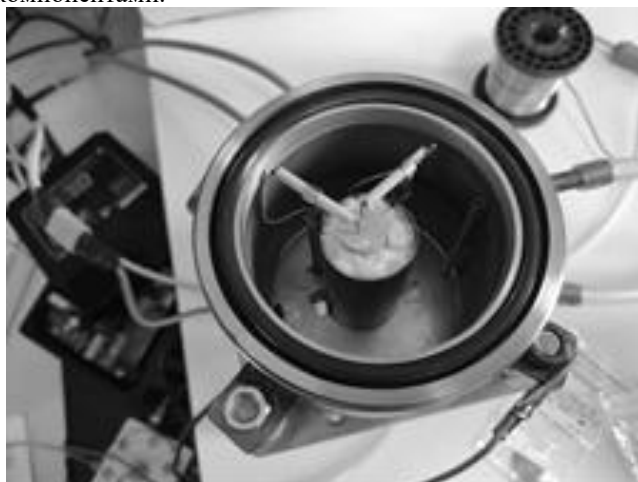


рис.1 Нагревательная камера

Для преобразования сигналов термопары используется микросхема MCP9601, обеспечивающая точность измерений до $\pm 0.5^\circ\text{C}$ благодаря 18-битному АЦП и наличию встроенных цифровых фильтров. Управление блоком питания MAISHENG MP1560D реализовано через ШИМ-сигнал, подаваемый на вход потенциометра, что заменяет ручную регулировку. Контроль газовой среды осуществляется с помощью регулятора расхода газа Bronkhorst, управляемого через интерфейс RS232 с использованием ПК и программной среды LabVIEW.

Программная часть системы выполнена в среде разработки LabVIEW с использованием библиотеки LINUX для удаленной работы с платой Arduino. Ключевыми компонентами программы являются алгоритмы управления блоком питания, необходимые для реализации плавного нагрева. Процесс нагрева разделен на две части: линейный алгоритм, путем накопления ошибки со временем, обеспечивает плавный нагрев до температуры близкой к заданной; ПИ-регулятор, компенсирующий инерционность системы в близи заданной температуры.

На текущем этапе работы выполнен анализ компонентной базы, сборка макетов, а также разработка алгоритмов управления и виртуальных приборов в LabVIEW.

Перспективы работы включают интеграцию всех подсистем в единый комплекс, отладку управления газовой средой и температурой, а также проведение экспериментов с материалами.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-79-10043-П.

Разработка технических требований к аппаратуре контроля и управления испытательным стендом аттестации отопительных котлов

Юрченко Владислав Владимирович
Юрченко Алексей Васильевич
Томский политехнический университет
E-mail: jurchenkovv@bk.ru

Развитие технологий в области энергетики требует постоянного совершенствования и оптимизации процессов производства энергии. Одним из ключевых направлений является использование твердого топлива в котельных установках. Твердотопливные котлы являются важным источником тепловой энергии в различных отраслях промышленности, а также для обеспечения теплоснабжения населенных пунктов. Уголь обладает несколькими важными преимуществами: он производится в нашей стране, что делает его доступным и экономичным. Угольные котлы являются предпочтительным выбором для отопления, предоставляя приемлемую альтернативу. Уголь обладает высокой теплотворностью и удобен в использовании. Одна закладка угля обеспечивает длительный период горения, превосходящий время сгорания дров или древесного угля. Современные угольные котлы могут использовать как каменный, так и бурый уголь. Применяемые угольные котлы бывают традиционные с ручной загрузкой, имеющие низкий КПД и высокий уровень сажи, в то время как пиролизных котлах применяется механическая подача топлива с подачей воздуха вентилятором, что позволяет повысить температуру сгорания, уменьшить выбросы и увеличить время до следующей загрузки.

Для разработки технических требований к испытательному стенду необходимо рассмотреть парк применяемых и вновь разрабатываемых котлов по мощности и производительности, а также их потребность на ближайшие 5-10 лет.

Проведение сертификации котлов на твердом топливе имеет несколько преимуществ и положительных аспектов, включая:

- 1) **Гарантия безопасности:** Сертификация гарантирует, что котлы на твердом топливе соответствуют определенным нормам безопасности и стандартам, что важно для защиты окружающей среды и обеспечения безопасности пользователя[32].
- 2) **Качество и производительность:** Сертификация подтверждает, что котлы соответствуют определенным стандартам качества и производительности, обеспечивая эффективное и надежное функционирование.
- 3) **Соблюдение экологических стандартов:** Сертификация может требовать от производителей котлов на твердом топливе соблюдения определенных экологических стандартов, что помогает снизить негативное воздействие на окружающую среду.
- 4) **Доступ к рынкам:** Сертификация может быть необходима для доступа к определенным рынкам или для участия в государственных или частных закупочных программах.
- 5) **Доверие потребителей:** Сертификация может увеличить доверие потребителей к продукции, так как она подтверждает соответствие продукции определенным стандартам и требованиям.

Так как испытательных стендов по контролю параметров отопительных котлов не существуют в настоящее время ни в России, ни в Казахстане, то это будет настоящим прорывом в области контроля при изготовлении котлов. Проверка соответствия заявленных параметров котлов отопления большой мощности может быть осуществлена при помощи испытательного стенда.

Стенд должен обеспечивать контроль параметров, рассмотренных в предыдущем разделе.

Стенд представляет собой помещение, размером, не менее 60х15х4 м, где должны быть расположены места для установки испытываемых котлов для различных мощностей, которые должны подключаться к :

- устройствами отвода отходящих газов и их очистки;
- устройствами отвода тепла от теплоносителя (градирни, при испытании котлов более 500 кВт);
- устройствами подачи воздуха в топку;
- устройствами подачи топлива в топку;
- устройствами подачи воды в системы отопления испытываемых котлов;
- автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора.

Испытательный стенд должен иметь автоматизированную систему контроля и управления. Для этого можно воспользоваться промышленным контроллером TREI-5B-05 производства РФ[10].

Данный контроллер обеспечивает сбор информации с 6000 точек сбора информации с передачей на сервер при помощи протоколов обмена Ethernet 10/100, Bluetooth, MODBUS со скоростью до 2,5 Мбод.

Контроллер имеет внутреннюю параллельную шину PT-BUS, которая позволяет наращивать число каналов ввода/вывода для модулей М900 с монтажом на стандартную DIN-рейку.

Возможна интеграция в качестве модулей расширения и интеллектуальных УСО в системы на базе контроллеров TREI-5B-04. Программное обеспечение контроллера имеет развитую систему диагностики и сервиса, а также полную библиотеку алгоритмов управления и регулирования.

Питание от +24 В получает от встроенного блока питания

Контроллер может работать при температуре окружающей среды от -60 до +60°C.

Основой контроллера является Мастер-модуль М911Е, который предназначен для сбора информации с модулей

ввода/вывода (серия M900 и W900), ее обработки и выдачи управляющих воздействий.

Состав системы контроля и управления испытательным стендом должна состоять из следующих основных блоков:

- на верхнем уровне – сервер, станция оператора и инжиниринговая станция;
- на нижнем уровне - промышленный контроллер TREI-5B-05 с модулями сбора информации, датчиков и исполнительных механизмов.

Заключение

Разработка и внедрение испытательного стенда в условиях Карагандинской области позволит улучшить качество изготавливаемых котлов, сократить предприятия, не имеющих соответствующих сертификатов на изготовление таких котлов, а также улучшить экологию района за счет качественного сгорания топлива.

Список использованных источников

1. Юрченко В.В., Юрченко А.В., Вавилова Г.В., Есенбаев С.Х., Белик М.Н. Автоматизация процесса горения угольного котла средней мощности нового типа. Сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2024. С. 298-301.
2. Юрченко В. В. [Анализ работы котла на твердом топливе со шнековой подачи угля](#) [Электронный ресурс]// Теория и практика современной науки.-2023.- №7(97)
3. Sergeyev V., Yurchenko V., Ayzhambayeva S.Z., Belik M.N., Vavilova G.V., Serebryakov S.G. Researches of air and fuel rate influence on oxygen level in emissions of new type medium power coal boiler. VII International Conference: Modern Technologies for Non-Destructive Testing 2018 В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 457, Tomsk, Russia 8 – 13 October 2018, с. 114-122
4. <https://trei.biz>. Комплексы программно-технические TREI. Руководство по эксплуатации. TREI.421450.001 РЭ

**Приборы и технологии экологического и метеорологического мониторинга.
Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук**

Корольков Владимир Александрович

*Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук
E-mail: Kor@imces.ru*

Экологический и метеорологический мониторинг состояния атмосферы требуется для решения широкого круга задач, как в области научной, так и общехозяйственной деятельности человека. Мониторинг является основным источником фактических данных, необходимых для получения новых знаний о происходящих в атмосфере физико-химических процессах, решения задач моделирования атмосферы и прогнозирования метеорологической ситуации, определения тенденций изменения регионального и планетарного климата и пр. На основе данных мониторинга атмосферы осуществляется контроль экологического состояния окружающей среды, устанавливаются регламенты технологических процессов, связанных с выбросами в атмосферу загрязняющих веществ, разрабатываются требования к системам очистки. Метеорологический мониторинг необходим для обеспечения практически всех отраслей хозяйственной деятельности – транспорта, сельского хозяйства, связи, а также боевых действий различных видов Вооруженных сил. Для решения столь широкого круга задач требуется разработка новых технологий мониторинга атмосферы, базирующихся на современных инструментальных средствах контроля, в которых используются оптические, электронные и акустические методы измерений, а также применяются численные методы обработки данных и алгоритмы искусственного интеллекта.

1. Одним из перспективных методов контроля состава многокомпонентной газовой среды (в том числе атмосферного воздуха) является оптический метод, основанный на эффекте спонтанного комбинационного рассеяния света (Рамановское рассеяние). Суть явления заключается в рассеянии газовыми молекулами падающего на них оптического излучения, причем спектр рассеянного газовой средой оптического излучения определяется сортом молекул газа и их концентрацией. Метод СКР-газоанализа позволяет определять состав многокомпонентной газовой среды посредством лазера с фиксированной длиной волны, он безынерционен и не требует прямого контакта с контролируемым газом [1].

Главным недостатком метода СКР-газоанализа является малая интенсивность света, рассеянного газовыми молекулами, что делает реализацию метода достаточно сложной технической задачей.

В ИМКЭС СО РАН ведутся исследования механизма спонтанного комбинационного рассеяния света различными газовыми средами, и разрабатываются СКР-спектрометры для анализа состава многокомпонентных газовых смесей (рис.1) [2].

На рисунке представлены типичные спектры комбинационного рассеяния, снятые в различных газовых средах (воздух в помещении, биогаз, природный газ), и, в качестве иллюстрации, приведены результаты количественного анализа состава газовых смесей, полученные с помощью СКР-газоанализатора [3].

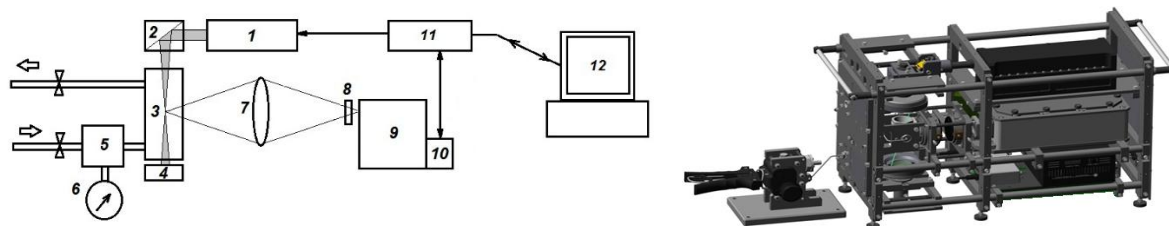


рис.1 структурная схема и компоновка СКР-спектрометра: 1 – малогабаритный DPSS-лазер (1 Вт, $\lambda = 532$ нм); 2 – оптическая система; 3 – газовая кювета высокого давления; 4 – ловушка лазерного излучения; 5 – компрессор; 6 – манометр; 7 – фотообъектив Canon EF 50 mm f/1.2 (угол сбора до 0,6 ср); 8 – Notch фильтр; 9 –

спектрометр; 10 – ПЗС-матрица Hamamatsu S10141 с охлаждением Пельтье (до -10°C); 11 – блок управления; 12 – компьютер.

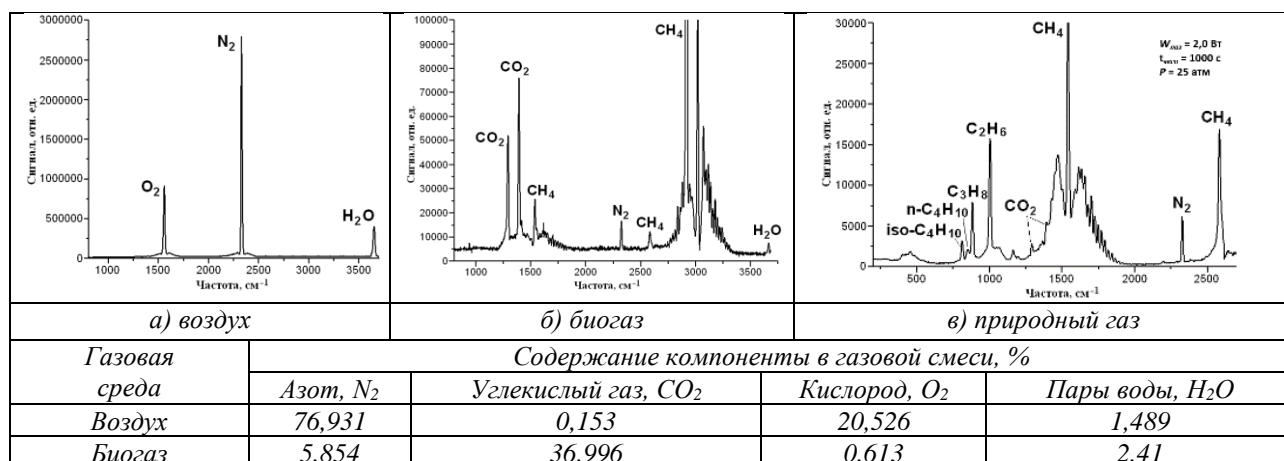


рис.2 спектры комбинационного рассеяния и результаты количественного анализа состава газовых сред

С помощью разработанного СКР-спектрометра в интересах ряда томских научных учреждений и предприятий были выполнены работы по исследованию состава газовых смесей, в частности:

- определение состава газогидратов (НИ ТПУ);
- определение состава газовыделений при утилизации микропластиков (НИ ТГУ);
- определение деградации активной среды HF-лазеров (ИСЭ СО РАН);
- оптимизация режимов работы керамических газовых горелок (ТНЦ СО РАН);
- определение побочных продуктов при производстве синтез-газа (ТН-Био (Татнефть))
- определение состава воздуха в теплице (тепличное хозяйство ТО).

Одним из основных практических результатов работы по созданию СКР-газоанализатора стала разработка опытного образца измерительного прибора для анализа состава природного газа [4]. Газоанализатор позволяет без какой-либо специальной пробоподготовки определять концентрацию компонент природного газа (включая изотопный состав), а также содержание в природном газе паров воды, азота и углекислого газа. В таблицах 1 и 2 приведены сравнительные результаты количественных измерений содержания в природном газе углеводородных компонентов и примесей, полученные с помощью разработанного СКР-газоанализатора и хроматографа.

Таблица 1. Результаты сравнительных измерений содержания в природном газе углеводородных компонентов

Компонент	Метан CH_4	Этан C_2H_6	Пропан C_3H_8	н-Бутан $\text{n-C}_4\text{H}_{10}$	изо-Бутан $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$	н-Пентан $\text{n-C}_5\text{H}_{12}$	изо-Пентан $\text{iso-C}_5\text{H}_{12}$
СКР-газоанализатор	92,311	3,550	1,145	0,171	0,178	0,053	0,039
Хроматограф «Кристалл-2000М»	92,26	3,45	1,26	0,224	0,192	0,040	0,047

Таблица 2. Результаты сравнительных измерений содержания в природном газе примесей

Компонент	Азот N_2	Углекислый газ CO_2	Кислород, O_2	Гелий* He	Пары воды ** H_2O
СКР-газоанализатор	1,961	0,569	-	-	0,023

Хроматограф «Кристалл-2000М»	1,95	0,54	0,008	0,018	-
---------------------------------	------	------	-------	-------	---

*) Гелий является атомарным газом и не определяется методом СКР.

**) Пары воды не определяются хроматографом.

В настоящее время ведутся переговоры с АО «Газпром» по использованию СКР-газоанализатора для контроля технологических процессов транспортировки и переработки природного газа.

В стадии НИР находится работа по созданию СКР-газоанализатора для контроля потоков климатически активных газов (CO_2 , CH_4 , паров H_2O) в приземной атмосфере.

2. Другим важным направлением выполняемых в Институте работ является разработка новых технологий и инструментальных средств для исследования метеорологических параметров атмосферы [5]. В основу создаваемых для этой цели измерительных комплексов положена ранее разработанная в Институте ультразвуковая автоматическая метеостанция ИМБУ АМК-04 [6]. АМК-04 обеспечивает измерение скорости и направления ветра (включая вертикальную его составляющую), температуру и влажность воздуха, атмосферное давление и параметры турбулентности атмосферы. В состав устройства входят ультразвуковой 3D-термоанемометр (частота посылки акустических импульсов – $10 \div 80$ Гц), сенсорные датчики влажности воздуха и атмосферного давления, микропроцессорный блок, выполняющий управление работой прибора и вычисление конечных значений метеорологических величин, а также некоторые сервисные устройства. Все составные элементы метеостанции интегрированы в единый компактный корпус, устанавливаемый на метеомачте (рис.3).

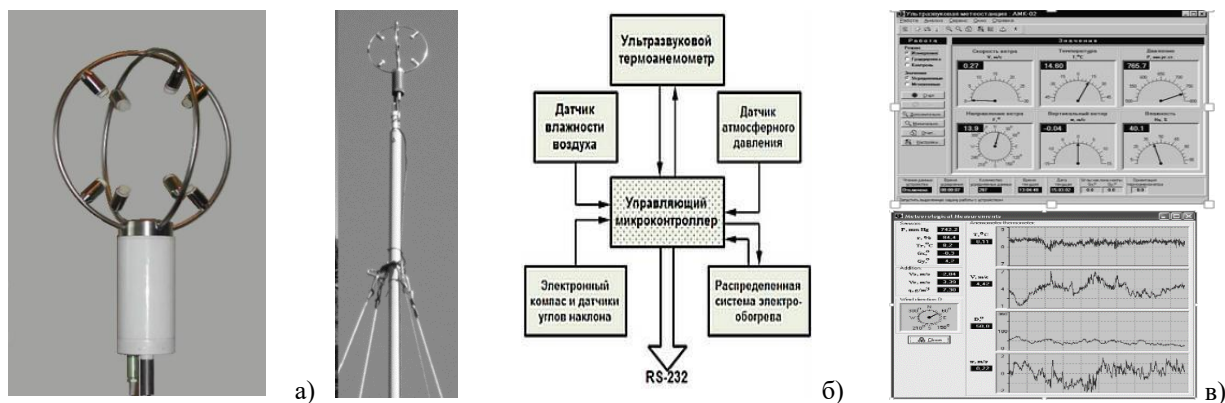


рис. 3 ИМБУ АМК-04: а) внешний вид, б) блок-схема устройства; в) главное окно ПО «Метео 3.0М»

Таблица 3. Метрологические характеристики ИМБУ АМК-04

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений горизонтальной составляющей скорости воздушного потока V_v , м/с	от 0,2 до 40
Диапазон измерений вертикальной составляющей скорости воздушного потока V_h , м/с	от -15 до +15
Погрешность измерений скорости воздушного потока, м/с	$\pm (0,1 + 0,1 \cdot V_v)$
Диапазон измерений направления скорости воздушного потока, градус	от 0 до 360
Погрешность измерений направления скорости воздушного потока, градус	± 4
Диапазон измерений температуры воздуха, °C	от -50 до +50
Погрешность измерений температуры воздуха, °C	$\pm 0,3$
Диапазон измерений относительной влажности воздуха, %	от 15 до 100
Погрешность измерений относительной влажности воздуха, %	± 5
Диапазон измерений атмосферного давления, гПа	от 693 до 1067

Погрешность измерений атмосферного давления, гПа	± 1
--	---------

Основными достоинствами акустического метода измерения скорости и температуры воздушных потоков, реализованными в ИМБУ АМК-04, являются малая инерционность измерений (порядка 3×10^{-4} сек) и высокая частота измерений ($10 \div 100$ Гц). С учетом высокой чувствительности (до 10^{-3} м/с по скорости и до 10^{-3} град. по температуре потока) метод позволяет исследовать турбулентность атмосферы. Программное обеспечение разработанного прибора позволяет в режиме реального времени вычислять большое число параметров турбулентности атмосферы (таблица 4) [7].

Таблица 4. Перечень параметров турбулентности атмосферы, определяемых АМК-04

1) E_v - полная энергия турбулентных движений	9) C^2_T - структурная постоянная температурных флуктуаций
2) I_v - интенсивность флуктуаций скорости ветра	10) C^2_v - структурная постоянная ветровых флуктуаций
3) E_t - энергия температурных флуктуаций	11) C^2_{na} - структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления
4) M_i - момент потока импульса	12) C^2_{no} - структурная постоянная флуктуаций оптического показателя преломления
5) M_t - момент потока тепла	
6) W_i - вертикальный поток импульса	
7) W_t - вертикальный поток тепла	
8) L^* - масштаб Монины-Обухова	

ИМБУ АМК-04 внесен в Реестр средств измерений России (ОС.С.28.001.А № 77356) и серийно выпускается промышленным партнером Института – предприятием ООО «Сибаналитприбор» (г. Томск) [8]. В настоящее время ИМБУ АМК-04 широко используется, как в различных прикладных задачах метеорологического мониторинга, так и для научных исследований в области физики атмосферы.

На базе ИМБУ АМК-04 предприятием «Сибаналитприбор» разработаны и серийно выпускаются мобильные метеорологические комплексы гражданского и военного назначения, используемые при решении специальных задач метеорологического обеспечения.

Переносной автоматизированный метеокомплект АМК-04П (и его модификация военного назначения – ПАМК 1Б65) [9] предназначены для выполнения кратковременных метеорологических измерений на произвольных неподготовленных площадках (рис. 4а, 4б). Все оборудование метеокомплекса, включая блок измерения метеопараметров (ИМБУ АМК-04), пульт управления и индикации измеренных метеовеличин, складную метеомачту (длина – 4 метра) и блок автономного питания (комплект аккумуляторных батарей) укладываются в специальный бокс-контейнер, приспособленный для переноски одним человеком (общий вес метеокомплекта не превышает 18 кг). Автономный источник питания обеспечивает непрерывную работу метеокомплекса до 2-х суток.

Бортовой автоматический метеокомплекс (изделие 1Б65Б) [10] может устанавливаться на различные виды транспортных средств и имеет автоматическую систему свертывания/развертывания, включающую в себя метеомачту с электромеханическим приводом подъема/складывания и автоматическую систему контроля функционирования ультразвукового термоанемометра (на принципе использования камеры 0-ветра) (рис. 4в).

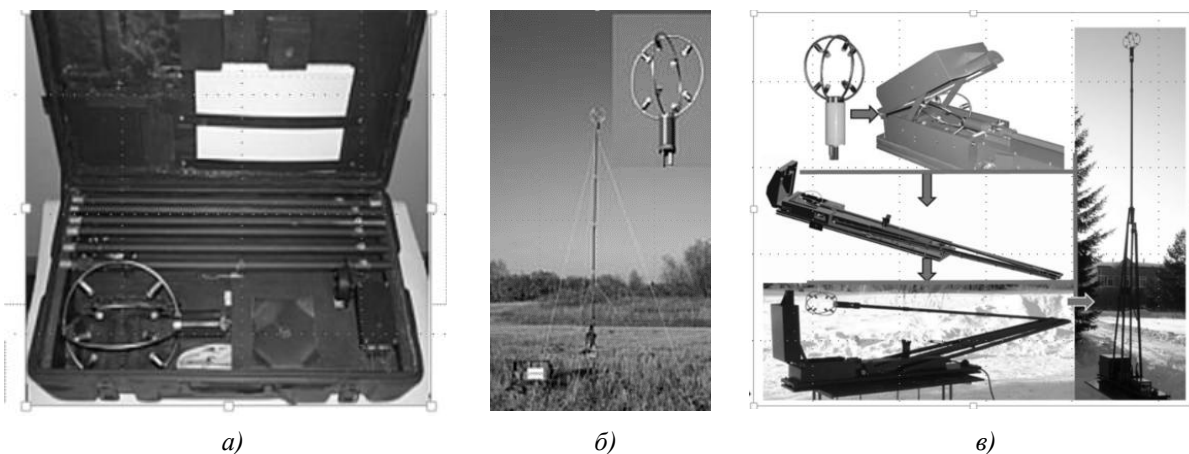


рис.4 мобильные метеорологические комплексы: а) переносной метеокомплект ПАМК 1Б65 (укладка в боксе-контейнере); б) ПАМК 1Б65 на позиции; в) бортовой метеокомплекс с автоматической системой разворачивания/свертывания (высота подъема метеомачты – 2 или 4 метра)

Бортовые автоматические метеокомплексы используются для решения задач метеорологического обеспечения в составе измерительного оборудования мобильных станций специального назначения (рис.5).

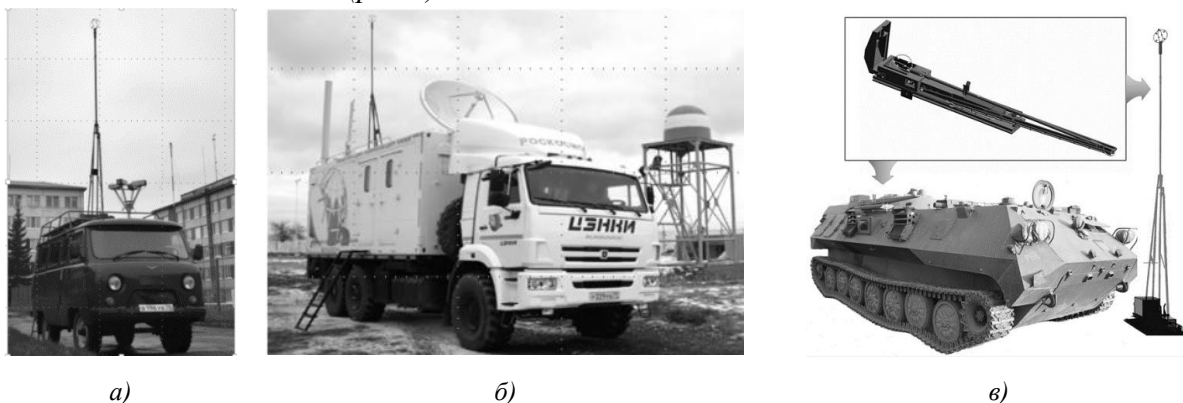


рис.5 бортовые автоматические метеорологические комплексы: а) на автомобиле УАЗ в составе мобильной экологической лаборатории (ИМКЭС СО РАН; б) на автомобиле КАМАЗ в составе оборудования машины обеспечения стартов космических ракет (космодром «Байконур»); в) на гусеничном транспортёре машины управления артиллерийским огнём (Вооруженные силы Российской Федерации)

Для научных исследований в области прикладной метеорологии и физики атмосферы разработаны многоуровневые измерительные метеосистемы типа МИМ_n/АМК-04 (n – число измерительных уровней) и ГОР-4 (рис.6). Основой измерительной системы служат ИПВУ АМК-04, которые устанавливаются на различных уровнях высотной мачты (2, 10, 20, 40... метров) и выполняют синхронные измерения мгновенных значений скорости ветра и температуры воздуха, а также измерения средних значений влажности воздуха и атмосферного давления. Такие измерительные комплексы позволяют получать информацию о вертикальных профилях метеорологических и турбулентных характеристик приземного слоя атмосферы, определять термодинамическое состояние и тип стратификации атмосферы, выполнять другие уникальные виды измерений [11].

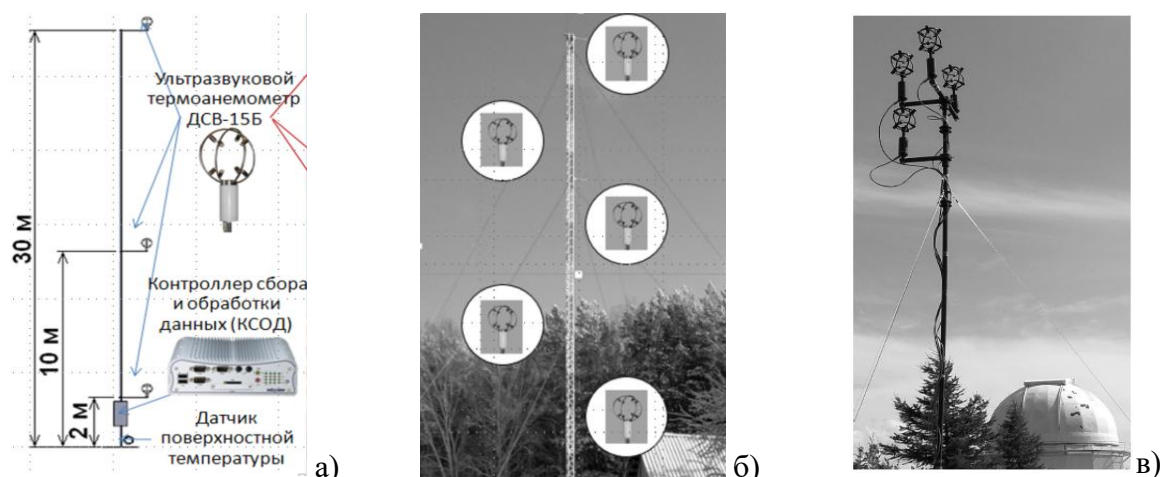


рис.6 многоуровневые измерительные метеосистемы для научных исследований: а) структурная схема трехуровневой метеосистемы МИМ₃/АМК-04 (геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН ИМКЭС СО РАН), б) общий вид пятиуровневой метеосистемы МИМ₃/АМК-04 (геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН), в) измерительный комплекс ГОР-4 (астрономическая обсерватория ИСЗФ СО РАН)

Список публикаций:

- [1] Булдаков М.А., Матросов И.И. и др. // Газоанализатор на основе спонтанного комбинационного рассеяния света: возможности и перспективы // Датчики и системы. 2012. № 3. С.47-52.
- [2] Petrov D. V. et al. // Development of Raman Gas Analyzers at IMCES SB RAS // Atmos. Ocean. Opt. 2022. Vol. 35. № 4. P. 450–455.
- [3] Petrov D.V. et al.// Multipass Raman gas analyzer for monitoring of atmospheric air composition // Opt. Laser Technol. 2022. Vol. 152. P. 108155.
- [4] Петров Д.В. и др. // Возможности анализа состава природного газа с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света // Материалы XII Международной конференции «Химия нефти и газа», Томск, 26-30 сентября 2022 г. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН., 2022. ISBN 978-5-94458-192-1. – С. 45-46.
- [5] Корольков В.А., Тихомиров А.А. и др. // Метеорологические наблюдения и их приборное обеспечение В ИМКЭС СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 2. С. 122-131.
- [6] Корольков В.А. и др. // Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47-52.
- [7] Богушевич А.Я., Корольков В.А., Тихомиров А.А. // Аппаратно-программные комплексы на основе ультразвуковых термоанемометров для определения турбулентности в приземной атмосфере // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Методические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и аэрокосмического мониторинга. 17-18 марта 2020 г. Министерство обороны РФ. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Воронеж. ВУНЦ ВВС «ВВА» - 2020.
- [8] [http:// meteosar.ru](http://meteosar.ru)
- [9] Корольков В.А. и др. // Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03 // Метеорология и гидрология. 2009. №2. С.101-105.
- [10] Корольков В.А. и др. // Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин // Вестник академии военных наук. 2008 №3 (24) с.144-148.
- [11] Тельминов А.Е., Варенцов М.И., и др.// Региональная система мониторинга энергообмена городского ландшафта с атмосферой // Всероссийская конференция, посвященная памяти академика А.М. Обухова «ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА». // г. Томск 19–21 ноября 2024 года. Сборник тезисов докладов. М.: Физматкнига, 2024.С. 201.

Автоматизированная система для сбора и анализа данных клеточных и бактериальных исследований

Юрченко Екатерина Алексеевна
Университет ИТМО
E-mail: kattifi@mail.ru

Современные биомедицинские исследования всё чаще сталкиваются с задачей обработки больших объёмов данных. От точности и воспроизводимости получаемых результатов напрямую зависит надёжность выводов и возможность их практического применения. Однако традиционные методы, такие как микроскопия и ручной анализ клеток, требуют значительных временных затрат, зависят от субъективного опыта исследователя и плохо подходят для масштабирования. В этой работе представлен прототип автоматизированной системы. Для реализации системы была разработана механическая платформа с трёхмерным позиционированием микроскопа. Перемещения по осям X, Y и Z обеспечиваются шаговыми двигателями NEMA 17, работа которых контролируется микроконтроллером Arduino Mega 2560 через драйверы A4988. Такая конструкция позволяет с высокой точностью перемещать объектив относительно исследуемого образца и автоматически выбирать нужные области для анализа (рис. 1).

Изображения фиксируются с помощью цифрового микроскопа, подключённого к одноплатному компьютеру Raspberry Pi, который выполняет предварительный захват и сохранение данных. Дальнейшая обработка и анализ осуществляются на персональном компьютере: разработанный интерфейс на C++ отвечает за управление перемещениями, а программные модули на Python применяют методы компьютерного зрения для улучшения качества изображений, сегментации клеток, выделения их контуров и подготовки данных к последующей классификации. Такой подход позволяет сократить влияние человеческого фактора и сделать процесс исследования более воспроизводимым и масштабируемым.

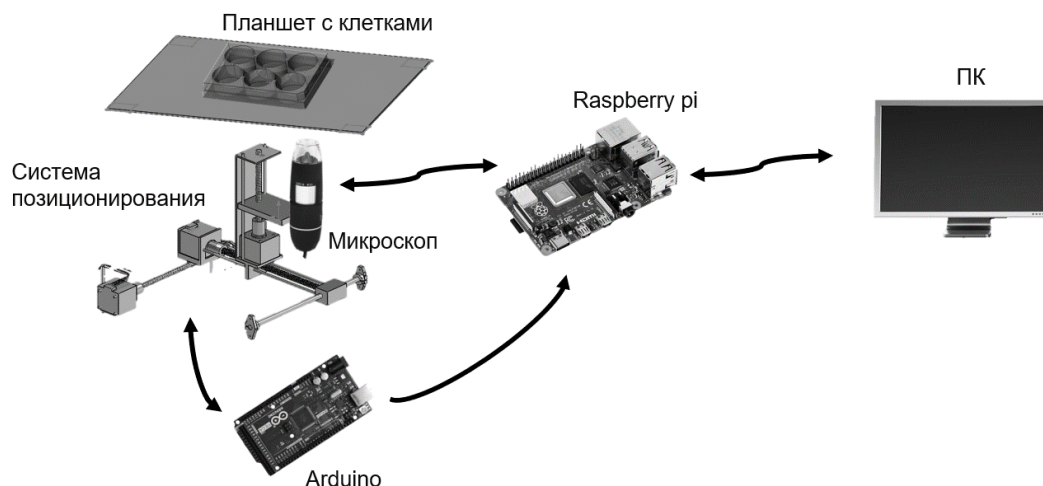


рис. 1 Программно-аппаратный комплекс

Первые испытания показали, что система функционирует корректно: удалось реализовать автоматическое перемещение микроскопа по заданным координатам, выполнить серийный захват изображений и провести их предварительную обработку. Уже на этом этапе видно, что автоматизация позволяет существенно сократить время работы и повысить стабильность результатов по сравнению с ручными методами.

Разработанный прототип отличается модульностью и доступностью компонентов, что делает его перспективным инструментом для клеточных и микробиологических исследований. В дальнейшем планируется расширение функционала за счёт внедрения методов глубокого обучения, в частности свёрточных нейронных сетей (ResNet, U-Net). Это позволит не только классифицировать клетки и бактерии по морфологическим признакам, но и выявлять аномалии, анализировать динамику их поведения и отслеживать реакции на внешние факторы. Также планируется дополнительно интеграция системы с облачными платформами и специализированными базами данных. Такой подход обеспечит надёжное хранение больших массивов изображений, совместный доступ для исследовательских групп и возможность использовать распределённые вычислительные ресурсы для сложного анализа.

Таким образом, разработанный прототип закладывает основу для создания полноценного инструмента, способного решать задачи фундаментальных и прикладных биомедицинских исследований на современном уровне. Благодаря своей гибкости система может найти применение в различных областях — от фундаментальных клеточных исследований до прикладных задач, таких как скрининг лекарственных препаратов,

оценка токсичности веществ или анализ взаимодействия микроорганизмов с окружающей средой. Кроме того, она может служить образовательным инструментом, помогая студентам и молодым исследователям освоить современные методы автоматизации и анализа биологических данных на практике.

Список публикаций:

- [1] Meijering, E. O.. // Черепно-мозговая Methods for cell and particle tracking // Dzyubachyk Methods in Enzymology 2012. №.504. С. 183-200.
- [2] Юрченко Е.А. Разработка системы для диагностики гематом мозга. // Двадцать седьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных 2006. № 1. С. 178-179.
- [3] Юрченко Е.А. УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА ИК-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВНУТРЕЧЕРЕПНЫХ ГЕМАТОМ // НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ СЛОЖНЫХ СТРУКТУР МАТЕРИАЛЫ ЧЕТЫРНАДЦАТОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ. 2022. С. 34-35.

Способ мониторинга движения глюкозы*Юрченко Василий Иванович*

Томский государственный университет

Юрченко Федор Алексеевич

Академический лицей им.Г.А. Псахье

Сахарный диабет (СД) в России, по результатам первого национального исследования NATION (с сентября 2013 года по февраль 2015 года) выявил ранние нарушения углеводного обмена у 19,3 % людей в возрасте 20–79 лет, это 20,7 млн человек. От него страдают 422 млн человек, а к 2030 году число заболевших, по прогнозам специалистов, достигнет 552 млн.

Как и в отношении прочих физиотерапевтических воздействий, установлено, что лечебно-профилактическая эффективность спектрального воздействия (от ИК до СВЧ) через кожные покровы тела существенно возрастает при воздействии на биологически активные зоны (БАЗ). Установлено, что каждая БАЗ наиболее эффективно реагирует на воздействие широким спектром.

К настоящему времени в разных странах разработано более 100 типов аппаратов для КВЧ-терапии, причем разработки и исследования ведутся не только в России и странах СНГ, но и в странах дальнего зарубежья – Европы, Азии, Америки. Появились многофункциональные аппараты или целые лечебно-диагностические комплексы (ЛДК), которые объединяют лечебное КВЧ-облучение с диагностикой. Для создания надёжного средства неинвазивного СВЧ контроля уровня глюкозы необходимо теоретическое и экспериментальное исследование физических процессов, происходящих при взаимодействии электромагнитных полей с биологическими тканями, содержащими кровеносные сосуды с небольшой глубиной залегания. На наш взгляд наиболее перспективным представляется применение методов ближнепольного зондирования в широкой полосе частот [1]. Установлено, что контурный (многоточечный) параметр глюкограммы и его величина позволяет оценить степень влияния всех процессов и учесть их вклад в вариабельность удельного сопротивления крови. Индивидуальная вариабельность глюкодинамики лимитирует точность любых методов, в том числе и прямых инвазивных методов. Предлагаемый метод оценки диапазонов изменения параметров глюкодинамики позволяет врачу объективно относиться к полученным диагностическим параметрам у конкретного пациента. Интересно, что каждый орган и каждая энергетическая система организма связаны с определенными БАЗ. Среди них выделяют репрезентативные, которые могут дать специалисту максимум полезной информации о связанных с ними органах и системами. Органы и системы связаны с БАЗ и в организме человека развиваются на основе многочисленных физиологических процессов в различных органах..

В издании «Журнал традиционной китайской медицины» были опубликованы ряд работ. Они свидетельствуют, что уровень глюкозы в крови после процедур иглоукалывания снижался вдвое. Некоторые исследования, проведенные в Китае, демонстрировали еще более впечатляющие результаты – уровень сахара после процедуры акупунктуры снизился с 22 до 6,5 ммоль/л. Традиционная медицина, в том числе и такие именитые компании, как Всемирная организация здравоохранения и Американская академия медицинской акупунктуры рекомендуют иглоукалывание при диабете 2 типа.

В докладе проанализированы основные тенденции развития аппликаторов ЛДК [2] и показаны перспективы использования многоточечных ближнепольных автодинных систем для получения новой диагностической информации, недоступной при использовании традиционных инвазивных систем. ЛДК создаются на основе модели гуморального регулирования в пространственно разделенных взаимодействующих компонентах в процессе выделения глюкозы из продуктов в ЖКТ, ее переработки, хранения, утилизации в виде 7 основных стадий в различных органах.

1. Юрченко В. И., Беличенко В. П. Современный взгляд на неинвазивный непрерывный многоточечный волновой метод монитора глюкозы Сборник трудов конференции АПР 2023 С. 193
2. Юрченко В. И., Беличенко В. П. Некоторые факты истории и новые возможности активных антенных устройств в виде аппликаторов Сборник трудов конференции АПР 2025 С.



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ
СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ РАДИОФИЗИКИ,
РАДИОТЕХНИКИ И ОПТИКИ

АПР 2025
16-18 сентября 2025
Томск, Россия

От генерации заданий до решения: опыт применения GPT-моделей в организации аудиторной и самостоятельной работы студентов

Вячистая Юлия Валерьевна
Томский государственный университет
E-mail: julvv@mail.tsu.ru

Процесс поиска и апробации новых форматов работы со студентами и учебным материалом – очень увлекателен для преподавателя, позволяет профессионально развиваться, а также противостоять ежедневной профессиональной рутине и выгоранию в целом.

В настоящее время мы наблюдаем зашкаливающую популярность GPT-языковых моделей, и автор, захваченный всеобщим энтузиазмом, решился попробовать применить их возможности в организации как аудиторной, так и самостоятельной работы своих студентов.

На базе блока практических занятий дисциплины «Физика полупроводников» (ОПОП «Радиофизика, электроника и информационные системы», направление 03.03.03 Радиофизика, радиофизический факультет Томского госуниверситета) был опробован способ формирования заданий с использованием языковых моделей GPT.

Задания для аудиторной работы ставили целью оперативное повторение и закрепление самостоятельно подготовленного к занятию теоретического материала и были сформированы в виде связного текста (или набора высказываний), предполагающего понимание сути и взаимосвязей изучаемых объектов и явлений.

Примеры соответствующих промптов для ChatGPT4:

1. «Пожалуйста, придумай связный текст, символов на 300-350, по физике полупроводников, где бы встречались понятия: неравновесные носители заряда, время жизни, рекомбинация, подвижность, коэффициент диффузии, длина диффузии, длина дрейфа».
2. «Ты - преподаватель физики полупроводников в университете. Напиши 8 различных истинных высказываний по теме электропроводность полупроводников. Упомяни подвижности носителей, механизмы рассеяния, концентрации примесей»

Как правило, таких формулировок вполне достаточно (или требуется совсем небольшая доработка), чтобы получить необходимые текстовые фрагменты, где обозначенные слова даже будут выделены. Остается их удалить и сопроводить текст указанием «Вставьте пропущенные термины». Для более простого варианта можно отдельно предъявить список пропущенных слов в случайном порядке, добавив «шума» в виде избыточных. Более «продвинутый» способ предполагает обсуждение со студентом/аудиторией, какие варианты терминов/их сочетаний могут занимать пустые позиции без потери общего физического смысла высказывания.

Справляются GPT-модели и с составлением условий задач по заданной теме, особенно когда требуется несколько различных вариантов. Преподаватель может задавать цель, перечень характеристик, которые необходимо рассчитать, а также контекст и персонажей.

Пример простого промпта для GigaChat: «Составь текст задачи по теме собственная проводимость полупроводников, используя контекст Вселенной Мстителей и упоминая реальные полупроводниковые материалы. Значения параметров полупроводника приводить в условии не нужно. Цель задачи - определить собственную проводимость материала при температуре отличной от 300 К».

И вот уже появляются великолепные Стражи Галактики, Тор или Железный Человек, приятно оживляя атмосферу занятия, но давая при этом возможность тренироваться в расчетах реальных характеристик актуальных полупроводниковых материалов в различных вариациях.

Составление промптов для генерации подобных заданий также может являться одним из увлекательных форматов самостоятельной работы студентов. Преподавателю, решившемуся на использование данного подхода, рекомендую провести крохотное входное анкетирование на предмет любимых литературных, иллюстрированных (комиксы) или кинематографических произведений. Это позволит выбирать подходящие сюжеты для микрокейсов, и, возможно, лучше понимать аудиторию в целом.

Таким образом, GPT-модели при использовании для организации аудиторной работы:

- Демонстрируют достаточный «уровень владения» теоретическим материалом по физике полупроводников, что позволяет в общем случае не использовать дополнительные тексты как источник материала для заданий. Однако, если, к примеру, вы хотите проверить подготовку студента на примере конкретного текста (например, знание и понимание порядка действий в ходе некоторой лабораторной работы по методическим указаниям к ней), то имеет смысл приложить его, составляя промпт.
- Позволяют задавать и варьировать не только цели задания, но и такие технические характеристики, как объем текста (например, чтобы все уместилось на 1 слайд), количество вариантов, стиль, а также нарратив и задействованных персонажей.
- Увлекают процессом составления и совершенствования промпта, что позволяет использовать его как вариант самостоятельной работы студентов. Понимание и запоминание изучаемого материала дополнительно обеспечивается еще и эмоциональным вовлечением. При этом в ходе работы студенту конечно же потребуется предварительно самому решить свою задачу, проверить достаточность ее условия, оценить количество необходимых справочных данных, исключить (или быть готовым обсуждать) возможные неоднозначности решения и пр.

На что стоит обратить внимание и быть готовыми внести поправки:

- GPT-модель может предлагать в условии задачи численные значения параметров отличные от тех, что обычно вы используете на занятиях. Как правило, это экспериментально определяемые величины, например, в случае физики полупроводников - подвижности и времена жизни. Если в конкретном случае это важно, то стоит использовать необходимые указания на этапе составления промпта.
- Иногда GPT «чересчур фантазирует», и задачи с вымышленными персонажами заодно уж слишком нереалистично интерпретируют физические явления реального мира. Задача преподавателя – как, впрочем, и всегда – проверить и объяснить языковой модели, где она права.

Интересным форматом внеаудиторной самостоятельной работы представляется составление студентами промптов для решения выданных преподавателем нетривиальных заданий с помощью GPT-моделей. В этом случае им предлагалось не просто скопировать условие задачи в промпт, но и

- обеспечить модель корректными данными, которые в обычной ситуации извлекаются из таблиц или графиков экспериментальных результатов, в противном случае полученный ответ может оказаться очень неточным;
- проконтролировать полученный результат, особенно если он не сводится к прямым вычислениям, а, например, является численным решением некоторого уравнения;
- указать в промпте необходимые данные и инструкции, если требуется особым образом проанализировать результаты вычисления и принять некие решения.

В подобной работе необходимо проверять точность, обоснованность и соответствие информации (в том числе полученных численных результатов) целям, контексту, рамкам и используемым моделям соответствующих разделов физики полупроводников. Студент должен понимать, что не стоит слепо доверять результатам, полученным с помощью GPT языковых моделей.

Искусственный интеллект (ИИ) становится частью нашей жизни. Умение использовать (а где-то – противостоять) ИИ следует включать в список soft skills, формируемых в том числе и высшей школой, наряду с умениями четко и грамотно выражать свои мысли, выстраивать отношения в коллективе и пр. Преподавателям любой дисциплины стоит помогать (т.е. предусматривать специальные форматы работы) студентам развивать навыки ИИ-грамотности, чтобы они могли эффективно и этично использовать их в своей учебе и будущей работе. Это включает в себя понимание основных принципов взаимодействия пользователя с ИИ, владение различными инструментами и техниками, а также умение критически оценивать и интерпретировать полученные результаты. Автор выражает благодарность педагогам программы повышения квалификации «Генеративный искусственный интеллект для преподавателя: стратегии, инструменты, этика» (НИ ТГУ) за приобретенные в ходе подготовки новые знания, возможности и предстоящие для себя интересные открытия.

**«Радиофизический класс ТГУ» как средство профессиональной пробы
студентов и школьников**

Доценко Ольга Александровна

Кочеткова Татьяна Дмитриевна, Спешилов Илья Валерьевич, Чернышов Дмитрий Витальевич,

Яценко Александр Андреевич, Лопошниченко Дмитрий Алексеевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: dol@mail.tsu.ru

В последние десятилетия нехватка специалистов с компетенциями в области науки, технологий, инженерии и математики (STEM) является ключевой проблемой в России и во всем мире [1-4]. Основным фактором этого является дефицит школьного образования по предметам, входящим в группу STEM. Количество школьников, а в дальнейшем – студентов, выбирающих данные направления подготовки, не соответствуют потребностям промышленных отраслей. Например, по данным Ассоциации полупроводниковой промышленности [3], к 2030 году в США будет нехватка примерно 1,4 миллиона техников, компьютерных ученых и инженеров STEM. Данная проблема связана с тем, что в школах постоянно наблюдается недостаток квалифицированных учителей физики, математики и естественных наук [5]. В свою очередь, у современных школьников отсутствует мотивация к изучению данных предметов. По мнению авторов статьи [6], «в качестве причин рассматривается преобладание теоретической составляющей обучения, заучивание формул, определений, готовых способов решения задач». Обучающиеся отмечают недостаточность экспериментальной части при изучении физики, что не позволяет им воспринимать ее как комплексную науку.

Перед студентами часто возникает вопрос, для чего они изучают те или иные дисциплины, так как не видят возможность их применения на практике. Наличие разнообразных электронных курсов и лабораторных работ в поддержку изучаемых специальных дисциплин [7, 8] не позволяет увидеть свои возможности в будущем. Следствием этого также является снижение мотивации к изучению соответствующих дисциплин. Выпускники классического университета, не зависимо от направления подготовки, должны обладать компетенциями преподавателя. Как говорят, чтобы понять предмет, нужно объяснить другому. При этом происходит структурирование своих знаний, выявляются пробелы и улучшается понимание предмета.

В связи с вышесказанным, в данной статье предлагается подход, реализованный на радиофизическом факультете Томского государственного университета, позволяющий осуществить профессиональную пробу школьникам и студентам, и посмотреть на будущую профессию изнутри.

Для этого была разработана программа «Радиофизический класс ТГУ», которая направлена на формирование инженерных и исследовательских навыков, развитие мышления, логики и математических способностей. Данная программа поддерживает и углубляет базовые знания по физике, математике и информационным технологиям.

Во время обучения ребята осваивают основные принципы работы электрических схем и приемы обработки сигналов, а также постигают основы программирования и работы в разнообразных средах автоматизированного проектирования. Учащиеся работают с источниками питания, сигналов, с измерительными приборами. Эти навыки и знания пригодятся им не только в будущей профессии, но и в обычной бытовой жизни, позволят чувствовать себя увереннее и свободнее в мире, насыщенном электронными устройствами.

В процессе занятий школьники:

- знакомятся с измерительными приборами: мультиметром, генератором электрических сигналов, осциллографом;
- исследуют вольтамперные характеристики основных радиокомпонентов;
- разбирают простейшие электрические схемы: делителя напряжения, RC-фильтров, выпрямителя и мультивибратора;
- изучают основы программирования на языке C++;
- учатся управлять датчиками с помощью микроконтроллера;
- получают навык радиомонтажа;
- самостоятельно собирают светодиодный фонарик или мультивибратор.

Полученные знания ребята применяют в творческих проектах, где выступают в роли инженеров. В процессе разработки проекта, школьники коллективно обсуждают идеи решения поставленной конструкторской задачи, далее строят, программируют и испытывают свою модель, оценивают работоспособность созданного изделия. Результатами обучения по данной программе являются полученные школьниками компетенции по организации экспериментальной деятельности; конструированию робототехнических интеллектуальных систем; программированию несложных робототехнических систем и созданию сценариев работы таких систем.

За время обучения на данной программе ребята пробуют работать в команде, развивают навыки коммуникации и аргументации.

Структура программы представлена на рис. 1.



рис. 1 Структура программы «Радиофизический класс. Схемотехника»

Логика ее разработки заключается в движении от простого и элементарного – электрорадиокомпонентов – через языки программирования к сложным системам, состоящим из знакомых уже радиодеталей и управляемым программой. Изучение основ схемотехники, программирования встраиваемых устройств проводится с опорой на физические процессы, протекающие в радиоэлектронных компонентах, на законы и эффекты, на которых основано действие этих приборов. Такой подход воспитывает вдумчивое отношение к процессу проектирования и понимание работы электрической схемы, учит самостоятельно находить ошибки и предлагать новые решения. Каждое занятие построено в сочетании небольшой дозы теории и обязательной практической части, чтобы школьники не заскучили и лучше запомнили материал.

В качестве преподавателей мы приглашаем студентов 4-5 курсов. В сентябре они получают методические материалы по курсу и готовят пробное занятие, по итогу которого проходят отбор, и наиболее харизматичные и творческие из них становятся членами Педагогического корпуса.

Эффективность программы сложно оценить количественно. Хотя мы можем гордо заявить, что в 2024 году два человека, прошедшие Радиокласс, поступили на РФФ. Более наглядно итоги программы в 2024/2025 году представлены в ответах анонимной анкеты среди учеников Радиокласса. Это были десятиклассники из пяти школ города (СОШ № 58, 37, Лицей № 1, ТФГЛ, Зональненская СОШ). Они узнали о Радиоклассе в школе от педагогов и пришли к нам на программу по обязанности выполнить индивидуальный проект в зачет предмета «Проектная деятельность». Так мы привлекаем школы и заключаем с ними договор о реализации сетевой программы. Единицы нашли информацию на сайте РФФ или от друзей. Вот что получилось в итоге.

На рис. 2 приведены ответы на вопрос об изменении представлений о радиофизическом факультете. Как можно видеть, преобладают положительные впечатления. Есть желание поступать на РФФ, важно, чтобы оно сохранилось до начала работы приёмной комиссии. Ребята узнали о факультете изнутри, получили представление о специальностях. Эта важная цель – привлечение потенциальных абитуриентов – достигается успешно, осталось увеличить масштаб.

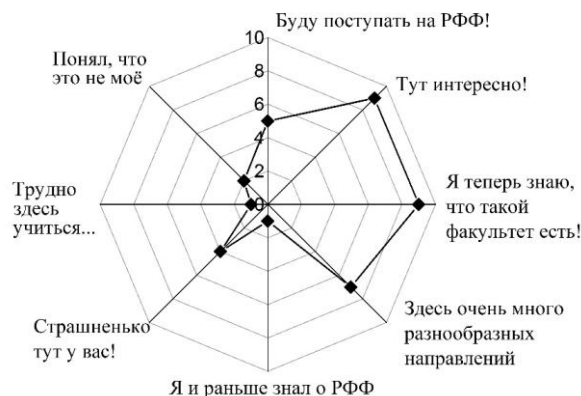


рис. 2 Ответы на вопрос «Изменилось ли Ваше отношение к радиофизическому факультету после занятий в Радиоклассе?»

Преподаватели-студенты были стопроцентно отмечены как положительная сторона Радиокласса. «Хорошие преподаватели. Преподаватели-студенты, разбирающиеся в темах и понимающие учащихся. Отзывчивость кураторов. Очень интересно и подробно доносили информацию. Интересно объясняли сложные темы», – такие отзывы получили наши радиопедагоги.

В ответах на вопрос «Какую пользу принесли занятия в Радиоклассе?» школьники отметили:

- улучшение физики в школе, лучше понял физику и электронику, что помогает на уроках;
- расширение кругозора, новые знания;
- сделала итоговый проект на тему электроники.

О трудностях ребята выразились сдержанно: 75 % не испытали затруднений, а 25 % сделали замечания: «Трудно понять некоторые темы», «Хотелось больше практики», «Проект занимал много времени, но оно того стоило», «Набрали много народу, которые не заинтересованы в предмете».

«Посоветуете ли своим друзьям ходить в Радиокласс?» Распределение ответов показано на рис. 3 и говорит само

за себя.

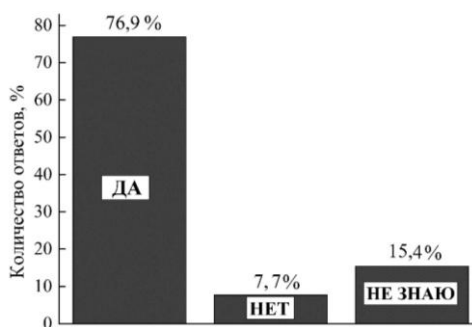


рис.3 Ответы на вопрос «Посоветуете ли своим друзьям ходить в Радиокласс?»

Итоговое мероприятие программы – выставка по итогам Всероссийского конкурса студенческих и школьных проектов «Радиофизика. Измерения. Автоматизация», на котором есть специальная номинация «Шаг в радиофизику». Конкурс проводится на базе радиофизического факультета, поэтому участие «радиоучеников» стало логичным завершением обучения в Радиоклассе. Это целое научное событие и для ребят полезен первый опыт общения с коллегами, представителями предприятий Томска. Они отметили: «Понравилась возможность посмотреть на чужие проекты и пообщаться с их создателями», «Было много интересных идей, особенно у студентов», «Много народу и интересных, местами необычных работ», «Атмосфера классная приятная», «Очень понравилась атмосфера и стол с едой».

Таким образом, мы считаем, что как студенты, так и школьники, с успехом прошли первую профессиональную пробу в рамках программы «Радиофизический класс ТГУ». Программа будет продолжаться за счет расширения географии школ Томска, близлежащих городов и поселков.

Список публикаций:

- [1] Why is there a STEM Shortage and How Can the Skills Gap be Closed? [Электронный ресурс]: URL: https://serckglobal.com/our_project/stem-shortage-and-skills-gap/ (дата обращения: 27.06.2025).
- [2] What can employers do to combat STEM talent shortages? [Электронный ресурс]: URL: <https://www.weforum.org/stories/2024/05/what-can-employers-do-to-combat-stem-talent-shortages/> (дата обращения: 27.06.2025).
- [3] Stem shortage in the US for stem professionals [Электронный ресурс]: URL: <https://harveylawcorporation.com/stem-shortage-in-the-us-immigrate-to-the-us/> (дата обращения: 27.06.2025).
- [4] Кадровый баланс: почему российским компаниям не хватает инженеров [Электронный ресурс]: URL: <https://www.forbes.ru/mneniya/532897-kadrovyyj-balans-pocemu-rossijskim-kompaniam-ne-hvataet-inzenerov> (дата обращения: 25.06.2025).
- [5] Доценко О.А., Кочеткова Т.Д. Радиофизический класс ТГУ как форма профессиональной ориентации и проектного обучения школьников // Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти. Приоритетные ориентиры высшего образования в России: стратегическое партнерство и технологический суверенитет: материалы междунар. науч.-метод. конф. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2024. Ч. 2. С. 163–167.
- [6] Казначеева С. Н., Бичева И. Б., Казначеев Д.А. Современные проблемы и перспективы изучения физики в школе // Проблемы современного педагогического образования. 2021. № 71-4. С. 120–124. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-problemy-i-perspektivy-izucheniya-fiziki-v-shkole> (дата обращения: 25.06.2025).
- [7] Доценко О.А., Жуков А.А. Об опыте разработки и применения симуляторов измерительных приборов на основе LabView для дисциплин "Радиоэлектроника" и "Схемотехника аналоговых электронных устройств" // Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти. Приоритетные ориентиры высшего образования в России: стратегическое партнерство и технологический суверенитет: материалы междунар. науч.-метод. конф. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2024. Ч. 1. С. 111–116.
- [8] Жуков А.А., Булахов Н.Г. Опыт проведения лабораторных практикумов по радиотехническим дисциплинам в дистанционном формате // Методические, технологические и организационные аспекты электронного обучения. Сборник статей по результатам научно-методической конференции. Томск, 12 ноября 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2021. С. 31-36.

Опыт организации и проведения курса "Введение в специальность" для студентов-радиофизиков

Кортаев Александр Григорьевич

Жуков Андрей Александрович

Булахов Николай Георгиевич

Лапутенко Андрей Владимирович

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: gyk@mail.tsu.ru

Дисциплина «Введение в специальность» изучается студентами первого курса радиотехнического факультета Томского государственного университета уже более десяти лет. Она играет ключевую роль в адаптации студентов-радиофизиков к будущей профессии, формирует первичное представление о радиофизике как о науке и области практической деятельности, помогает студентам осознать значимость выбранной специальности и мотивирует их к дальнейшему обучению.

Дисциплина направлена на формирование следующих компетенций:

- способность к самоорганизации и самообразованию;
- способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии;
- способность решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий.

Дисциплина включает теоретическую часть (лекции) и лабораторный практикум. В лекционной части курса студенты знакомятся с основными историческими сведениями о развитии радиофизики [1], с историей Томского университета и радиотехнического факультета, с основными принципами актуального ФГОС, содержанием основной образовательной программы по направлению «Радиофизика», структурой факультета и организацией учебного процесса. Большое внимание на лекциях уделяется рассказам о научных школах факультета, направлениях научных исследований кафедр и лабораторий.

В лекционной части курса студенты также знакомятся с уставом и нормативными документами ТГУ, такими как «Положение о режиме занятий обучающихся», «Правила внутреннего распорядка обучающихся в ТГУ» и др.

Практическая часть курса представляет собой лабораторный практикум объемом 18 часов. Для разных направлений подготовки предусмотрены разные наборы лабораторных работ.

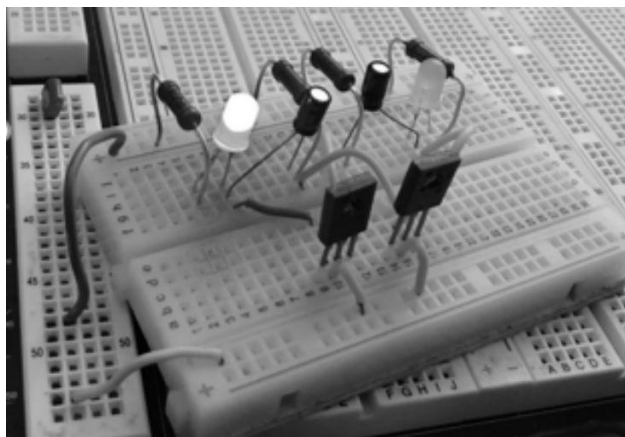
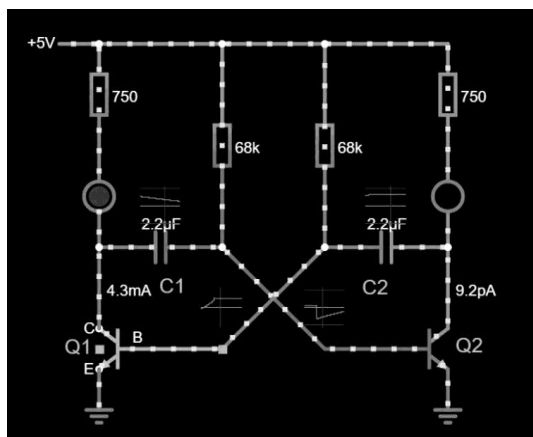
Для студентов, обучающихся по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» предусмотрено шесть лабораторных работ, направленных на закрепление теоретических знаний и приобретение практических навыков. Темы лабораторных работ:

- Подключение светодиода.
- Инвертор на биполярном транзисторе.
- Мультивибратор на биполярных транзисторах.
- Генератор прямоугольных импульсов на ИС NE555
- Работа с цифровыми ИС K155ЛА3, K155ЛИ1 и K155ЛЛ1.
- Работа с семисегментным индикатором.

Выполнение каждой работы состоит из самостоятельной домашней работы студента и натурального эксперимента, проводимого в учебной аудитории. Домашняя работа студента заключается в изучении теоретического материала по теме работы, выборе варианта задания по работе, проведении расчетов исследуемых схем и моделировании схем в программе схемотехнического моделирования Circuit Simulator [2,3]. Эта программа позволяет не только проводить моделирование исследуемых электронных схем, но и генерировать Internet-ссылки на эти схемы, по которым преподаватель может проверить качество работы студента [4]. По результатам самостоятельной работы студент готовит отчет в форме документа Word и отправляет на проверку преподавателю. До начала аудиторных занятий преподаватель проверяет присланные отчеты и на занятии допускает до натурального эксперимента только студентов, выполнивших домашнюю работу. В ходе аудиторной работы студенты на макетных платах собирают схемы по своим вариантам заданий, снимают видео по их работе и отправляют записанные файлы на проверку преподавателю. В качестве примера результаты самостоятельной и аудиторной работы студента приведены на рисунках 1а и 1б соответственно.

Знания и навыки, полученные при прохождении лабораторного практикума, позволят студентам подготовиться к лабораторным работам по общим и специальным дисциплинам, таким как «Радиоэлектроника»

[5], «Измерительные приборы и устройства в радиотехнике» [6], «Схемотехника аналоговых электронных устройств» [7] и др.



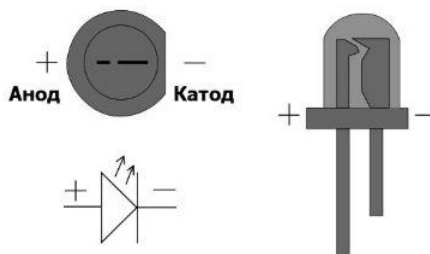
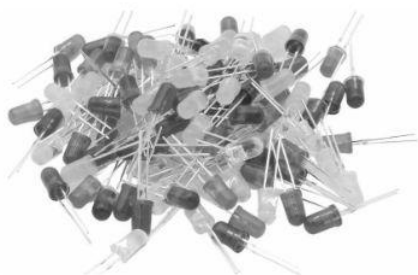
а

б

Рис.1 Результат моделирования (а) и эксперимента (б) при выполнении лабораторной работы «Мультивибратор на биполярных транзисторах»

Для информационной и методической поддержки лабораторного практикума подготовлен электронный курс в среде электронного обучения iDO TГУ(Moodle). В этом курсе размещены необходимые информационные, методические и контрольные материалы по лабораторным работам, включающие теоретические данные по изучаемым схемам и методам их расчета, методические указания по выполнению лабораторных работ, а также элементы по выбору варианта задания и сдачи результатов расчета, моделирования, сборки и экспериментального исследования создаваемых схем. Фрагмент страницы электронного курса приведен на рисунке 2.

Лабораторная работа 01. Подключение светодиода



Домашнее задание по лабораторной работе 01. Подключение светодиода

1. Выбрать вариант задания для своей группы.
2. Изучить pdf-документ "Работа с программами схемотехнического моделирования и макетирования" и видео по светодиодам и кнопкам.
3. Провести расчет исследуемой цепи с помощью онлайн калькулятора.
4. Провести моделирование исследуемой цепи в пакете Circuit Simulator (Симулятор цепей).
5. Подготовить отчет по выполненной работе.



Теоретический материал



Что такое светодиод?



Принцип работы светодиода; вольтамперная характеристика (ВАХ) светодиода; чем определяется цвет светодиода; где плюс и минус светодиода; подключение светодиодов; - виды светодиодов; достоинства и недостатки светодиодов; история создания светодиодов.

Рис.2 Фрагмент электронного курса с домашним заданием по лабораторной работе «Подключение светодиода»

Перед началом лабораторных работ и по завершении лабораторного практикума в рамках образовательной

среды iDO ТГУ студентам предлагается пройти опросы. Опросы проводятся в анонимной форме. Во входном опросе студентам предлагается ответить на вопросы, связанные с их уровнем подготовки к лабораторному практикуму (с какими измерительными приборами, схемами и их компонентами студентам приходилось работать и есть ли у них компьютер для работы в сети Internet). В выходном опросе студентам предлагается указать наиболее полезные части практикума, оценить практикум в целом, оценить сложность заданий и высказать свое мнение о курсе (достоинства, недостатки, замечания, предложения...).

Результаты входного опроса, проводимого в течение ряда лет, показывают, что около половины опрошенных не имеют навыков работы с электронными схемами и измерительными приборами. Результаты выходного опроса указывают, что студенты высоко оценивают задания и методическое обеспечение лабораторного практикума.

Для студентов, обучающихся по направлениям «Фотоника и оптоинформатика» и «Лазерная техника и лазерные технологии» предусмотрен лабораторный практикум, включающий семь лабораторных работ и одно командное творческое задание. Работы могут выполняться выборочно в зависимости от тематики выбранного подгруппой проекта.

Лабораторные работы предполагают сборку, настройку и программирование оптоэлектронных схем на базе плат Arduino, макетных плат и наборов компонентов, таких как лазерный и светодиодный модули, фотоприёмный модуль, инфракрасный излучатель, приёмник инфракрасного излучения, светодиоды, семисегментные индикаторы, кнопки, резисторы, потенциометры, элементы питания, провода и другие комплектующие.

Для снижения порога входа перед работой с реальным оборудованием предлагается предварительная сборка, отладка и тестирование схем в среде эмуляции электрических цепей Tinkercad Circuits. Она содержит встроенный редактор кода для Arduino и позволяет использовать визуальное программирование, аналогичное среде Scratch.

В рамках практикума реализуются следующие лабораторные работы:

- **Вводная работа** – направлена на ознакомление студентов с оборудованием, программным обеспечением и форматом проведения занятий. Предлагается собрать простую электрическую схему в эмуляторе, а затем реализовать её на реальном оборудовании и сравнить результаты.
- **Кнопочное управление** – обучает работе с кнопками и понятием «дребезг контактов».
- **Источники оптического излучения** – работа с лазерным модулем в импульсном режиме с варьированием параметров импульсов.
- **Приёмники оптического излучения** – освоение работы с приёмником лазерного излучения, регистрация сигналов от лазерного модуля.
- **Передача информации по оптическому каналу связи** – сопряжение работы передающей и приёмной систем на базе лазерного излучателя и фотоприёмника.
- **Регистрация мощности, генерируемой солнечной батареей** – демонстрация работы модуля солнечной батареи, освоение приёмов регистрации и визуализации аналоговых сигналов.
- **Сервопривод** – обучение управлению подвижными механическими системами.

Командное творческое задание предусматривает реализацию одного из следующих проектов:

- Сигнализация на базе лазерного излучателя и приёмника.
- Регулируемый источник полноцветного света на основе трёх светодиодов основных цветов.
- Система автоматического позиционирования солнечной батареи оптимально относительно источника света.

Процесс выполнения работ предполагает предварительное изучение теоретического материала в электронной обучающей среде iDO ТГУ, последующее собеседование с преподавателем и реализацию практической части задания. По завершению каждой работы проводится рефлексия. Командное творческое задание защищается в формате краткой презентации.

Для студентов, обучающихся по направлению «Радиофизика, электроника и информационные системы» (модуль «Информационные процессы и системы») предусмотрены лабораторные работы по основам программирования на языке C++ [8], разделенные по следующим темам:

- Блок-схемы алгоритмов.
- Программа на языке C++. Типы данных. Переменные.
- Ветвления и условный оператор. Операторы цикла.
- Оператор цикла for. Массивы.
- Функции.
- Работа с файлами.

Процесс выполнения каждой лабораторной работы состоит в изучении теоретического материала по соответствующей теме, ознакомлении с примерами типовых программ, их запуском в среде программирования с подачей различных наборов входных данных и выполнения заданий на разработку и реализацию алгоритмов. Непосредственно для написания, отладки и запуска программ подходят свободные онлайн системы, доступные в интернете и представляющие собой легковесные интегрированные среды разработки с интуитивно понятным интерфейсом. Далее, обучающиеся приступают к выполнению практических заданий по составлению алгоритмов, их реализации в коде и тестированию. После решения каждой задачи студент составляет отчет, включающий описание составленного и программно реализованного алгоритма в виде блок-схемы. Процесс

защиты отчета по лабораторной работе включает в себя демонстрацию работы программы на тестовых данных в ручном режиме и ответы на вопросы преподавателя. После успешного выполнения заданий лабораторного практикума, студенту предлагается пройти тест, проверяющий усвоение основных теоретических и практических знаний.

Знания и навыки, полученные при прохождении лабораторного практикума, позволят студентам подготовиться к изучению специальных дисциплин модуля «Информационные процессы и системы», таких как, «Программирование на C++», «Компьютерная графика», «Введение в системное администрирование».

Для получения зачета по курсу «Введение в специальность» студенту необходимо посещать лекции, выполнить тестовые задания по теоретической части курса и успешно пройти лабораторный практикум.

Опыт преподавания дисциплины «Введение в специальность» показывает, что студенты в основной массе относятся к ней с интересом, активно выполняют задания лабораторного практикума и не испытывают сложностей на этапе промежуточной аттестации.

Дисциплина "Введение в специальность" является важным этапом в профессиональном становлении студентов радиофизического факультета. Она позволяет сформировать целостное представление о специальности, развить практические навыки работы со специализированным программным обеспечением и оборудованием, а также повысить мотивацию к дальнейшему обучению.

Список публикаций:

- [1] Ильин В.А. История радиофизики. Модульный курс для магистров: Учебное пособие / В. А. Ильин, В. В. Кудрявцев. – М.: МПГУ, 2017. – 320 с.
- [2] Circuit Simulator. URL: <https://www.falstad.com/circuit/circuitjs.html> (дата обращения: 18.06.2025)
- [3] Хаткевич В.А., Щербак Е.Н. // Новые направления развития приборостроения: материалы 11-й междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов (18-20 апреля 2018 г.). Минск: БНТУ, 2018. С. 227.
- [4] Доценко О.А., Жуков А.А. // Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти. Трансформация образования, науки и производства - основа технологического прорыва. материалы международной научно-методической конференции. В 2 ч., Томск, 2023. С. 48–51.
- [5] Zhukov A.A., Dotsenko O.A., Kochetkova T.D., Novikov S.S., Pavlova A.A. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings. - 2015. - С. 7147045.
- [6] Жабин О.С., Василенко Р.А., Маленко Г.И. и др. // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Тринадцатой Международной конференции. - Томск: ТГУ, 2020. - С. 39–40.
- [7] Жуков А.А., Дейкова Г.М. // Известия вузов. Физика. - 2013. - Т. 56, № 10-3. - С. 124–126.
- [8] Страуструп Б. Программирование: принципы и практика использования C++ / Б. Страуструп; пер. с англ. И. Красиков. – М.: Вильямс, 2016. – 1328с.

Приводит ли взаимная связь автоколебательных систем к синхронизму?

Костерова Влада Сергеевна

Новиков Сергей Сергеевич

Томский государственный университет

E-mail: yvk727@yandex.ru, nss@mail.tsu.ru

1. ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что основным колебательным режимом системы взаимосвязанных монохроматических автогенераторов является синхронный (когерентный) режим. Однако, как показывают исследования, при определенных условиях система может демонстрировать нетрадиционное поведение, когда ее колебания приобретают черты случайного, шумоподобного процесса. Такой режим называется разрушением когерентности. В докладе на примере системы двух взаимосвязанных транзисторных автогенераторов обсуждаются условия существования различных, в том числе, когерентных и хаотических колебаний. Изучение этих условий проводится в учебном курсе «Устойчивость динамических систем в задачах радиофизики», читаемом на радиофизическом факультете ТГУ по специальности 03.03.03 Радиофизика. Представленное здесь исследование входит в лабораторный практикум указанного курса и призвано расширить феноменологические представления обучающихся о роли устойчивости в динамических систем со многими степенями свободы.

Теория синхронизации автоколебательных систем достаточно хорошо разработана и является классическим примером теории колебаний. Считается, что в системе связанных автогенераторов при близости их собственных частот устанавливается режим синхронных колебаний. Однако при некоторых условиях синхронный режим может быть неустойчивым. В системе двух связанных автогенераторов в зависимости от типа и величины связи могут существовать различные колебания: классические когерентные (синфазные, противофазные или близкие к ним) и некогерентные (хаотические). Выделяют четыре типа связи: резистивную, реактивную и резонансную. Резистивные связи являются, с точки зрения устойчивости, оптимальными для синфазных, противофазных или близких к ним синхронных колебаний. При реактивных связях условия устойчивости выполняются одновременно как для синфазных, так и для противофазных колебаний. Что же касается резонансной связи, здесь, кроме перечисленных видов колебаний, возможны хаотические режимы. В этом случае синхронные режимы теряют устойчивость, когерентность разрушается и может возникнуть динамический хаос.

В данном исследовании предлагается путем численного моделирования в среде Multisim изучить поведение системы при различных типах и величинах взаимной связи.

2. СИСТЕМА ДВУХ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

На (рис.1) приведена принципиальная схема системы двух автогенераторов, собранных по схеме емкостной трехточки. Колебательные контуры автогенераторов, задающие частоту генерации, образованы элементами L_2 , C_1 , C_3 и L_4 , C_4 , C_7 ; генераторы имеют идентичные схемы. Резисторы R_5 , R_6 и R_{19} , R_4 задают потери резонансных систем автогенераторов. Изменение величин сопротивлений обратной связи R_7 и R_{20} позволяет в широких пределах управлять напряженностью режимов работы транзисторов; эта настройка является одной из ключевых. Цепь взаимной связи автогенераторов представляет собой последовательный резонансный контур, образованный элементами R_{10} , C_5 , L_6 , R_{11} , C_{11} , L_5 и общей нагрузкой R_8 . Резонансная частота связи должна быть близка к частотам автогенераторов. В базовые цепи транзисторов введены генераторы ступенчатых напряжений, с их помощью тестируются устойчивости синхронных колебаний-мод. Так, при однополярных ступеньках (++) в системе первоначально возбуждаются синфазные колебания, а в случае разнополярных (+-) – противофазные. Сохранение фазировки колебаний означает устойчивость той или иной синхронной моды. Спонтанный переход на другую моду означает неустойчивость первой.

На основе приведенной схемы легко реализуются основные варианты связи автогенераторов: резистивная связь, реактивная связь, резонансная связь. Вид и преобразование колебаний автогенераторов в процессе динамики регистрируются с помощью осциллографа. В случае резистивной связи автогенераторы вместо резонансной цепи соединяются друг с другом через последовательный резистор. При реактивной связи автогенераторы соединяются через реактивный элемент: емкость или индуктивность. В данном опыте используется емкостная связь.

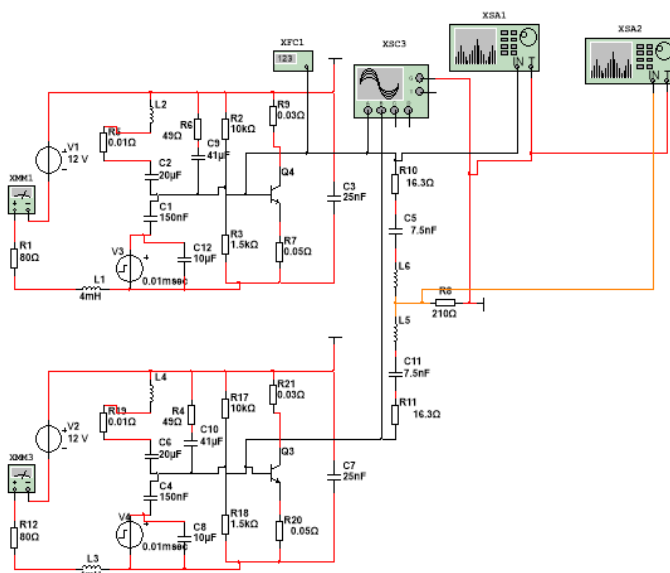
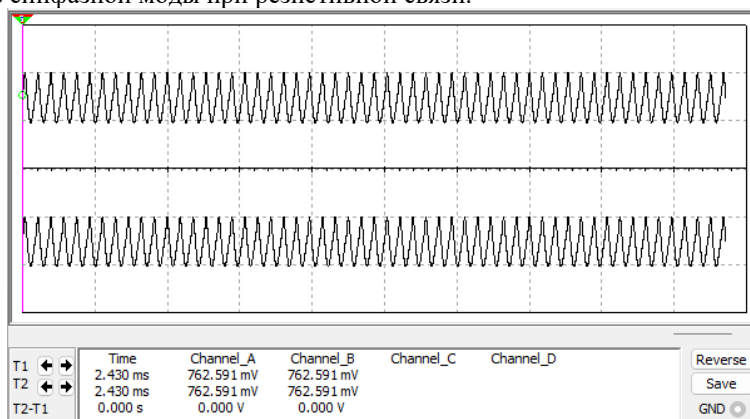


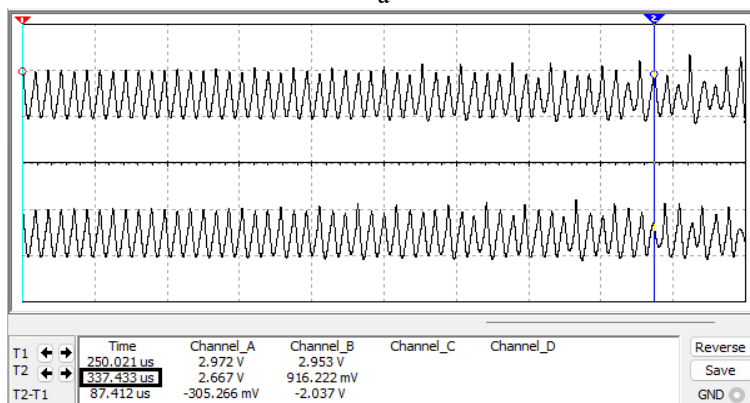
рис.1. Схема системы связанных автогенераторов с резонансной связью

3. ВИДЫ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

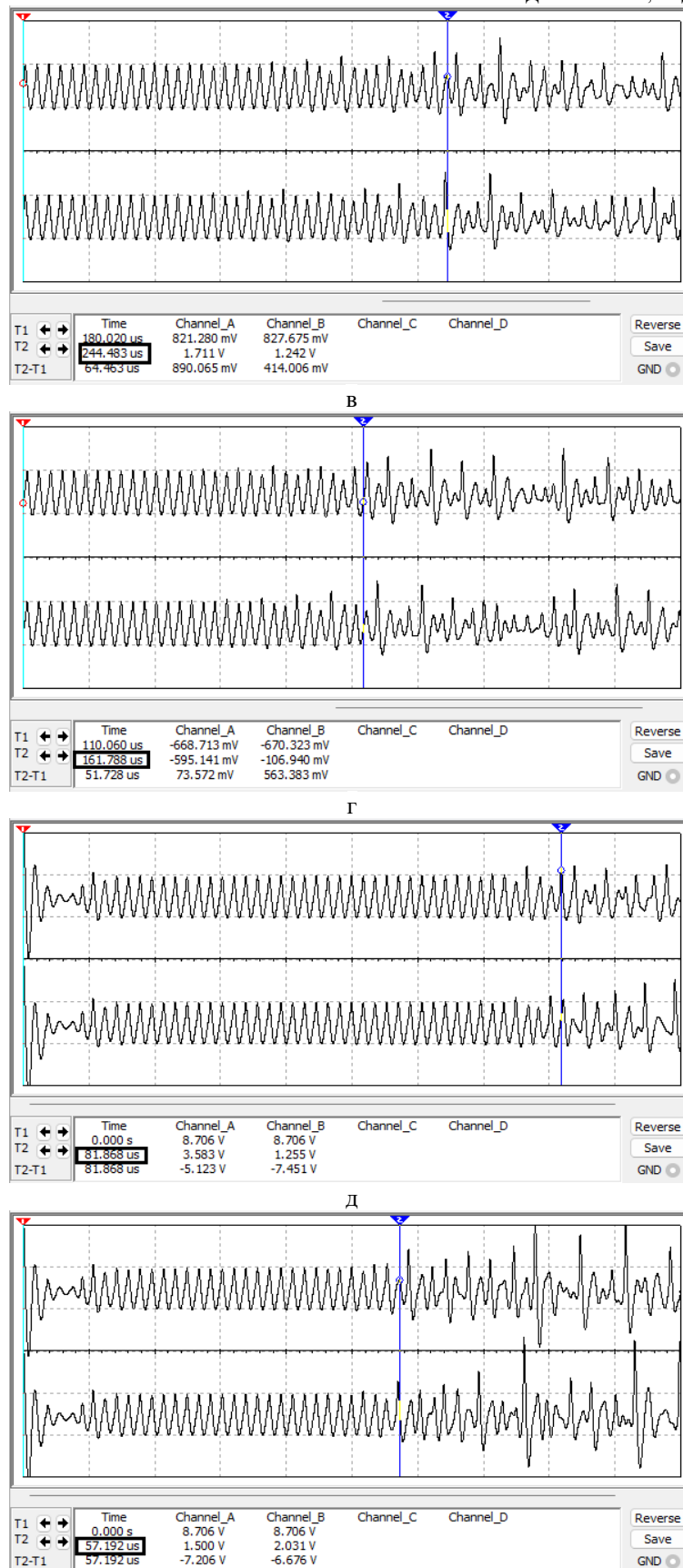
Резистивная связь. В случае одинаковых и нерасстроенных по частоте автогенераторов независимо от начальных условий (++) или (+-) система «выходит» только на режим синфазных стационарных колебаний. При возбуждении (++) колебания с самого начала синфазны и остаются таковыми (рис.2а) до наступления стационарного режима. При начальных условиях (+-) колебания сначала скачком возбуждаются в противофазе, затем за несколько периодов быстро затухают, и система переходит в режим синфазных колебаний. Данный опыт подтверждает высокую устойчивость синфазной моды при резистивной связи.



а



б



е

рис.2. Осциллограммы колебаний при разрушении синфазного режима $R_3=0.05 \text{ Ом}$: а) $R_{CB}=16.3 \text{ Ом}$; б) $R_{CB}=11.2 \text{ Ом}$; в) $R_{CB}=10.2 \text{ Ом}$; г) $R_{CB}=9.1 \text{ Ом}$; д) $R_{CB}=5 \text{ Ом}$; е) $R_{CB}=2 \text{ Ом}$

Реактивная связь. В случае реактивной связи условия устойчивости выполняются одновременно для обеих мод. Действительно, при синфазных (++) начальных условиях в системе возникает устойчивый синфазный режим. При задании начальных условий (+-) в системе устанавливается также устойчивый, но уже

противофазный режим. Данное свойство хорошо известно в теории связанных автогенераторов.

Сильная резонансная связь. Хаотические колебания возникают в системе, когда ни одна из перечисленных когерентных мод не является устойчивой. Для разрушения этих мод необходимо выполнение двух условий. Основным (необходимым) условием является наличие сильных резонансных свойств связи, выражаемое неравенством $C_{12} \geq C$, где C_{12} есть крутизна мнимой части проводимости $y_{12}(j\omega)$ четырехполюсника связи, а C – емкости контуров автогенераторов. Данное условие было получено в [1] и обсуждалось в рамках указанного курса. Параметр C_{12} фактически описывает добротность резонанса связи и может регулироваться сопротивлениями R_{10} и R_{11} . При выполнении данного условия синфазная мода теряет устойчивость и система переходит на генерацию противофазной моды. Подавление, то есть неустойчивость противофазного типа колебаний реализуется другим способом, а именно – в перенапряженном режиме работы транзисторов, что достигается выбором очень малых значений эмиттерных сопротивлений $R_7 = R_{20}$.

Если указанные условия выполнены, то в системе безусловно возникают хаотические колебания. Наглядной иллюстрацией влияния резонансных свойств связи на неустойчивость когерентных колебаний является следующий эксперимент. В качестве исходной настройки можно выбрать следующие значения элементов: $R_7 = R_{20} = R_3 = 0.04$ Ом; $R_{10} = R_{11} = R_{св} = 16-17$ Ом. Такие высокие значения сопротивлений цепи связи снижают ее добротность настолько, что условие разрушения $C_{12} \geq C$ оказывается невыполненным и в системе устанавливается режим синфазных колебаний (рис.2а). Данное состояние схемы является исходным в данном опыте. Далее последовательно увеличиваем добротность резонанса связи путем уменьшения сопротивлений $R_{св}$ (рис.2б-д). Уже при $R_{св} = 11.2$ Ом синфазный режим становится неустойчивым и на осциллограммах появляются признаки неперiodичности (рис. 2б). При дальнейшем уменьшении $R_{св}$ степень хаотизации возрастает, так что спектр колебаний становится непрерывным в широком диапазоне частот (рис.3).

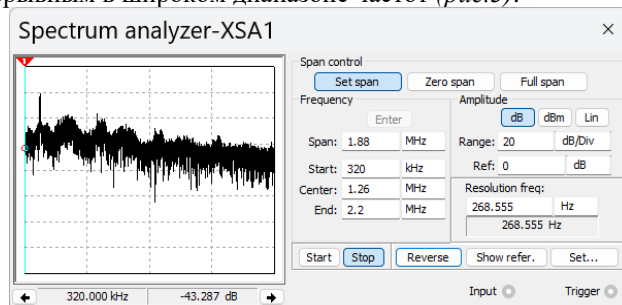


рис.3. Спектр хаотических колебаний, $R_3 = 0.05$ Ом, $R_{св} = 5$ Ом

Анализ осциллограмм позволяет заметить, что время разрушения когерентности синфазной моды сокращается примерно в пропорции к уменьшению сопротивления связи. Такие свойства динамики системы подтверждают существование порога неустойчивости, при превышении которого когерентность разрушается, и система переходит в режим динамического хаоса. Этот порог однозначно связан с резонансными свойствами канала взаимной связи автогенераторов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный численный эксперимент позволяет ответить на вопрос, сформулированный в названии доклада. Оказывается, наличие взаимной связи между автогенераторами не обязательно приводит к когерентности их колебаний, а режим динамического хаоса не является частной экзотикой. В основе существования этих колебаний лежат свойства устойчивости (или неустойчивости) движений.

Список публикаций:

[1] Новиков С. С., Усюкевич А. А. Неустойчивость синхронных режимов в системе двух связанных СВЧ - автогенераторов, // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 11. С. 51 – 56.

«неМузей радиофизики» как просветительский и образовательный проект

Кочеткова Татьяна Дмитриевна

Вячистая Юлия Валерьевна, Доценко Ольга Александровна, Павлова Александра Андреевна

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: tdk_tomsk@mail2000.ru

Идея создания музея радиофизики на радиофизическом факультете Томского государственного университета (РФФ ТГУ) витала в воздухе давно, отражая потребность в сохранении исторического наследия факультета. Однако путь к воплощению оказался непростым, но в итоге привел к созданию уникального формата – «неМузея», который сочетает в себе бережное отношение к истории и современный подход к просветительской деятельности. Опыт сохранения старинных приборов и использования «сокровищ» из пыльных углов лабораторий для наглядной иллюстрации скорости научно-технического прогресса, воспитания молодого поколения инженеров и расширения кругозора студентов оказался интересным приключением, в меру полезным содержанием и убедительным поводом для праздника.

Основные моменты становления можно выделить как вехи нашего пути.

Несостоявшийся проект Музея науки и техники. Участие РФФ в общегородском проекте не привело к реализации задуманного, но опыт был полезным. Были изучены экспозиции мировых музеев подобного профиля: Политехнического музея в Москве на ВДНХ, Политехнического музея в Праге, Музея связи им. А.С. Попова в Санкт-Петербурге, Музея А.С. Попова в Екатеринбурге, Парк чудес «Галилео» в Новосибирске. В воображении и на бумаге сложился образ богатой экспозиции на тему радиофизики и были подобраны некоторые наглядные материалы.

Международная выставка «Радиофизика и электроника. РиЭ-2012». Организация исторической экспозиции в рамках конференции «Актуальные проблемы радиофизики» в 2012 году показала наличие богатой коллекции старинных приборов. Вдохновлял интерес, проявленный посетителями, к историческому стенду.

Книжный шкаф как артефакт. Подаренный кафедре радиоэлектроники старинный книжный шкаф стал отправной точкой для создания первой витрины и символом будущего музея. Реставрация шкафа стала общим делом сотрудников и студентов.

Опыт Музея истории физики. Посещение Музея истории физики ТГУ помогло осознать масштаб работы по созданию полноценного музея и огромный объем документации, к ведению которой нам ещё рано приступать. Это определило формат «неМузея».

Открытие. Торжественная церемония открытия первой экспозиции «неМузея радиофизики» состоялась 13 декабря 2024 года. Дата была приурочена к годовщине доклада Генриха Герца на заседании Берлинской академии наук 13 декабря 1888 г. по заключительной работе цикла «О лучах электрической силы».

Концепция: «неМузей» – это общественная организация, объединяющая энтузиастов, стремящихся сохранить и популяризировать историю радиофизики.

Основные задачи «неМузея» – сбор, хранение и экспонирование исторических приборов и материалов, а также просветительская деятельность.

Современное состояние. Сейчас наш «неМузей радиофизики» представляет собой шкаф с размещенными внутри экспонатами в количестве 36 единиц хранения. Они отнесены к разделам: Инструменты, Измерительные приборы, Электровакуумные приборы, Электрорадиокомпоненты. На очереди – Предметы вычислительной техники. Шкаф стоит в коридоре учебного корпуса и доступен для обозрения для студентов на переменах или гостей корпуса в рамках экскурсии.

Сразу стало понятно, что просто показать экспонаты – слишком мало, хотя уже интересно. Для любознательных посетителей параллельно с физической экспозицией создается виртуальный музей на сайте радиофизического факультета rff.tsu.ru, включающий подробное описание экспонатов. На боковой стенке шкафа размещены QR-коды страниц сайта, где можно узнать об истории создания каждого предмета, его технические характеристики, назначение и области применения. Поиском этой информации занимаются студенты из инициативной группы. Также это может быть заданием по курсу «Материалы и радиокомпоненты» или «Основы радиоэлектроники». Кроме описаний экспонатов виртуальная часть неМузея содержит воспоминания ветеранов – специалистов о работе с этими приборами, а также историю создания и почетный список меценатов, внесших вклад в создание неМузея своим трудом или предметами. Посмотреть страничку неМузея можно с помощью QR-кода на рис. 1.



рис. 1 QR-код страницы сайта РФФ «неМузей радиофизики»

Таким образом, мы побуждаем студентов к изучению технической информации и истории техники. В этом

состоит просветительская и образовательная сторона нашего проекта.

Перспективы развития. Создание «неМузея» – это только первый шаг. В планах – расширение экспозиции, привлечение новых экспонатов, разработка интерактивных экспонатов и дальнейшее развитие виртуальной платформы.

В заключении мы с уверенностью можем сказать, что «неМузей радиофизики» на РФФ ТГУ – результат коллективного энтузиазма, попытка сохранения исторического наследия и просвещения, которая может быть признана вполне успешной.

Создание «неМузея радиофизики» – это важный вклад в сохранение истории науки и техники, а также в формирование научно-технической культуры у студентов и широкой общественности. «неМузей» станет площадкой для общения и обмена опытом между поколениями радиофизиков, а также центром притяжения для всех, кто интересуется историей и достижениями отечественной науки.

Опыт организации междисциплинарных проектов при изучении дисциплин "Датчики-преобразователи первичной информации" и "Виртуальные приборы LabView"*Кулешов Григорий Евгеньевич**Жуков Андрей Александрович**Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия**E-mail: gyk@mail.tsu.ru*

В современном мире, где автоматизация и сбор данных играют важную роль во всех сферах деятельности, понимание принципов работы датчиков, умение их правильно выбирать, подключать и программировать для получения и обработки информации становятся востребованными навыками для будущих инженеров.

Особую роль в процессе автоматизации работы с датчиками играет система LabVIEW [1], позволяющая создавать системы сбора и обработки данных. LabVIEW обеспечивает визуальное программирование, что упрощает разработку интерфейсов для взаимодействия с датчиками, а также предоставляет инструменты для анализа и визуализации данных. Визуальный подход позволяет студентам быстро осваивать работу с системами сбора данных, а интеграция LabView с широким набором датчиков и оборудования упрощает процесс разработки и отладки проектов, позволяя студентам сосредоточиться на решении инженерных задач.

Для изучения принципов работы датчиков и формирования навыков их программирования на радиофизическом факультете ТГУ для студентов второго курса в осеннем семестре изучаются дисциплины "Датчики-преобразователи первичной информации" и "Виртуальные приборы LabView".

Курс "Датчики-преобразователи первичной информации" направлен на формирование у студентов фундаментальных знаний и представлений о принципах работы различных типов датчиков, их характеристиках и областях применения, а также на формирование умений и навыков практического использования приемов автоматизации, контроля и электрических измерений неэлектрических величин с использованием датчиков и сенсорных устройств.

Данный курс включает в себя изучение следующих разделов:

- Классификация датчиков. Электрические измерения неэлектрических величин.
- Физические основы и принципы работы датчиков.
- Основные характеристики датчиков.
- Интерфейсы, схемы включения и особенности работы датчиков в составе управляющих микроконтроллеров.
- Программно-аппаратная платформа NI ELVIS II+ и практическое использование датчиков.

В рамках курса проводятся цикл практических занятий. В ходе выполнения данного цикла практических занятий студенты знакомятся с реальными датчиками, с помощью программно-аппаратной платформы NI ELVIS II+ изучают их характеристики и проводят измерения различных физических величин.

Курс "Виртуальные приборы LabView" знакомит студентов с принципами визуального программирования и созданием измерительных систем. Цель курса изучение основ программирования в программном пакете LabVIEW и методов создания виртуальных приборов (ВП) для проведения физических измерений. В рамках дисциплины изучаются [2]:

- Среда LabVIEW (лицевые панели, элементы управления и индикаторы, блок-диаграммы).
- Основы программирования в LabVIEW (данные и линейные структуры, соединения, практика редактирования и отладки программы).
- Ветвления и циклы. Работа с массивами. Графические возможности. Создание подпрограмм.
- Работа с сигналами и аппаратурой в системе LabVIEW [2].

Для работы с измерительной аппаратурой в системе LabVIEW используется программно-аппаратная платформа (комплект измерительных приборов) NI ELVIS II+ [3]. Эта аппаратура широко используется на радиофизическом факультете в лабораторных практикумах по радиотехническим дисциплинам [4-6].

Для методического и информационного сопровождения этой дисциплины в среде обучения iDO ТГУ (Moodle) разработан электронный учебный курс (ЭУК), в котором размещены необходимые информационные и контрольные материалы для обеспечения самостоятельной и аудиторной работы студентов.

Для лучшего закрепления и усвоения полученных знаний в рамках курсов "Виртуальные приборы LabView" и "Датчики-преобразователи первичной информации" кроме лекций, практик и лабораторных работ предусмотрено выполнение студентами междисциплинарных проектов, связанным с программированием датчиков. Студентам на выбор предлагается 35 тем проектов для индивидуальной (20 тем) и групповой работы

(15 тем). По проекту студентам необходимо провести обзор литературы по принципу работы выбранного датчика, его структуре и применению, а также разработать в среде LabVIEW программу для работы с выбранным датчиком. В конце семестра студентами сдается, оформленный по ГОСТу, итоговый отчет по выбранному проекту.

В качестве примера выполнения задания по проекту в электронном учебном курсе приведены материалы по работе с модулем фоторезистора KY-018 [7], который представляет собой последовательное соединение фоторезистора и резистора с фиксированным сопротивлением, с возможностью измерения падения напряжения на фоторезисторе. Также в ЭУК приведено описание виртуальных приборов для оценки уровня освещенности на основе использования указанного модуля. Лицевая панель и блок-диаграмма одного из таких ВП приведена на рисунке 1.

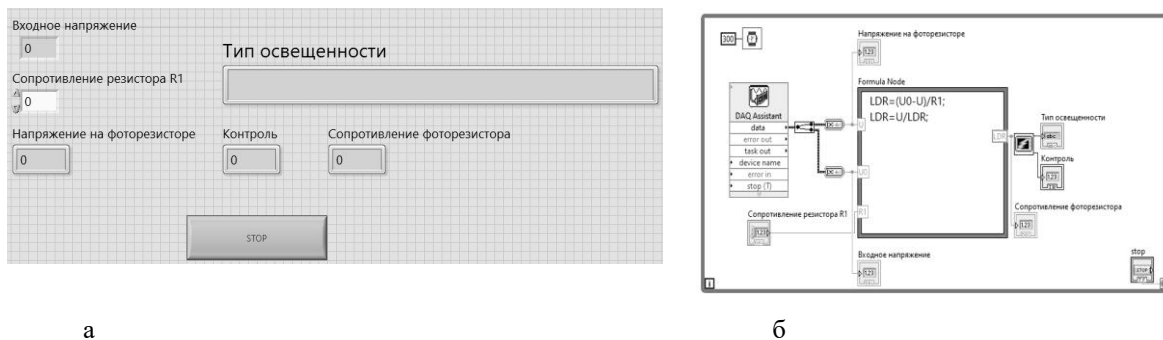


Рис.1 Лицевая панель (а) и блок-диаграмма (б) ВП для оценки уровня освещенности

На лицевой панели виртуального прибора размещены индикаторы и элемент управления, позволяющие оценить уровень освещенности фоторезистора. Блок-диаграмма ВП включает экспресс-ВП «DAQ Assistant», измеряющий входное напряжение, подаваемое на модуль KY-018, и падение напряжения на фоторезисторе. По измеренным напряжениям в узле формул «Formula Node» вычисляется сопротивление фоторезистора и по этой величине в структуре «Case», размещенной в подВП, оценивается уровень освещенности.

Для успешной реализации проекта студентам необходимы знания и навыки, полученные при изучении обеих дисциплин. Результаты выполнения заданий и проверки текста итогового отчета по междисциплинарному проекту учитываются при выставлении итоговой оценки студентам в обоих курсах.

Опыт организации таких междисциплинарных проектов в последние несколько лет показывает, что значительная часть студентов активно участвует в их выполнении и данные студенты не испытывают сложностей на этапе промежуточной аттестации. Знания и навыки, полученные при выполнении проектов, используются при изучении ряда дисциплин на старших курсах [8] и при выполнении курсовых и дипломных работ [9].

Междисциплинарные проекты позволяют студентам лучше интегрировать знания, полученные в рамках различных дисциплин, и формировать практические навыки, необходимые для дальнейшей профессиональной деятельности. Внедрение междисциплинарных проектов, объединяющих знания о датчиках и программировании в LabView, является эффективным способом подготовки высококвалифицированных специалистов.

Список публикаций:

- [1] Трэвис, Д. *LabVIEW для всех: справочник* / Д. Трэвис, Д. Кринг. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 904 с.
- [2] Жуков А.А. *Система программирования LabVIEW. Основы работы: Учебно-методическое пособие*. — Томск: Изд-во СТТ, 2020. — 150 с.
- [3] NI ELVIS II – *Руководство пользователя*. — URL: <https://nitech.nstu.ru/upload/lib/NI%20ELVIS%20II%20User%20Manual.pdf> (дата обращения 02.07.2025).
- [4] Доценко О.А., Жуков А.А. // *Методические, технологические и организационные аспекты электронного обучения: сб. ст. по результатам науч.-метод. конф.* Томск: НИ ТГУ, 2022. С. 8–13.
- [5] Zhukov A.A., Dotsenko O.A., Kochetkova T.D., Novikov S.S., Pavlova A.A. // *2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings*. - 2015. - С. 7147045.
- [6] Жабин О.С., Василенко Р.А., Маленко Г.И. и др. // *Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Тринадцатой Международной конференции*. - Томск: ТГУ, 2020. - С. 39–40.
- [7] KY-018 Photoresistor module. — URL: <https://fabacademy.org/2024/labs/puebla/students/andrea-hortega/assets/images/week11/KY-018-Joy-IT.pdf> (дата обращения 05.06.2025).
- [8] Жуков А.А., Доценко О.А., Вагнер Д.В. // *Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023. Сборник трудов X Международной научно-практической конференции*. Томск, 2023. С. 348–350.
- [9] Жуков А.А., Журавлев В.А., Атамасов В.В., Маленко Г.И. // *Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023. Сборник трудов X Международной научно-практической конференции*. Томск, 2023. С. 314–316.

Интеграция ПЛК и CoDeSys в образовательный процесс: разработка прототипа КСБ локального объекта для формирования профессиональных компетенций студентов РФФ. НИ ТГУ

Лопошниченко Дмитрий Алексеевич
Томский государственный университет
E-mail: dmitrylr@yandex.ru

В современных условиях динамичного развития технологий и усложнения производственных процессов, обеспечение безопасности локальных объектов приобретает первостепенное значение. Возрастающие требования к оперативному обнаружению потенциальных угроз и адекватному реагированию на чрезвычайные ситуации диктуют необходимость разработки и внедрения интеллектуальных, гибких и масштабируемых систем безопасности. Данная потребность особенно актуальна в контексте объектов критической инфраструктуры, где даже незначительные сбои или отклонения от заданных параметров могут привести к серьезным последствиям. В связи с этим, создание комплексных систем безопасности (КСБ), интегрирующих в себе функции мониторинга, анализа и управления, становится не просто желательным, а необходимым условием для обеспечения стабильной и безопасной работы. В то же время в учебном процессе остро стоит задача разработки методических материалов, способствующих освоению студентами принципов построения и программирования таких систем. Цель этой работы заключается в разработке прототипа системы безопасности, предполагающего комплексный мониторинг ключевых параметров окружающей среды и взаимодействия с оператором, а также в создании методических основ для применения данного прототипа в образовательном процессе по автоматизации и программируемым логическим контроллерам (ПЛК).

В рамках представленного исследования был разработан прототип КСБ локального объекта, в основу которого положена аппаратная платформа ПЛК Элси-ТМК, функционирующая под управлением программной среды CODESYS версии 3.5. Выбор данной платформы обусловлен рядом факторов, включая ее надежность, гибкость, широкие возможности программирования и интеграции, а также доступность и распространенность на рынке. Кроме того, CoDeSys представляет собой мощную и интуитивно понятную среду разработки, поддерживающую стандарты МЭК 61131-3, что обеспечивает переносимость и масштабируемость разработанных решений. Важно отметить, что данный прототип КСБ не только решает практическую задачу обеспечения безопасности, но и является эффективным инструментом для обучения студентов Радиофизического факультета, позволяя им получить практический опыт работы с современными ПЛК, датчиками и программным обеспечением.

Архитектура разработанной КСБ предусматривает многоуровневую структуру, включающую в себя сбор данных с датчиков, обработку и анализ информации, формирование управляющих сигналов и передачу данных на верхний уровень системы. Для мониторинга параметров окружающей среды в прототипе используются четыре типа датчиков, каждый из которых выполняет свою специфическую функцию:

Датчик температуры и влажности DHT11. Данный датчик предназначен для измерения температуры и относительной влажности воздуха в контролируемой зоне. Полученные данные используются для контроля микроклимата и предотвращения аварийных ситуаций, связанных с перегревом оборудования, образованием конденсата или развитием коррозии. В частности, выход параметров за допустимые значения может служить сигналом для включения системы вентиляции или кондиционирования. DHT11 использует 1-Wire протокол для передачи данных.

Инфракрасный датчик движения HC-SR501. Этот датчик обеспечивает обнаружение движения в охраняемой зоне. Принцип его работы основан на регистрации изменений инфракрасного излучения, исходящего от живых существ. В случае обнаружения движения, датчик формирует сигнал тревоги, который может быть использован для включения системы оповещения, видеонаблюдения или блокировки доступа в охраняемую зону. Важным аспектом является настройка чувствительности и дальности действия датчика для минимизации ложных срабатываний.

Газовый датчик MQ-2. Он предназначен для обнаружения горючих и токсичных газов в воздухе, таких как метан, пропан, угарный газ и другие. При превышении установленного порога концентрации газа, датчик генерирует сигнал тревоги, который может быть использован для активации системы вентиляции, перекрытия газовых магистралей или эвакуации студентов и сотрудников. Выбор MQ-2 обусловлен его широкой распространенностью и возможностью обнаружения широкого спектра газов, однако следует учитывать необходимость калибровки датчика для обеспечения высокой точности измерений.

Датчик освещенности GL5528. Датчик освещенности, представляющий собой фоторезистор, используется для контроля уровня освещенности в контролируемой зоне. Полученные данные могут быть использованы для автоматического управления освещением, что позволяет оптимизировать энергопотребление и повысить безопасность в темное время суток. Кроме того, данные об освещенности могут быть использованы для обнаружения несанкционированного проникновения в помещение.

Программное обеспечение КСБ, разработанное в среде CODESYS, реализует алгоритмы обработки данных с датчиков, логику принятия решений и управление исполнительными механизмами. Логика принятия решений основана на заданных порогах и правилах, которые определяют реакцию системы на различные события. Управление исполнительными механизмами осуществляется с помощью релейных выходов ПЛК, которые позволяют подключать различные устройства, такие как сирены, световые индикаторы,

электромагнитные замки и другие.

Реализация данного прототипа КСБ имеет важное методическое значение для подготовки специалистов Радиофизического профиля. Студенты получают возможность не только изучить теоретические основы построения автоматизированных систем безопасности, но и приобрести практические навыки программирования ПЛК, работы с датчиками и программным обеспечением. В рамках учебного процесса студенты могут разрабатывать алгоритмы управления КСБ, проводить отладку и тестирование программного обеспечения, а также анализировать результаты работы системы. Это позволит им получить ценный опыт, который будет востребован в их будущей профессиональной деятельности.

Перспективы дальнейшего развития данного проекта включают в себя расширение функциональности КСБ за счет интеграции дополнительных датчиков и исполнительных механизмов, а также разработку более сложных алгоритмов управления и анализа данных. Кроме того, планируется разработка пользовательского интерфейса, который позволит операторам системы контролировать состояние объекта и управлять работой КСБ. Важным направлением развития является также интеграция КСБ с другими системами безопасности, такими как системы видеонаблюдения и контроля доступа.

В заключение следует отметить, что разработанный прототип КСБ представляет собой эффективное решение для обеспечения безопасности локальных объектов и является ценным инструментом для обучения студентов Радиофизического факультета. Интеграция теоретических и практических аспектов обучения позволяет формировать у студентов профессиональные компетенции, востребованные в современной промышленности и научных исследованиях. Представленный опыт разработки способствует совершенствованию учебного процесса и расширению возможностей междисциплинарной подготовки.

Белл-Ланкастерская система в программе “Радиофизический класс. Оптические технологии”Майер Ксения Александровна¹Куркова Дарья Валерьевна¹, Курков Михаил Михайлович¹, Минина Ольга Владимировна^{1,2,3}¹Томский государственный университет,²Институт оптики атмосферы им. академика В.Е. Зуева СО РАН,³Российский университет транспорта

E-mail: kseniamayer955@gmail.com

Введение

Современная система образования сталкивается с рядом вызовов, ключевыми из которых являются снижение мотивации школьников к изучению точных наук, ограниченность практико-ориентированных форматов обучения и недостаточная преемственность между школой и университетом [1]. В условиях стремительного технологического развития и повышенных требований к инженерным и исследовательским компетенциям остро встаёт задача разработки образовательных программ, способствующих повышению уровня образования и развитию прикладных навыков у старшеклассников. Возрастает необходимость внедрения инновационных образовательных методов, таких как Белл-Ланкастерская система [2]. Другое ее название – система взаимного обучения. Она предполагает, что более старшие и знающие ученики обучают учеников младшего возраста.

В рамках этой работы представлены результаты внедрения Белл-Ланкастерской системы в образовательную программу "Радиофизический класс. Оптические технологии", реализуемую на радиофизическом факультете Томского государственного университета (ТГУ). Эта программа дополнительного образования ориентирована на учащихся 10-х и 11-х классов с повышенным интересом к точным наукам и инженерным дисциплинам. Она направлена на закрепление и углубление базовых знаний по физике, математике и информационным технологиям, на формирование инженерных и исследовательских навыков, а также на развитие системного и аналитического мышления, навыков коммуникации и командной работы. Ключевой особенностью программы является выполнение школьниками исследовательских проектов и публичная защита этих проектов на всероссийских конференциях и конкурсах проектов. При проведении исследований учащиеся учатся самостоятельно искать информацию, анализировать данные, делать выводы и презентовать результаты своей работы. В целом исследовательская и проектная деятельности играют важнейшую роль в современном образовании и развитии личности. Они способствуют развитию критического мышления, аналитических навыков, творческого подхода, умения решать сложные и нетривиальные задачи, а также помогают сформировать навыки командной работы и планирования времени. Эти умения ценны не только в учебной сфере, но и в будущей профессиональной деятельности. Такой опыт способствует формированию активной жизненной позиции, ответственности, инициативности и способности к инновациям.

Наставниками у школьников были студенты бакалавриата и магистратуры радиофизического факультета, обучающиеся на кафедрах радиоэлектроники, оптико-электронных систем и дистанционного зондирования, квантовой электроники и фотоники. Участие студентов в этой образовательной программе также позволяет рассматривать их в качестве ролевых моделей, которые демонстрируя увлеченность наукой и проектной деятельностью, что создает дополнительную мотивацию для школьников. Также студенты рассказывали школьникам о перспективах образования по специальностям, связанным с оптическими технологиями, радиофизикой и лазерной техникой.

1. Структура образовательной программы "Радиофизический класс. Оптические технологии"

Программа организована по модульной системе и состоит из четырех взаимосвязанных блоков, которые представлены в таблице 1. Каждый модуль использует результаты обучения, полученные учащимися в рамках предыдущего модуля. Это обеспечивает логическое перетекание модулей друг в друга, гарантируя непрерывность образовательного процесса. В соответствии с планом и структурой программы (таблица 1) занятия проходят 1 раз в неделю, а их продолжительность составляет 4 академических часа. Структура образовательной программы указана в таблице ниже:

Модуль	Название	Часы всего /теор. /практ.	Форма отчетности
Модуль 1	Основы геометрической и физической оптики	40 / 16 / 24	Мини-соревнования, тестирование, опрос
Модуль 2	Лабораторный практикум	50 / 14 / 36	Защита отчетов по лабораторным работам
Модуль 3	Исследовательские проекты	34 / 14 / 20	Представление отчетов по проекту
Модуль 4	Итоговый проект	20 / 6 / 14	Защита проектов
Итого		144 / 50 / 94	

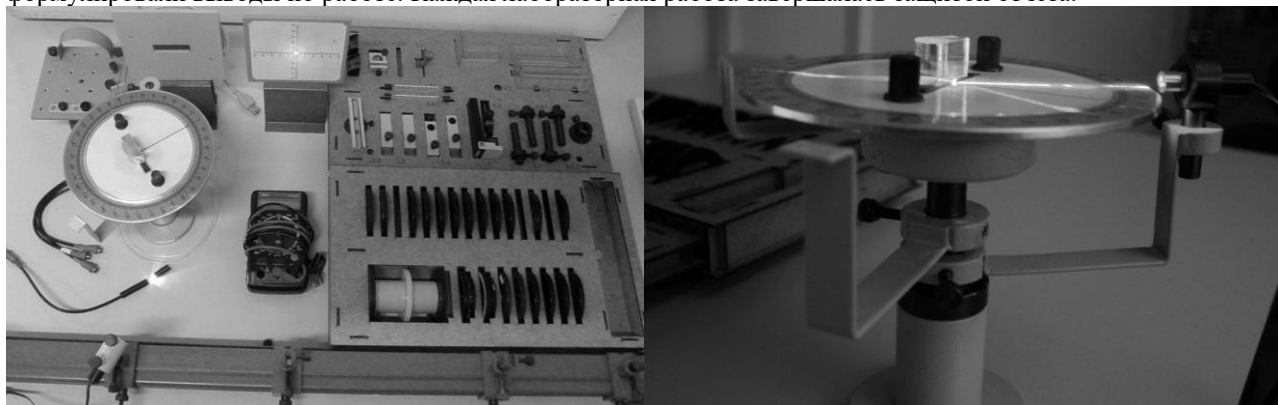
Общая продолжительность программы составляет 144 часа. Из них большая часть отводится на выполнение лабораторных работ и исследовательских проектов.

2. Форма занятий

В рамках первого модуля школьники знакомятся с природой света, законами геометрической оптики, основными

явлениями физической оптики (интерференцией, дифракцией, дисперсией, поляризацией), принципами работы оптических и оптико-электронных приборов, источников и приемников оптического излучения. Занятия проводятся в виде интерактивных мини-лекций, практических занятий, мини-соревнований, мастер-классов, консультаций. Каждый вид предполагал как индивидуальный формат работы школьников, так и групповой. Контроль усвоения материала проводился в ходе мини-соревнований, интерактивного тестирования и опросов. Также были организованы экскурсии в обсерваторию ТГУ [3] и научные институты Сибирского отделения Российской академии наук, расположенные в Томске.

Во втором модуле школьники в рамках лабораторного практикума работают с измерительным оборудованием, последовательно выполняя лабораторные работы по отражению и преломлению света на границе раздела двух сред, полному внутреннему отражению, интерференции и дифракции света. Основные работы проводились с использованием учебно-методического комплекса для демонстраций и лабораторных работ по оптике – «УМОГ – 3» (рис. 1а). Его основные элементы – это оптическая скамья с рейтерами, полупроводниковый лазер, поляризатор, анализатор, фотоприемник, экран с двумя точечными отверстиями, дифракционные решетки, матовый экран, рассеивающая линза, линза для получения колец Ньютона. Также школьники работали с прибором Гартля (рис. 1б), мультиметрами и микроскопами. Школьники проводили измерения, обрабатывали и анализировали данные, полученные в ходе прямых и косвенных измерений, а после этого писали отчеты, и формулировали выводы по работе. Каждая лабораторная работа завершалась защитой отчета.



а) б)
рис. 1 – «УМОГ - 3» (а) и прибор Гартля (б) [4]

Третий модуль программы посвящён исследовательской и проектной работе. Его основная цель – практическое применение полученных знаний и навыков. Школьники формулируют исследовательскую задачу, проводят измерения или программный эксперимент и представляют результаты перед экспертной комиссией на семинаре в ТГУ. Более подробное описание этой деятельности представлено в разделе 3.

Четвертый модуль предполагает подготовку к защите проектов в рамках выступления на Всероссийской конференции студенческих научных исследований и инноваций (СНИИ) [5] (секция «Шаг в науку») и участия во Всероссийском конкурсе студенческих и школьных проектов «Радиофизика, измерения, автоматизация» [6].

3. Проектная деятельность

В 2024-2025 учебном году темами реализованных проектов были «Автоматизированное обнаружение объектов на основе методов компьютерного зрения» и «Исследование YOLOv8 на возможность распознавания зоопланктона на голограмме».

Первый проект был направлен на обнаружение облачности на фотографиях неба (их называют AllSky-изображение) при помощи обученной школьниками нейронной сети. При выполнении проекта был создан набор специально подготовленных фотографий (датасет), на которых школьники выделяли контуры облаков с помощью программы CVAT. Затем в редакторе VS Code, они настраивали нейросеть типа YOLO для нахождения облаков на изображениях. После подготовки нейросети была проведена проверка на новых AllSky-изображениях. Завершающим этапом работы над проектом стало сравнение результатов, полученных в рамках детекции и сегментации.

В ходе второго проекта школьники познакомились с основами цифровой голографии и методами компьютерного зрения. Работа над проектом включала как теоретические, так и практические этапы:

- На мини-лекциях школьники изучили принципы работы цифровой голографической камеры, разобрались с принципами формирования голографических изображений и установка для их получения.
- Затем школьники приступили к анализу реальных цифровых голограмм, полученных в лабораторных условиях. Одной из ключевых задач стало определение оптимальной плоскости фокусировки – то есть выбор сечения, в котором объекты на голограмме наиболее чётко визуализируются.
- Следующим этапом была ручная разметка изображений – школьники определяли контуры объекта, выделяли их на изображении и присваивали метки.
- На основе размеченных данных была обучена нейросетевая модель YOLOv8, которая затем использовалась для автоматического распознавания зоопланктона на новых голографических изображениях.

Проекты были успешно выполнены, обучающиеся приняли участие в XXII Всероссийской конференции студенческих научных исследований и инноваций [5] и конкурсе студенческих и школьных проектов РИА-2025 [6]. По итогам этих мероприятий школьники и их проекты были отмечены дипломами I и II степени [7, 8]. Такой результат особенно ценен, поскольку для многих школьников это был первый опыт участия в конференциях и конкурсах.

4. Анализ результатов

По итогам реализации программы обучающиеся прошли анонимное анкетирование, которое показало, что участники остались довольны этой программой, полученными знаниями и навыками. Большинство отметили интересные задания, дружелюбную атмосферу и полезность полученных знаний. Особо отмечалась возможность пообщаться со студентами-наставниками и преподавателями радиофизического факультета, задать вопросы о поступлении, студенческой жизни, перспективах обучения и последующего трудоустройства. Благодаря этому у учащихся сформировалось более чёткое представление о специфике обучения на инженерно-техническом направлении и о внутреннем устройстве факультета и университета. Среди наиболее значимых мероприятий школьники выделили конкурс проектов, конференцию, а также проведенный в рамках первого модуля мастер-класс по нейронным сетям и искусственному интеллекту.

Для студентов участие в программе также стало ценным опытом. Работа со школьниками помогла им развить профессиональные и личные качества: терпение, ответственность, пунктуальность, умение ясно доносить информацию, организовывать образовательный процесс. Такой опыт помог студентам повысить уверенность в себе, своих знаниях и навыках, еще сильнее осознать значимость выбранного направления подготовки, стать еще более мотивированными для дальнейшего профессионального развития. Результаты опроса студентов показали, что им было приятно видеть положительный настрой и активное участие со стороны школьников. Участие в программе позволило студентам приобрести практический опыт передачи знаний, развить коммуникативные навыки и умение адаптировать материал под разный уровень аудитории, понять особенности работы с молодыми учениками. Также они смогли применить теоретические знания на практике и улучшить свои педагогические навыки. Такой опыт также способствовал развитию ответственности, терпения и умения находить индивидуальный подход к каждому школьнику, что является важным аспектом профессионального роста, а для некоторых студентов еще и подготовкой к будущей педагогической деятельности.

Профессионализм, подготовленность и ответственность студентов, участвующих в реализации программы «Радиофизический класс. Оптические технологии», заслужили высокую оценку как со стороны преподавателей ТГУ, так и со стороны школьных учителей, организаторов и партнеров всероссийской конференции СНИИ [5, 7].

Заключение

Итогом реализации программы «Радиофизический класс. Оптические технологии» на радиофизическом факультете ТГУ в 2024-2025 учебном году стало повышение эффективности учебного процесса для студентов и школьников, углубление понимания оптики, лазерной техники и смежных дисциплин, повышение мотивации и вовлеченности в учебный процесс. Все это способствует созданию динамичной и интерактивной образовательной среды. Представленные материалы демонстрируют перспективность использования Белл-Ланкастерской системы для повышения уровня знаний, овладения прикладными навыками, формирования у школьников устойчивого интереса к научно-техническому творчеству, развитию профессиональных и личностных качеств у студентов, а также повышению их конкурентоспособности на рынке труда. Особого внимания заслуживает тот факт, что в рамках этой программы школьники знакомятся с актуальнейшими на сегодняшний день темами, связанными с нейронными сетями и искусственным интеллектом, а также реализуют проекты в этих областях.

Список публикаций:

- [1] Бухарова Г. Д., Старикова Л. Д. Известия алтайского государственного университета. 2009. № 2. С. 7-11.
- [2] Телешоу С.В. // Педагогика. 2005. № 10. С. 73.
- [3] Астрономическая обсерватория Томского государственного университета // Электронный ресурс URL: https://t.me/tsu_obs.
- [4] Учебная лаборатория «Основы оптики, Физическая оптика» // Электронный ресурс URL: <https://rff.tsu.ru/?p=1149>.
- [5] XXII Всероссийская Конференция Студенческих Научных Исследований и Инноваций // Электронный ресурс URL: <https://srdi.tsu.ru/section4.php>.
- [6] Всероссийский конкурс студенческих и школьных проектов «Радиофизика, измерения, автоматизация» // Электронный ресурс URL: https://srdi.tsu.ru/competition_ria.php.
- [7] Шаг в радиофизику — шаг в твоё будущее // Электронный ресурс URL: <https://rff.tsu.ru/?news=shag>.
- [8] Итоги Всероссийского конкурса студенческих и школьных проектов РИА 2025 // Электронный ресурс URL: https://rff.tsu.ru/?news=20250526_УДК 658.5.012

Программируемые логические контроллеры АО «ЭЛЕСИ» в учебном процессе радиофизического факультета

Мещеряков Владимир Алексеевич
Коротаев Александр Григорьевич
Жигальцов Никита Максимович
Максунов Леонид Алексеевич
Томский государственный университет
mva@mail.tsu.ru

В 2023 году исполнилось 70 лет с момента образования радиофизического факультета в Национальном исследовательском Государственном университете. В Юбилейную дату этого события факультет получил в подарок от Томской компании ЭЛЕСИ, занимающейся разработкой и выпуском высокоинтеллектуального технологического оборудования для автоматизации технологических процессов – учебный класс, оснащенный лабораторными стендами с программируемыми логическими контроллерами (ПЛК). На рисунках 1 и 2 представлены: фрагмент лаборатории; рабочее место для разработки систем автоматизации на базе ПЛК.

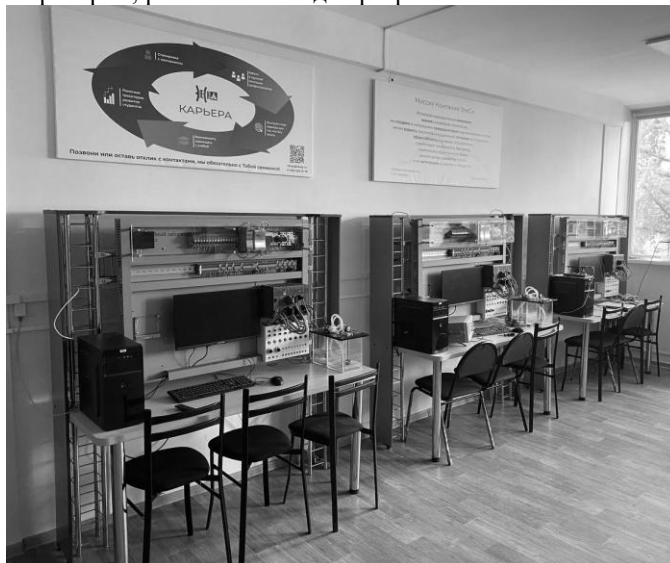


Рис. 1 – Расположение рабочих мест в лаборатории.



Рис. 2 – Одно из рабочих мест в лаборатории.

В учебной лаборатории находится шесть рабочих мест, каждое из которых содержит:

1. Персональный компьютер, на котором установлена среда разработки проектов автоматизации CODESYS с конфигурацией Elesy TMK. С её помощью осуществляется программирование ПЛК;
2. Монитор, клавиатуру, компьютерную мышь;
3. ПЛК ЭЛЕСИ-TMK;
4. Учебный макет с устройствами ввода/вывода;
5. Клеммный модуль;
6. Набора реле;
7. Источник питания на 12 В – EF 24DC/12DC-8 и 24 В – EF A 24DC/24DC-4;

8. Коммутатор Ethernet-линий;

9. Макет устройства насосной станции с резервуарами, датчиками и исполнительными механизмами.

Система управления, сбора и обработки информации приведенная на рисунке 3, включает в себя следующие модули:



Рис. 3 – Модули ПЛК ЭЛСИ-ТМК в выключенном состоянии.

1. модуль источника питания TP 711;
2. модуль центрального процессора ПЛК TC 711;
3. модуль дискретного вывода TD 712;
4. модуль дискретного ввода TD 711;
5. модуль измерения сигналов термодпар и термосопротивлений TA 712;
6. коммуникационные модули TN 712 и TN723;
7. модуль аналогового вывода TA 714.

Лабораторный стенд позволяет разрабатывать и отлаживать реальные системы автоматизации с использованием различного промышленного оборудования. Для проведения лабораторных работ был предложен макет инструментов, изображенный на рисунке 4, позволяющих получать сигналы ввода/вывода без использования дорогостоящего промышленного или экспериментального оборудования.

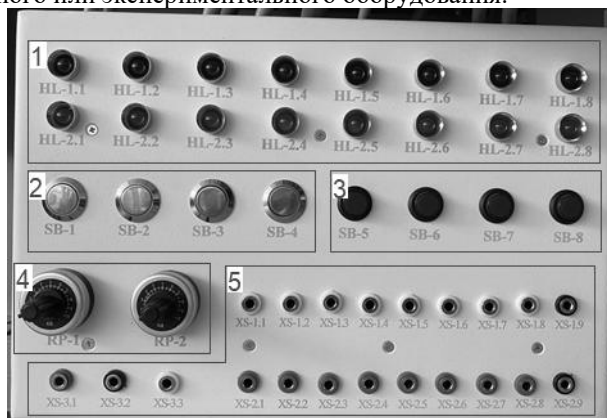


Рис. 4 – Инструменты реализующие сигналы с устройств ввода/вывода

Состав инструментов реализующие сигналы с устройств ввода/вывода:

1. группа светодиодов красного и зеленого цветов;
2. группа кнопок с фиксацией;
3. группа кнопок мгновенного действия;
4. два потенциометра;
5. три группы гнезд для подключения аналоговой и дискретной периферии.

Установленная на персональном компьютере среда программирования CODESYS [1] обладает удобным интерфейсом на русском языке, имеет возможность писать на шести языках программирования и производить эмуляцию проекта без ПЛК и устройств ввода/вывода, а также представлять органы управления и контроля графически – визуализировать их. В среде CODESYS [2] реализована серия языков программирования стандарта МЭК 61131-3, среди них похожий на широко используемый в вузовском образовании язык ПАСКАЛЬ.

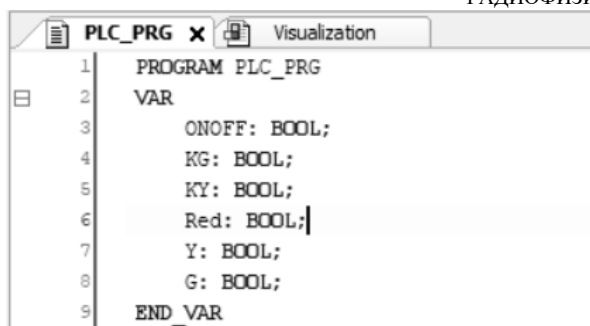


Рис. 5 – Фрагмент рабочей области программы

Процесс выполнения программ и работы оборудования можно представить визуально с помощью целого комплекса инструментов визуализации. На рисунке 5 представлены фрагменты области визуализации.

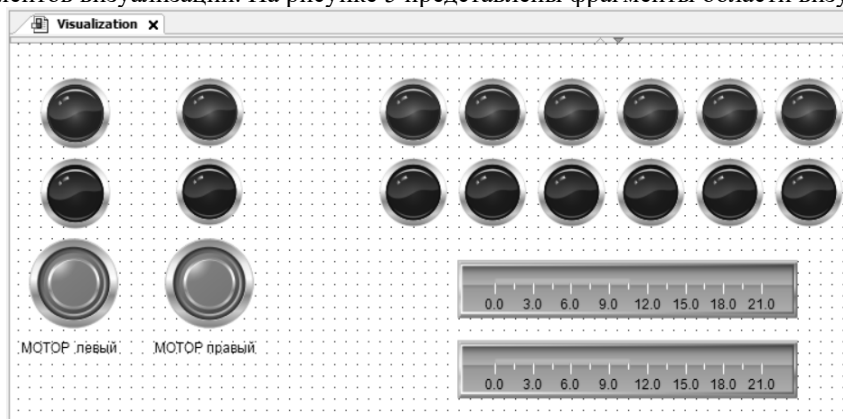


Рис. 6 – Фрагмент рабочей области визуализации

Потребовался год освоения оборудования и получения навыков использования компонентов учебного стенда. В настоящее время создана учебная образовательная программа «Программирование промышленных логических контроллеров». Ведется разработка серии методических пособий по различным элементам системы. Ряд студентов выполняют курсовые работы в направлении ПЛК. Планируется разработка образовательного курса «Программирование промышленных контроллеров для робототехнических комплексов» для подготовки инженеров по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Большую помощь в освоении полученного оборудования оказывают сотрудники компании ЭЛЕСИ. Наше сотрудничество началось с посещения предприятий компании, на котором разрабатывается и впускается оборудование и выполняются заказы Российских предприятий по автоматизации производственных процессов. Сотрудники предприятия проводят консультации студентов, занятия в специализированных учебных классах компании, адаптируют поставленное оборудование требованиям университетских регламентов.

Список публикаций:

- [1] Убайдуллаева Ш. Р. и др. Среда программирования CODESYS-универсальный инструмент программирования контроллеров и встраиваемых систем // Перспективное развитие науки, техники и технологий. – 2019. – С. 299-301.
- [2] CODESYS V3.5 Первый старт. Руководство пользователя версия 2.0 [Электронный ресурс] // OWEN: [сайт]. – URL: <https://owen.ru/manuals> (дата обращения: 12.02.2024)

РФФ кафе как формат профориентации школьников и студентов младших курсов

Павлова Александра Андреевна

Вячистая Юлия Валерьевна, Доценко Ольга Александровна, Кочеткова Татьяна Дмитриевна

Томский государственный университет

E-mail: Sandy.surname@gmail.com

Сегодня многие школьники сталкиваются с выбором будущей профессии, испытывая трудности в понимании, насколько увлекательной и перспективной может стать карьера учёного-физика. Проект «РФФ кафе» призван изменить такое восприятие науки, сделав её ближе и понятнее каждому старшекласснику.

Цель проекта «РФФ кафе» – популяризация научно-технического профиля образования среди школьников выпускных классов, привлечение в ТГУ на физическое направление активных абитуриентов, мотивация студентов к научно-исследовательской работе.

«РФФ-кафе» – это место, где наука объединяется с творчеством. На ежемесячных мероприятиях студенты, аспиранты и молодые преподаватели в популярной форме рассказывали о сути своих исследований в уютной атмосфере. Это не научная конференция и не доклад на защите ВКР – это клуб молодых и любопытных. На выступление выделялось 15 – 20 минут, в котором харизматичный спикер в научно-популярной форме рассказывал о проблеме, которую решают в одном из научных коллективов. Затем в неформальной обстановке, аудитория и спикер обсуждали тему доклада.

После проводился квиз среди участников по теме выступления или истории физики, о физике в кино и музыке, дебаты. А на десерт творческие коллективы РФФ и ближайших соседей делились музыкой и танцами с публикой.

Технология организации «РФФ-кафе» была следующей:

1. Поиск спикеров и подготовка серии мини-лекций в научно-популярном стиле по основным направлениям исследований на РФФ ТГУ;
2. Организация студенческой команды волонтеров для помощи в проведении серии мероприятий: силовая команда для расстановки столов, ведущий, фотограф, дежурные на входе, дежурные в буфете;
3. Разработка эмблемы, афиши и полиграфического мерча мероприятия; выпуск печатной продукции;
4. Организация студентов для подготовки и проведения квизов и других интеллектуальных состязаний;
5. Поиск студентов для музыкальных и танцевальных выступлений;
6. Проведение информационной компании и налаживание контактов с учителями физики томских школ.

Была проведена серия мероприятий со следующими тематиками:

- «Микроволны против обморожений!»;
- «Левитация против гравитации или акустический захват частиц»;
- «Радиовидение — шестое чувство»;
- «Лазерный луч изучает небо: поляризационный лидер НИ ТГУ»;
- «Космический камертон или возможные часы из космоса»;
- «Полупроводники. Детекторы. Мегасайнс-проекты»;
- «Наноструктуры среди нас»;
- «Микроволновка — это не только разогреть курицу»;
- «Песнь про Кота Шрёдингера, квантовый компьютер и удалого математика Дойча»;
- «Зачем козе баян или сказ о том, как радиофизики помогали филологам»;
- «Радиоволны как инструмент для поиска скрытого».

После окончания второго сезона «РФФ кафе» был проведён анонимный опрос среди студентов радиофизического факультета в среде электронного обучения iDO, в котором приняло участие 47 человек. Треть респондентов посетило в общей сложности по три заседания «РФФ кафе». Все заседания посетили только 8 % студентов. Самой популярной лекцией стала «Микроволны против обморожений!». Наименьшее число слушателей заинтересовало тема «Лазерный луч изучает небо: поляризационный лидер НИ ТГУ».

Самой интересной частью «РФФ кафе» студенты посчитали непосредственно лекцию и поставили среднюю оценку 4,47. Остальные «блюда», предложенные в «кафе», выступления художественной самодеятельности понравились и квизы/караоке-баттлы набрали 4,11 и 4,09, соответственно.

Общий крайне положительный настрой аудитории (только 2 % опрошенных признали мероприятие бесполезным для них) доказывает необходимость проведения ещё одного сезона «РФФ кафе» и пользу для привлечения студентов 1-2 курса в научную работу.

По итогам работы получены следующие результаты:

1. Больше школьников узнало о физических и технических специальностях в ТГУ.
2. Был расширен научный кругозор студентов младших курсов,
3. Появилась возможность более осознанно выбрать темы своей будущих научных работ.