



Российская Академия Наук



Международная
научно-техническая конференция
«Современные технологии научного
приборостроения и информационно-
измерительных систем»

Труды

23 июня 2023

УДК 531, 534, 535, 537

ББК 22.3



Современные технологии научного приборостроения
и информационно-измерительных систем: Труды Международной
научно-технической конференции, Москва, 23.06.2023. М.: НТЦ УП РАН, 2023.
ISBN: 978-5-6051133-1-7

ОРГАНИЗАТОР

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Научно-технологический центр уникального приборостроения
Российской академии наук

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Булатов М.Ф. – д.ф.-м.н, проф., директор НТЦ УП РАН, председатель
Шахнов В.А. – чл. корр. РАН, зав. каф. МГТУ им. Н.Э. Баумана, сопредседатель
Чуриков Д.В. – к.ф.-м.н., зам. дир. по НР НТЦ УП РАН, зам. председателя
Рахими Ф.К. – д.ф.-м.н., проф., действительный член Национальной академии наук
Таджикистана, Президент Национальной академии наук Таджикистана
Салихов К.М. – академик РАН, науч.рук. ФИЦ КазНЦ РАН
Барях А.А. – академик РАН, директор ПФИЦ УрО РАН
Белый В.Н. – академик НАН Беларуси, ИФ НАНБ
Левченко А.А. – чл. корр. РАН, директор ИФТТ РАН
Калачёв А.А. – чл. корр. РАН, директор ФИЦ КазНЦ РАН
Лебедев М.П. – чл. корр. РАН, генеральный директор ФИЦ ЯНЦ СО РАН
Муртазаев А.К. – чл. корр. РАН, директор ДФИЦ РАН
Бердников С.В. – д.г.н., директор ЮНЦ РАН
Писаревский Ю.В. – д.ф.-м.н., г.н.с. ФНИЦ Кристаллография и фотоника РАН
Пашин Д.М. – д.т.н., проф., проректор КФУ
Чернышев С.Л. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кушнер А.Г. – д.ф.-м.н., профессор МГУ
Коваленко И.Б. – д.ф.-м.н., проф., в.н.с. МГУ
Шкатов П.Н. – д.т.н., проф. РТУ МИРЭА
Назаров А.В. – д.т.н., проф., МАИ
Кравченко В.Ф. – д.ф.-м.н., проф., г.н.с., ИРЭ РАН
Чибиров А.Л. – директор ВНЦ РАН
Кусраев А.Г. – д.ф.-м.н., проф., науч.рук. ВНЦ РАН
Абдурасулов А.А. – к.ф.-м.н., сов. ректора ТТУ им. акад. М.С. Осими (Таджикистан)
Садуллаева Ш.А. – д.ф.-м.н., проф., зам. дир. по науке и инновациям БУМИПТК (Узбекистан)
Анарова Ш.А. – д.т.н., ТУИТ им. Мухаммада ал-Хоразмий (Узбекистан)
Нуралиев Ф.М. – д.т.н., профессор, ТУИТ им. Мухаммада ал-Хоразмий (Узбекистан)
Пожар В.Э. – д.ф.-м.н., зав. отд. НТЦ УП РАН
Зинин П.В. – к.ф.-м.н., в.н.с. НТЦ УП РАН
Мачихин А.С. – д.т.н., в.н.с. НТЦ УП РАН
Никитин А.К. – д.ф.-м.н., в.н.с. НТЦ УП РАН





Российская Академия Наук



Международная
научно-техническая конференция
«Современные технологии научного
приборостроения и информационно-
измерительных систем»

Труды

23 июня 2023

Содержание

Жалнин В.П., Шахнов В.А. Оптодатчики на базе перовскитов для интраоперационной in-situ диагностики	4
Власов А.И., Шахнов В.А. Визуальные инструменты системного проектирования в приборостроении	6
Евстрапов А.А., Буляница А.Л. Определения порогового цикла ПЦР-РВ на основе аппроксимации информативного сигнала сигмоидными функциями	9
Орлова Е.В., Габриелян Г.А., Гурьева А.В., Куликова Е.Д., Волков М.В., Смирнова Л.М. Высококонтрастная визуализация капиллярной сети методом капилляроскопии в неинвазивной диагностике опухолей.....	12
Ропот П.И., Макаревич А.П., Варанецкий А.М. Оптические профилометры для контроля поверхности цилиндрических изделий.....	16
Давронбеков Д.А., Жураева Н.И. Волоконно-оптические устройства передачи информации, легированные редкоземельными ионами	17
Ершов Е.И., Мачихин А.С., Беляева А.С., Романова Г.Э. Создание колориметрической установки на основе акустооптики и исследование восприятия цвета для случая полного цветового охвата	21
Трунов Д.Н., Марин В.Н., Алтынбаев Е.В., Садыков Р.А. Позиционно-чувствительный детектор ионизирующих излучений на основе прозрачного световода и кремниевых фотоумножителей.....	23
Саламатин Д.А., Михин М.В., Саламатин А.В., Цвященко А.В. Компактный спектрометр возмущенных угловых гамма-гамма корреляций	28
Шкатов П.Н. Обобщение зависимостей сигналов трансформаторных дифференциальных вихревых преобразователей	29
Мороков Е.С. Разработка специализированной приставки для in vivo ультразвуковых исследований высокого разрешения мелких лабораторных животных	30
Деспотули А.Л., Казьмирук В.В., Деспотули А.А., Андреева А.В. Новая конструкция генератора высоковольтных прямоугольных импульсов	30
Петров Н.И., Соколов Ю.М., Стоякин В.В., Данилов В.А., Попов В.В., Усиевич Б.А. Наблюдение углового сдвига Гуса-Хенкен в субволновых дифракционных решетках ...	32
Ведяшкина А.В., Павлов И.Н., Расковская И.Л. Лазерные рефрактографические измерительные системы для диагностики оптически неоднородных жидких сред	35
Коваленко И.Б. Вычислительная микроскопия в биологии и медицине.....	39
Никитин П.А. Углочастотная характеристика акустооптического дефлектора, использующего секционированный излучатель ультразвука	40
Анисимов А.В., Хасанов И.Ш. Контроль напыления ультратонких диэлектрических пленок с помощью трехволновой микроскопии поверхностного плазмонного резонанса.....	43
Утебаева З.Р. Разработка акустооптического модулятора для инфракрасного диапазона с использованием жидкостей	47
Вагин В.А., Кузнецова Д.Ю., Муратов А.В. Применение зондовой НПВО-спектроскопии в среднем ИК-диапазоне.....	49
Лобастов С.А., Хасанов И.Ш. Разработка блока контроля толщины ультратонких диэлектрических покрытий методом поверхностного плазмонного резонанса для установки вакуумного напыления.....	50
Хасанов И.Ш., Никитин А.К., Герасимов В.В. Широкопольная амплитудная микроскопия поверхностного плазмонного резонанса в терагерцовом диапазоне	55
Кудрявцев С.А. Обзор методов дистанционного обнаружения метана с пространственным разрешением на местности.....	59
Кананыхин О.А., Пожар В.Э. Исследование угловых характеристик акустооптического фильтра в азимутальной плоскости	68

Иванов С.И., Боритко С.В. Применение модуляционной методики для повышения разрешения по спектру акустооптических спектрометров	70
Гречухин А.Н. Разработка спектрометрического метода исследования поверхностного загрязнения в районах расположения нефтедобывающих платформ (мотивация тематики).....	73
Веселов А.С., Гавлина А.Е., Батшев В.И. Разработка эндоскопической камеры для медицинского применения	74
Шарикова М.О. Влияние взаимного расположения пьезопреобразователей в широкодиапазонном акустооптическом фильтре на качество изображения.....	77
Булатов К.М., Зинин П.В., Малыхина И.В. Калибровка мультиспектральных оптических систем с использованием акустооптического фильтра	79
Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш., Сафаров Ш.Ш., Артикбаев М.А. Применение метода R-функции в численном моделировании процессов электро-магнито-упругости тонких пластин со сложной конфигурацией в плане	84
Фатхутдинов Т.М. Метрики для оценки качества распознавания эмоционального состояния человека –оператора	89
Бучный Д.А., Литвин В.С., Трунов Д.Н., Марин В.Н., Аксенов С.Н., Садыков Р.А. Монте-Карло моделирование регистрации тепловых нейтронов сцинтилляционными счетчиками на базе ZnS(Ag):6LiF	91
Бородинов А.Г., Манойлов В.В., Заруцкий И.В., Петров А.И., Курочкин В.Е., Сараев А.С. Машинное обучение в первичной обработке данных отечественного секвенатора. 94	
Грачев М.В., Чуриков Д.В. Обработка многомерных данных и их оптимизации для задач оптической визуализации	98
Нестеров Г.В., Золотухина А.А., Гурылева А.В., Фомин Д.С. Методика оценки засоренности семенного материала с помощью нейросетевой обработки гиперспектральных данных.....	99
Боймуродов Ф.Ф. Разработка морфологического анализатора узбекского языка	102
Орлов С.А. Разработка метода изучения вязкоупругих свойств биологических объектов в акустических и электромагнитных полях в рамках оболочечной модели	104
Титов А.С., Петронюк Ю.С. Исследование возможностей ультразвуковых методов высокого разрешения для визуализации и оценки атеросклеротического субстрата.....	105
Зыкова Л.А., Титов С.А. Алгоритм обработки пространственно-временных сигналов в сонографических исследованиях низших позвоночных на ранних стадиях развития. 108	
Давыдова Е.А., Титов С.А. Регистрация ультразвуковых поперечных горизонтально поляризованных волн в иммерсионной схеме измерений	110
Андреев А.В., Краснобородько С.Ю., Высоких Ю.Е., Парамонов В.В., Медведев Б.К., Филиппов Н.А. Исследование возможностей атомно-слоевого осаждения при формировании проводящих покрытий для кантилеверов атомно-силовой микроскопии.....	112
Шкатов П.Н., Пичугин С.С. Повышение чувствительности накладных вихретоковых преобразователей	116
Зинин П.В., Кутуза И.Б., Пращук А.Ю. Исследование возможности создания органических светодиодов на базе графитоподобных нитридов углерода.....	117
Жалнин В.П., Радчук А.П. Методы и средства защиты прецизионных систем от вибрационных воздействий	118
Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А. Измеритель порогового тока светодиодов.....	120
Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А., Казанков А.А. Установка фотоэлектрической диагностики биполярных транзисторных структур	124
Быков А.А., Корнеева А.А., Андреев А.В., Белых А.Ю., Ляшенко А.И., Кукушкин В.А., Кутуза И.Б., Зинин П.В. Исследование тонких пленок ВСх, полученных методом лазерного напыления	128

Куковякин А.И., Мартьянов П.С., Николаев Ю.Л., Борисенко А.А. Применение магнитной дефектоскопии для оценки качества металлических изделий	129
Ступин И.А., Вагин В.А., Костюковский С.Р., Хорохорин А.И. Временные задержки в приёмном блоке системы регистрации быстропротекающих процессов.	131
Храмов Н.А., Булатов К.М. Быстрое измерение распределения температуры металлов, нагретых с помощью лазерного излучения, с использованием мультиспектральной видеокамеры.....	133
Гришаев П.А., Зинин П.В., Булатов М.Ф., Андреев М.И. Определение оптимального диапазона длин волн для дистанционного измерения температуры и излучательной способности	135
Захарова В.О., Селиванов К.В. Перспективы аддитивной профилизации беспилотных летательных аппаратов	139
Забродин Е.В. Оптимизация конструкции высокотемпературных датчиков давления ..	140
Булатов К.М., Зинин П.В., Кутуза И.Б., Титов С.А., Быков А.А. Лазерный нагрев в алмазной наковальне для изучения фазовых переходов при высоких давлениях	143
Зинин П.В., Малыхина И.В. Мультиспектральные изображения при измерении распределения температуры	144
Vokov A.V., Salamatin D.A., Novikov A.P., Lyapin S.G., Tsvyashchenko A.V. High-pressure diamond anvil cell with heating device for X-ray diffraction and Raman spectroscopy in situ investigations of phase transitions	146
Гаранин Д.А., Вагин В.А., Костюковский С.Р. Разработка методики измерения температуры стационарных и быстропротекающих процессов в задачах спектральной пирометрии.....	147
Крюков А.В., Марченко М.О. Перспективы создания отечественного компактного устройства для видеокапилляроскопии	148
Зайцева А.Ю., Авдюшенко С.А., Мазинг М.С. Информационно-измерительные системы неинвазивного биомониторинга.....	151
Петров Д.Г., Дженлода Р.Х., Антифеев И.Е., Макарова Е.Д., Курочкин В.Е. Высокоэффективное проточное концентрирование нуклеиновых кислот.....	160
Ванройе Н.К., Власов А.И. Концепция реализации цифровой производственной среды на основе модели контекстной осведомленности	163
Труфанов Н.Н., Чуриков Д.В., Кравченко О.В. Классификация гиперспектральных данных методами машинного обучения	165
Абдурасулов А.А., Абдурасулов Д.А. О температурной зависимости теплоёмкости нематических жидких кристаллов в изотропной окрестности точки фазового перехода НЖК – ИЖ	170
Абдурасулов А.А., Абдурасулов Д.А., Шоайдаров Н.Б. Частотная дисперсия динамических вязкоупругих коэффициентов многоатомных жидкостей	171
Умаев С.М. Влияние адсорбированных молекул азота на эмиссионные свойства одно стенных углеродных нано трубок, синтезированных разрядно-дуговым способом	172
Рожнов А.В., Рохини С. Халликар. Особенности многоаспектного исследования недоусложнённых моделей биоинспирированных нейросетей в развитии идей А.Н. Радченко	178
Нуралиев Ф.М., Тастанова С.А. Генетический алгоритм и метод оптимизации симплекс для оптимизации цветовых параметров в фрактальных изображениях, совместно с классификацией цветовых схем с использованием нейронной сети	180
Нуралиев Ф.М. Эшкараева Н.Г. Сафаров Ш.Ш. Расчет статики и динамики геометрически нелинейных гибких анизотропных пластин со сложной формой	182

Оптодатчики на базе перовскитов для интраоперационной in-situ диагностики

доцент, канд. техн. наук, Жалнин В.П.¹ (SPIN: 7447-6923)
член-корр. РАН, проф., д-р техн. наук, Шахнов В.А.² (SPIN: 1674-4897)

^{1,2}МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия

¹zhalnin@mail.ru, ²shakhnov@iu4.bmstu.ru

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы разработки оптических датчиков для интраоперационной in-situ диагностики в концепции «датчик-на-чипе». Предложена оригинальная архитектура нанокompозитного оптодатчика на базе ячеек перовскитов и технология его получения. Предлагаемое решение позволяет реализовать перспективную нанокompозитную мемристорную архитектуру с агломератами наночастиц в виде тонких нанометровых пленок, свойства которых могут меняться контролируемым образом в зависимости от прилагаемого лазерного или электрофизического воздействия. Предложенное решение «умного материала» позволят создать принципиально новую элементную базу для датчиков, применяемых технологии «датчик-на-чипе», которые могут использоваться в новых системах интраоперационной in-situ диагностики.

Ключевые слова: интраоперационная диагностики, in-situ, перовскит, оптические датчики.

Введение

Создание систем интраоперационной in-situ диагностики при помощи новой элементной базы типа «датчик-на-чипе» приобретает в последнее время все большую актуальность [1, 2]. Одним из перспективных направлений является создание наноструктур на базе перовскитов и разработка технологии получения новых композитных наноматериалов с уникальными свойствами для компонентов in-situ диагностики. Актуальность данной проблемы обусловлена отсутствием на сегодняшний день на рынке оптоэлектроники и биомедицинской техники готовых решений для прецизионной хирургии, совмещенной с интраоперационной in-situ диагностикой. Существующий уровень техники базируется на сочетании хирургических лазерных комплексов с эндоскопическими системами, что приводит к увеличению длительности операций, неточной дифференциации здоровых и поврежденных тканей, что является серьезным препятствием на пути перехода к высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения.

Концепция создания оптодатчиков на базе перовскитов для интраоперационной in-situ диагностики

На основе нанокompозитных материалов возможно создание структур с уникальными характеристиками, которые могут быть применены в оптоэлектронике, при создании сверхчувствительных детекторов для биомедицины [2]. С учетом трендов интеграции, модульности и платформизации, необходимо сформировать базовые теоретические положения и создать модельный ряд для перехода на интегрально-оптическое исполнение детекторов, что откроет принципиально новую нишу в сегменте компактных и надежных оптоэлектронных устройств. Можно утверждать, что создание новых типов датчиков для интраоперационной in-situ диагностики является востребованным.

Предлагается оригинальная архитектура нанокompозитного оптодатчика на базе ячеек перовскитов [3]. Предложена технология его получения, что позволяет реализовать перспективную нанокompозитную мемристорную архитектуру. Специфическая

пространственная структура кристаллов перовскита формирует ряд необычных свойств. В результате получаем перспективный композитный материал с агломератами наночастиц в виде тонких нанометровых пленок, свойства которых могут меняться контролируемым образом в зависимости от прилагаемого лазерного или электрофизического воздействия, то есть разрабатываемая структура будет являться «умным материалом».

Выводы

Предложенная архитектура нанокompозитных наноструктур, а также методики и технологии их создания позволят создать принципиально новую элементную базу для датчиков, применяемых технологии «датчик-на-чипе». Данные решения могут найти применение в новых системах интраоперационной in-situ диагностики.

Список литературы

1. Ахметов Н.Р., Власов А.И., Димитров Д.А., Ду Хаолун, Жалнин В.П., Шахнов В.А., Шанин А.В., Шерстюк А.Е. Перспективная элементная база для смарт-систем в условиях цифровой трансформации промышленности // Датчики и Системы. № 1, 2021 С.9-17.
2. Ечеистов В.В., Зверев А.В., Рыжков В.В., Рыжиков И.А., Макаруч В.В., Шахнов В.А., Родионов И.А. Прецизионная автоматизированная система поддержания давления для микрофлюидной лаборатории на чипе // Датчики и системы. 2021. № 1 (254). С. 34-41.
3. Филин И.А., Жалнин В.П. Разработка мемристорных оптодатчиков // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития. сборник трудов Седьмой всероссийской молодежной научной конференции. 2022. С. 82-84.

Perovskite-based optical sensors for intraoperative in-situ diagnostics

Associate Professor, Ph.D., Zhalnin V.P.¹ (SPIN: 7447-6923)
cor. member. RAS, Prof., Dr., Shakhnov V.A.² (SPIN: 1674-4897)

^{1,2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
¹zhalnin@mail.ru, ²shakhnov@iu4.bmstu.ru

Abstract: The paper discusses the development of optical sensors for intraoperative in-situ diagnostics in the sensor-on-chip concept. An original architecture of a nanocomposite optical sensor based on perovskite cells and a technology for producing it is proposed. Proposed solution makes it possible to realize perspective nanocomposite memristor architecture with agglomerates of nanoparticles in form of thin nanometer films, properties of which can be changed in controlled manner depending on applied laser or electrophysical action. The proposed solution of "smart material" will create a fundamentally new element base for sensors used by sensor-on-chip technology, which can be used in new intraoperative in-situ diagnostics systems.

Keywords: intraoperative diagnostics, in-situ, perovskitis, optical sensors.

Визуальные инструменты системного проектирования в приборостроении

доцент, канд. техн. наук, Власов А.И.¹ (SPIN: 4901-3509)
член-корр. РАН, проф., д-р техн. наук, Шахнов В.А.² (SPIN: 1674-4897)

^{1,2}МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия

¹vlasovai@bmstu.ru, ²shakhnov@iu4.bmstu.ru

Аннотация: В работе анализируются проблемы фрагментарности, изолированности и инкапсуляции визуальных моделей системного проекта. Предложен подход к единому, синхронному представлению системного проекта на всех уровнях проектирования посредством знаниевой парадигмы и языка описания визуальных моделей VI-XML. Предлагаемое решение позволяет создать единую комплексную среду системного моделирования сложных систем, синхронизированную по всем стадиям и моделям комплексного системного проекта.

Ключевые слова: визуальное моделирование, визуальные модели, концептуально-абстрактные модели, структурно-функциональные модели, объектно-ориентированные модели, системный проект.

Введение

В условиях цифровой трансформации промышленности на первое место выходят проблемы сокращения сроков проектирования высокоточных приборных систем и процессов их производства. Гибкость применяемых проектных методик и инструментов должна обеспечивать совершенно новое качество реализации комплексного системного проекта. Эффективное системное проектирование предусматривает применение синхронных технологий и цифровую формализацию объектов с самых ранних стадий проектирования [1]. При этом возникают проблемы "когнитивности", "конвергенции" и "инкапсуляции" моделей сложных приборов и систем [2].

Проблема когнитивности обусловлена разнородностью используемых методов в современных визуальных моделях для получения и хранения знаний о предметной области. Проблема конвергенции (от английского convergence — схождение в одной точке) обусловлена сложностью взаимопроникновения технологий (концептуальный, структурно-функциональный, логический и физический и др. уровни модели), когда границы между отдельными уровнями стираются. При этом многие важные решения находятся именно на стыке уровней разных моделей. Проблема инкапсуляции обусловлена фрагментарностью визуального анализа и изолированностью его от применения на разных этапах жизненного цикла.

Основная цель данной работы – анализ подходов применения визуальных методов и инструментов для детального и синхронного представления системного проекта сложных приборов и систем на разных уровнях системного проекта.

Концепция визуального системного моделирования сложных систем

Основная задача визуального моделирования в приборостроении – реализация иерархической декомпозиции исследуемого объекта или процесса до атомарного уровня с обеспечением допустимой степени интерпретируемости и полноты описания на каждом из уровней декомпозиции. На разных этапах декомпозиции модели применяются разные по полноте и детализации визуальные инструменты. На начальном этапе (рис. 1) проектирования сложных приборов и систем разрабатывается модель системы "в общем" [3]. Это позволяет отобразить взаимодействие логики системы с ее окружением. Такие модели получили название концептуально-абстрактные. Из анализа маршрута проектирования сложных систем видно, что по мере того, как разработчик спускается по уровням иерархической декомпозиции в процессе проектирования, с каждым новым

этапом ему приходится оперировать менее абстрактными и более конкретными, элементами и структурами [4]. Однако при дальнейшем переходе от верхнего уровня к уровню, лежащему в основе более глубокой иерархической декомпозиции, возникает проблема в сложности автоматизированной интерпретации и формализации условных графических элементов модели. Реализация системного проекта не возможна без интеграции визуальных моделей различного уровня детализации в единый системный проект: абстрактно-концептуальных, структурно-функциональных, объектных и т.п. визуальных моделей [2-8]. Для решения этой проблемы предлагается использовать язык VI-XML (Visual Intelligence XML) для комплексного описания элементов визуальных моделей разного уровня детализации [5].

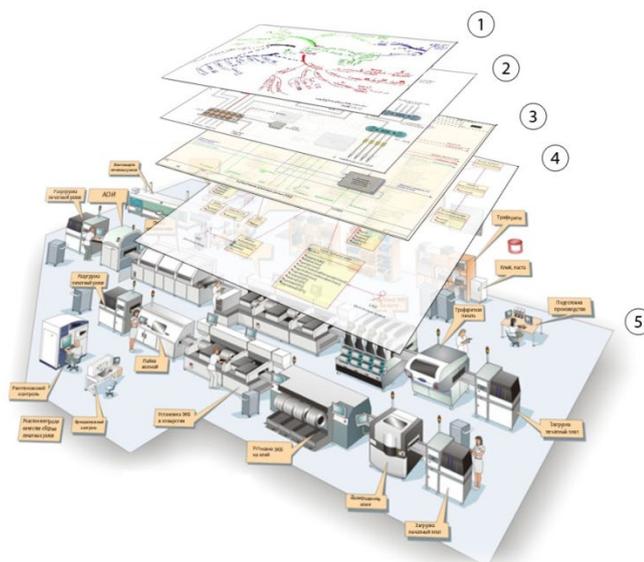


Рис. 1. Пирамида инкапсуляции уровней визуального моделирования (1 – концептуальный уровень, 2 – логический уровень, 3 – структурно-функциональный уровень, 4 – объектный уровень, 5 – физический уровень).

Создание общих правил описания понятий и суждений позволяет создать язык для описания знаний о процессах и системах. Современные средства визуального моделирования сочетают графическую нотацию (библиотекой элементов визуального языка, графический редактор с репозиторием, навигатором модели и т.п.) и текстовую нотацию, связанную с компонентами визуального языка, в которой представлено описание атрибутов компонентов. Сочетание графической и текстовой нотации должно обеспечивать синтез полнотекстовых документов по разработанным моделям.

Универсальная среда моделирования должна обеспечивать в общем случае инструменты по инкапсуляции понятий предметной области в моделях различного уровня экспертизы, реализацию общих сервисных функций по динамическому формированию функциональных инструментов, а также набора сервисных функций (печать диаграмм, спецификаций, различных форм отчетов, настройки цветов, шрифтов, толщины линий, геометрии и т.п.). Среда визуального моделирования обычно включает в себя несколько рабочих областей – «рабочее поле диаграммы», навигатор модели, сервисные окна, библиотеку и панель инструментов с элементами графической нотации. Среды могут существенно различаться по предоставляемому набору функциональности: от поддержки минимального набора простейших функций до сложных сред с реализацией многопользовательской работы с моделями, интеграцией со средствами контроля версий и т. д., но все они должны обеспечивать синхронизацию моделей на всех уровнях.

Выводы

Современные системы визуального моделирования должны отвечать высоким требованиям к качеству и эффективности. Они должны обеспечивать возможность формально представлять исследуемый объект или процесс на всех уровнях экспертизы: концептуально-абстрактном, структурно-функциональном, объектно-ориентированном и т.п. Должны иметь единый формат описания модели. Реализуемые визуальные модели и программные инструменты на их основе должны обеспечивать повторяемость, предсказуемость, мульти-функциональность и завершенность моделей системного проекта. Таким образом, создание новых и отладка текущих решений в приборостроении на системном уровне ускоряются.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проекта «ПРИОР/СН/НУ/22/СП2/5» в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список литературы

1. Demin A.A., Vlasov A.I. Visual methods of formalization of knowledge in the conditions of the synchronous technologies of system engineering // ACM International Conference Proceeding Series. CEE-SECR '17. 2017. N.4. pp.1-7.
2. Shakhnov V.A., Vlasov A.I. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components // Lecture Notes in Inf. Sys. and Org. 2021. V.44. pp. 57-65.
3. Shakhnov V.A., Khalzev S.E., Vlasov A.I. Visual methods of high-level system design for digital hardware components // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V.1515. N. 042024.
4. Naumenko A., Vlasov A. Analysis of visual modeling tools development for complex production systems // Lecture Notes in Inf. Sys. and Org. 2022. V.54. pp.335-346.
5. Shakhnov V.A., Vlasov A.I., Juravleva L.V. Knowledge-based model for formal representation of complex system visual models // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. V.1251. C. 618-632.
6. Gonoshilov D.S., Vlasov A.I. Simulation of manufacturing systems using BPMN visual tools// Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1353. N. 012043.
7. Кознов Д.В. Разработка и сопровождение DSM-решений на основе MSF* // Системное программирование. 2008. Т. 3. № 1. С. 80-96.
8. Кознов Д.В. Основы визуального моделирования - Москва, Издательство: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2008. 246 с.

Visual System Design Tools in Instrumentation

Associate Professor, Ph.D., Vlasov A.I.¹ (SPIN: 4901-3509)
cor. member. RAS, Prof., Dr., Shakhnov V.A.² (SPIN: 1674-4897),

^{1,2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
¹vlasovai@bmstu.ru, ²shakhnov@iu4.bmstu.ru

Abstract: The work analyzes the problems of fragmentation, isolation and encapsulation of visual models of the system project. An approach to a unified, synchronous representation of a system project at all levels of design is proposed through a knowledge paradigm and a language for describing VI-XML visual models. Proposed solution makes it possible to create a single complex environment of system modeling of complex systems, synchronized in all stages and models of complex system project.

Keywords: visual modeling, visual models, conceptual-abstract models, structural-functional models, object-oriented models, system project.

Определения порогового цикла ПЦР-РВ на основе аппроксимации информативного сигнала сигмоидными функциями

директор, д.т.н., Евстапов А.А. (SPIN: 2053-5020)
ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., Буляница А.Л. (SPIN: 1120-7582)

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург
an_evs@mail.ru

Аннотация: Проведен анализ алгоритмов определения порогового цикла, как точки перегиба кинетической кривой полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ) при ее аппроксимации сигмоидными функциями. Используются три аппроксимирующие зависимости (Slogistic1, Hill1 и Srichards), содержащие не более четырех параметров, оценены их параметры и пересчитаны в координаты порогового цикла. Исследование динамики оценки положения порогового цикла показало, что выборка экспериментальных данных должна включать в себя как саму точку перегиба, так и последующие несколько отсчетов, соответствующих началу перехода к стадии насыщения. Первая зависимость более простая и позволяет вычислить положение порогового цикла непосредственно. Тем не менее, использование двух других функций, дающих опосредованную оценку положения точки перегиба, имеет свои преимущества: возможность использования более короткой выборки и большую устойчивость к вариации параметров.

Ключевые слова: полимеразная цепная реакция, сигмоидная функция, точка перегиба, пороговый цикл, аппроксимирующая функция, оценка параметров.

Введение

В работе проанализированы алгоритмы поиска точки перегиба кинетической кривой – информативного сигнала при количественном анализе пробы методом полимеразной цепной реакции в реальном времени. Для определения количества целевых нуклеиновых кислот в пробе ищется характерная точка кинетической кривой, называемая пороговым циклом. Методы определения порогового цикла различны. В рассматриваемом нами случае пороговый цикл совпадает с точкой перегиба (x^*). При этом, предложено работать не с экспериментальными данными непосредственно, а строить аппроксимирующую зависимость и для нее искать точку перегиба. Кинетическая кривая адекватно аппроксимируется сигмоидной функцией. Из этого семейства функций выбраны три наиболее простые, имеющие наименьшее число оптимизируемых параметров, которые также должны иметь понятную интерпретацию. Кроме того, учитывается сложность алгоритма вычисления порогового цикла, а также необходимый объем выборки, в том числе и число экспериментальных точек, расположенных после точки перегиба. Для наглядности проводится нормализация информативного сигнала.

1. Информативный сигнал и его особенности

Примерный вид нормализованной кинетической кривой представлен далее на рис. 1. Нетрудно заметить, что в целом зависимость относится к сигмоидным функциям. На начальном участке отсутствует монотонное возрастание сигнала. Как правило, высокочастотная случайная погрешность мала, но она может повлиять на оценку положения точки перегиба, построенную непосредственно по экспериментальным данным.

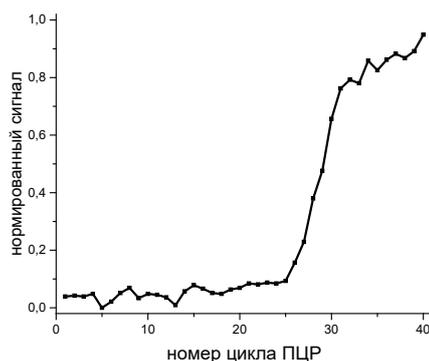


Рис. 1. Вид нормализованной кинетической кривой

2. Аппроксимирующие сигмоидные функции

Первая аппроксимирующая функция, названная Slogistic1, описана выражением (1):

$$y = \frac{a}{1 + e^{-k(x-x_c)}} \quad (1)$$

Здесь y – величина нормированного сигнала, a – величина сигнала насыщения (примерно 1 для нормированного сигнала), k – параметр, связанный с эффективностью ПЦР, x_c – характерный момент времени. Для этой модели логистического роста первого порядка (Slogistic1) точка перегиба x^* совпадает с x_c , а соответствующее значение сигнала y^* равно $a/2$. Эта модель описана в [1, 2]. Вторая аппроксимирующая зависимость, представленная в [3], также относится к сигмоидным функциям и связана с уравнением Хилла-Ленгмюра.

$$y = s + (f - s) \frac{x^n}{k^n + x^n} \quad (2)$$

Здесь s – начальный (стартовый) уровень сигнала, f – финишный сигнал (примерно 1), n имеет смысл подгоночного параметра, k позволяет найти x^* по формуле (3):

$$x^* = k \sqrt[n]{\frac{n-1}{n+1}} \quad (3)$$

Для больших значений n параметр k зависимости (2) практически совпадает с x^* , а соответствующая величина сигнала в этой точке близка к полусумме s и f . Третья зависимость (Srichards1), представленная в пакете программ Origin, приведена в [4]:

$$y = \left(a^{1-d} + e^{-k(x-x_c)} \right)^{\frac{1}{1-d}} \quad (4)$$

Здесь x_c связано с точкой перегиба x^* зависимостью (5):

$$x^* = x_c + \frac{(d-1) \ln(a) - \ln(d-1)}{k} \quad (5)$$

Как также отмечено в [4], формула (4) верна в случае $d > 1$.

3. Оценки точки перегиба кинетической кривой и их динамика

Значение сигнала в точке перегиба для зависимости (2) определяется по формуле (6) и примерно соответствует середине диапазона $[s; f]$.

$$y^* = s + (f - s) \frac{n-1}{2n} \quad (6)$$

При этом, для зависимости (4) y^* несколько больше 0.5, согласно (7):

$$y^* = d^{\frac{1}{1-d}} \cdot a \quad (7)$$

На рис. 2 приведены зависимости оценок параметров моделей (1), (2) и (4), а также связанных с ними оценок (3) и (5) от числа циклов ПЦР-РВ (N).

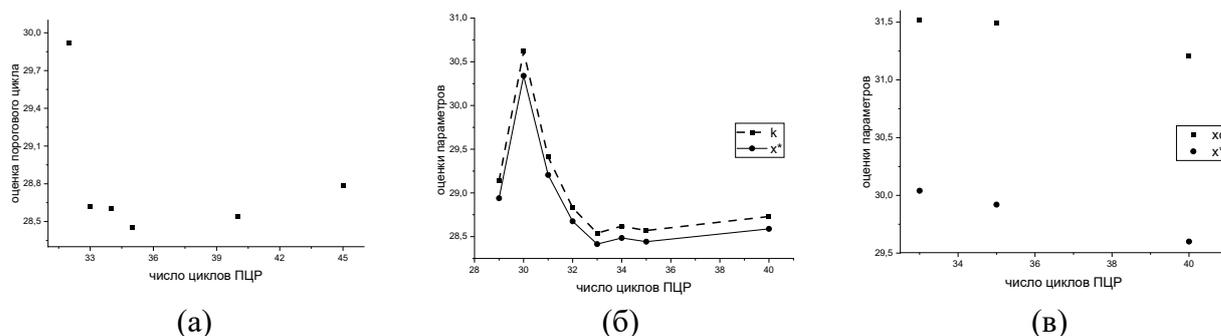


Рис. 2. Динамика оценок параметров функций и величины x^* для функции Slogistic1 (а), Hill1 (б) и Srichards1 (в).

Отметим, что кривые (б) и (в) связаны с параметрами аппроксимирующих функций k и x_c , а также с искомой координатой точки перегиба x^* . В табл. 1 указаны оценки параметров функции (4), обладающие большой неопределенностью. Оценки параметров a и x_c достаточно устойчивы.

Таблица 1. Оценка параметров d и k аппроксимирующей функции (4) и положения порогового цикла x^* в зависимости от числа отсчетов N

N	d	k	x^*
33	14.61 ± 23.09	4.01 ± 6.67	30.04
35	8.86 ± 6.91	2.32 ± 1.91	29.92

Выводы

Сопоставление результатов оценки точки перегиба сигмоидной функции путем аппроксимации экспериментальных данных с помощью логистической кривой (Slogistic1), зависимости Хилла-Ленгмюра (Hill1) и кривой Srichards1 показало, что первые две зависимости позволяют получить приемлемое значение порогового цикла (диапазон 28-29 циклов) при числе отсчетов не менее 33, т.е. с переходом через точку перегиба не менее, чем на 4 цикла. Более простая модель логистической кривой (1) позволяет найти эту величину непосредственно, как параметр модели, а найденный параметр k зависимости Хилла-Ленгмюра требует последующего пересчета по формуле (3). Эта модель позволяет получать эффективную оценку при меньшей длине участка перехода через точку перегиба, от двух отсчетов. Аппроксимирующая функция (4) позволяет точно вычислять положение точки перегиба x^* даже при большей неопределенности в оценке параметров d и k , но потребуются компенсация систематического дополнительного положительного смещения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01157-23-00 (тема FFZM-2022-0012).

Список литературы

1. Tom M. Mitchell Machine Learning, McGraw-Hill Science/Engineering/Math; (March 1, 1997), ISBN: 0070428077, 432 p.
2. Лубенцова Е.В., Володин А.А. Метод аппроксимирующих преобразований в решении задач управления и моделирования биосистем // Информационные системы и технологии. Вып. 4 (78). 2013. С. 26-35.
3. Gesztelyi, R., Zsuga, J., Kemeny-Beke, A. et al. The Hill equation and the origin of quantitative pharmacology. // Arch. Hist. Exact Sci. Вып. 66. 2012. С. 427–438.

4. URL: <https://d2mvzyuse3lwjc.cloudfront.net/doc/Origin-Help/SRichards1-FitFunc> (Дата обращения: 06.06.2023)

Determination of the threshold cycle of Real-Time PCR based on the approximation of the informative signal by sigmoid functions

Director, Doctor of Engineering degree, Evstrapov A.A. (SPIN: 2053-5020),
Leading Researcher, Doctor of Physico-mathematical degree, Bulyanitsa A.L. (SPIN: 1120-7582)

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg
an_evs@mail.ru

Abstract: The analysis of algorithms for determining the threshold cycle as the inflection point of the kinetic curve of the polymerase chain reaction in real time (RT-PCR) with its approximation by sigmoid functions is carried out. Three approximating dependencies (Slogistic1, Hill1 and Srichards) containing no more than four parameters were used, their parameters were estimated and recalculated into the coordinates of the threshold cycle. The study of the dynamics of estimating the position of the threshold cycle showed that the sample of experimental data should include both the inflection point itself and the next few samples corresponding to the beginning of the transition to the saturation stage. The first dependence is simpler and allows you to calculate the position of the threshold cycle directly. Nevertheless, the use of two other functions that provide an indirect estimate of the inflection point position has its advantages: the possibility of using a shorter sample and greater resistance to parameter variation.

Keywords: polymerase chain reaction, sigmoid function, inflection point, threshold cycle, approximating function, parameter estimation.

Высококонтрастная визуализация капиллярной сети методом капилляроскопии в неинвазивной диагностике опухолей

доцент, к.м.н., Орлова Е.В.¹ (SPIN: 6332-3970)
младший научный сотрудник, Габриелян Г.А.¹ (SPIN: 3719-6354)
научный сотрудник, Гурылева А.В.² (SPIN: 2873-8095)
стажер-исследователь, Куликова Е.Д.^{2,3}
доцент, старший научный сотрудник, Волков М.В.^{2,4} (SPIN: 2040-6005)
доцент, к.м.н., Смирнова Л.М.¹ (SPIN: 8355-4040)

¹ ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский университет), г. Москва, Россия, 119991,

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН; ул. Бултерова, д.15, Москва, Россия, 117342;

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д.5, Москва, Россия, 105005;

⁴ Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, Россия, 197101
orlovaderm@yandex.ru

Ключевые слова: базальноклеточный рак, базалиома, дерматоскопия, неинвазивные методы. видеокапилляроскопия, цифровая обработка.

Введение

В настоящей работе предложены и экспериментально апробированы метод и макет установки высококонтрастной визуализации сосудистой структуры опухолей кожи на основе видеокапилляроскопии. Метод включает в себя съемку с помощью разработанной установки, основными элементами которой является микроскоп с большим рабочим расстоянием, зеленый светодиод, скоростная цифровая камера и механизм позиционирования, и обработку на основе совместного пространственно-частотного анализа последовательности изображений исследуемой области. Установка отличается простотой технической реализации и обеспечивает проведение измерений в произвольной части тела, а обработка позволяет автоматизировано получать детализированное и контрастное двумерное изображение капиллярной сети верхних слоев кожи, или карту сосудов в меланоцитарных и немеланоцитарных образований, а так же прилегающих мягких тканей. Базальноклеточный рак кожи (БКРК) составляет до 80% всех немеланоцитарных злокачественных новообразований кожи. Золотым стандартом в диагностике БКРК является патаморфология биоптата тканей, а недостатком - отсроченность получения результатов и ятрогенная травма при диагностической или лечебно-диагностической тотальной биопсии с последующим формированием рубцовой деформации кожи. Частота ошибок в диагностике неинвазивными методами (дерматоскопия) достигает 26%, что повышает интерес к альтернативным методам компьютерного анализа изображений [1].

Появление в практике неинвазивных методов диагностики позволяет в кратчайшие сроки и без оперативных вмешательств верифицировать диагноз и определить необходимость применения в дальнейшем инвазивных методов диагностики. Такие методы являются одним из первых этапов скрининга новообразований кожи и определения дальнейшей тактики лечебно-диагностических мероприятий [2].

Экспериментальная апробация показала возможность выявления характерных сосудистых морфологических признаков БКРК по полученным с помощью разработанного метода картам сосудов. В рамках дифференциального диагностирования в затруднительных клинических случаях такая оценка опухоли может служить важным диагностическим этапом при определении необходимости дальнейшей биопсии и в конечном счете сократить число неоправданных оперативных вмешательств. Неинвазивный характер и скорость проведения анализа согласно предложенного подхода позволят проводить многократные исследования в ходе наблюдения пациентов после удаления опухоли для выявления рецидивов на ранних стадиях. Экспериментально метод высококонтрастной визуализации сосудов базалиомы был апробирован на 3 пациентов с гистологически подтвержденным диагнозом. Ранее были разработаны методы классификации сосудов для различных задач [3,4]. Сбор характерных для БКРК морфологических рисунков сосудов, разметка и дальнейшее применение машинного обучения, позволит создать на основе предложенного подхода методы автоматизированного прогнозирования диагноза.

На рис. 1 приведены результаты обработки изображения для анализа капиллярной сети образования.

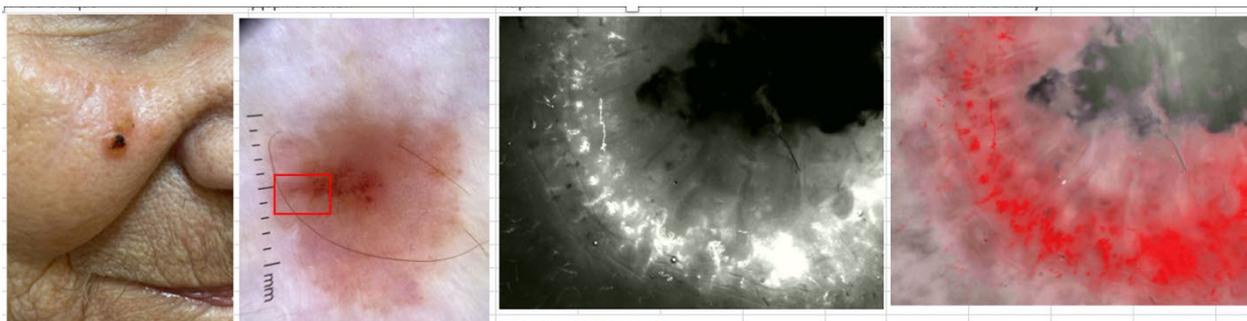


Рис. 1. Базисные функции разложения для первого (а) и второго (б) случаев.

Выводы

С помощью разработанного метода получены высококонтрастные сосудистые рисунки тканей базальноклеточной карциномы с характерной для такого заболевания морфологией, что подтверждает возможность применения видеокапилляроскопического исследования в качестве дополнения к существующим диагностическим методам.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010).

Список литературы

1. L. K. F. L. Rocha *et al.*, “Confocal microscopy, dermoscopy, and histopathology features of atypical intraepidermal melanocytic proliferations associated with evolution to melanoma in situ,” *Int J Dermatol*, vol. 61, no. 2, pp. 167–174, Feb. 2022, doi: 10.1111/IJD.15815.
2. И. Н. Ильгизаровна “Неинвазивные методы диагностики базальноклеточного рака кожи,” *Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н. И. Пирогова*, vol. 5, no. 1, 2010, Accessed: Apr. 06, 2023. [Online]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/neinvazivnye-metody-dagnostiki-bazalno-kletchnogo-raka-kozhi>
3. S. Mishra, Y. X. Wang, C. C. Wei, D. Z. Chen, and X. S. Hu, “VTG-Net: A CNN Based Vessel Topology Graph Network for Retinal Artery/Vein Classification,” *Front Med (Lausanne)*, vol. 8, p. 2124, Nov. 2021, doi: 10.3389/FMED.2021.750396/BIBTEX.
4. R. Rust *et al.*, “A Practical Guide to the Automated Analysis of Vascular Growth, Maturation and Injury in the Brain,” *Front Neurosci*, vol. 14, p. 244, Mar. 2020, doi: 10.3389/FNINS.2020.00244/BIBTEX.

High-contrast visualization of the capillary network by capillaroscopy in non-invasive tumor diagnostics

Associate Professor, PhD, Orlova E.V.¹ (SPIN: 6332-3970)

Junior Researcher, Gabrielyan G.A.¹ (SPIN: 3719-6354)

Researcher, Guryleva A.V.² (SPIN: 2873-8095)

Researcher, Kulikova E.D.^{2,3}

Associate Professor, Senior Researcher, Volkov M.V.^{2,4} (SPIN: 2040-6005)

Associate Professor, Ph.D., Smirnova L.M.¹ (SPIN: 8355-4040)

¹First Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov of the Ministry of Health of Russia (Sechenov University), Moscow, Russia, 119991,

²Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences; st. Butlerova, 15, Moscow, Russia, 117342;

³MSTU im. N.E. Bauman, st. 2nd Baumanskaya, 5, Moscow, Russia, 105005;

⁴ITMO University, Kronverksky pr., 49, St. Petersburg, Russia, 197101
orlovaderm@yandex.ru

Keywords: basal cell carcinoma, basalioma, dermatoscopy, non-invasive methods. video capillaroscopy, digital processing.

Introduction

In the present work, we propose and experimentally test a method and a mock-up of a device for high-contrast visualization of the vascular structure of skin tumors based on video capillaroscopy. The method includes imaging using a developed setup, the main elements of which are a microscope with a large working distance, a green LED, a high-speed digital camera and a positioning mechanism, and processing based on a joint spatial-frequency analysis of a

sequence of images of the area under study. The device is characterized by simplicity of technical implementation and provides measurements in an arbitrary part of the body, and processing allows you to automatically obtain a detailed and contrasting two-dimensional image of the capillary network of the upper layers of the skin, or a map of vessels in melanocytic and non-melanocytic formations, as well as adjacent soft tissues. Basal cell skin cancer (BCCC) accounts for up to 80% of all non-melanocytic malignant skin tumors. The gold standard in the diagnosis of BCC is the pathomorphology of tissue biopsy, and the disadvantage is the delay in obtaining results and iatrogenic injury during diagnostic or therapeutic total biopsy, followed by the formation of cicatricial skin deformity. The error rate in diagnostics by non-invasive methods (dermatoscopy) reaches 26%, which increases interest in alternative methods of computer image analysis [1].

The advent of non-invasive diagnostic methods in practice makes it possible to verify the diagnosis in the shortest possible time and without surgical interventions and determine the need for further use of invasive diagnostic methods. Such methods are one of the first stages of screening for skin neoplasms and determining the further tactics of treatment and diagnostic measures [2].

Experimental approbation showed the possibility of identifying the characteristic vascular morphological signs of BCC according to the vessel maps obtained using the developed method. As part of the differential diagnosis in difficult clinical cases, such an assessment of the tumor can serve as an important diagnostic step in determining the need for further biopsy and ultimately reduce the number of unnecessary surgical interventions. The non-invasive nature and speed of the analysis according to the proposed approach will allow for multiple studies during the observation of patients after tumor removal to detect relapses in the early stages. Experimentally, the method of high-contrast visualization of basalioma vessels was tested on 3 patients with a histologically confirmed diagnosis. Previously, methods for classifying vessels were developed for various tasks [3,4]. The collection of morphological patterns of vessels characteristic of BCRC, marking and further application of machine learning will make it possible to create methods for automated diagnosis prediction based on the proposed approach.

On fig. 1 shows the results of image processing for the analysis of the formation capillary network.

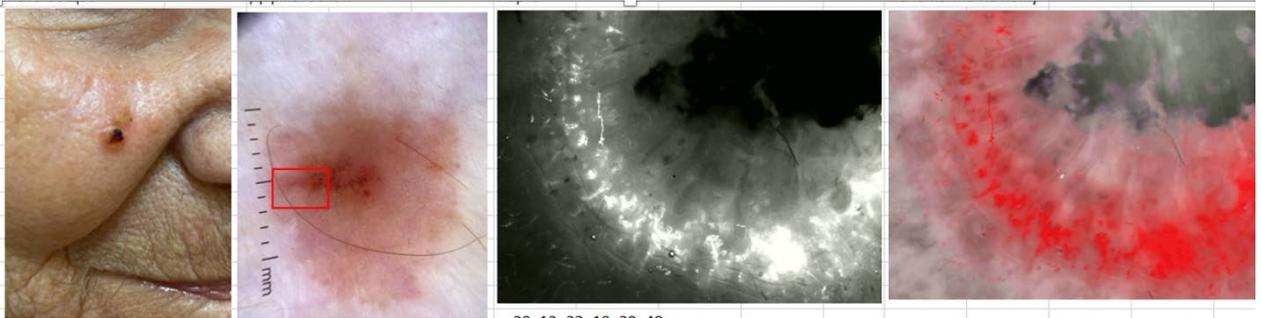


Fig. 1. Basis expansion functions for the first (a) and second (b) cases.

Conclusions

With the help of the developed method, high-contrast vascular patterns of basal cell carcinoma tissues with a characteristic morphology for such a disease were obtained, which confirms the possibility of using videocapillaroscopic examination as an addition to existing diagnostic methods.

The work was carried out within the framework of the State Assignment of the STC UP RAS (project FFNS-2022-0010).

Оптические профилометры для контроля поверхности цилиндрических изделий

ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н., Ропот П.И.
инженер-конструктор I категории, Макаревич А.П.
научный сотрудник, Варанецкий А.М.

Институт физики НАН Беларуси
p.ropot@dragon.bas-net.by

Аннотация: Разработана схема оптического профилометра для контроля цилиндрических поверхностей. Схема основана на использовании конических лазерных пучков, пространственно-угловая структура которых согласована с формой контролируемой поверхности. Проведено тестирование профилометра на примере контроля роликов подшипников.

Ключевые слова: оптический профилометр, конические пучки, цилиндрические и конические поверхности.

Профилометрия неплоских поверхностей является относительно сложной задачей оптической диагностики. Распространенный метод ее решения состоит в том, что лазерный луч сканируют по поверхности тестируемого объекта. Несмотря на универсальность, такой метод профилометрии имеет недостаток, вызванный относительно низким быстродействием и высоким требованием к точности механического перемещения. В докладе представлен результат разработки принципиально иного метода контроля, который не предполагает сканирование лазерного луча. Его суть состоит в радикальном изменении пространственно-угловой структуры зондирующего светового пучка. Для объектов цилиндрической и конической формы оптимальным является использование конических световых пучков. Такой подход позволяет осуществлять профилометрию всей поверхности за одну установку. На рис. 1 показаны две схемы профилометра. Профилометр (а) основан на интерференционной схеме Маха-Цендера, профилометр (б) одноплечевой с кольцевой диафрагмой. Вторая схема менее чувствительна к вибрациям.

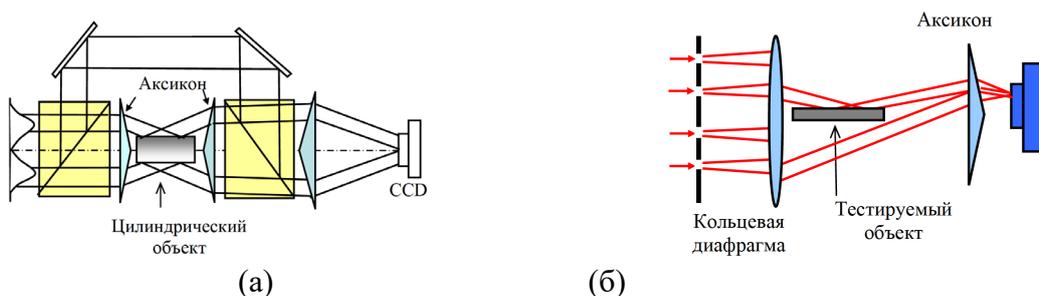


Рис. 1. Две оптические схемы профилометров с коническими пучками.

Примеры тестируемых объектов показаны на рис. 2.



Рис. 2. Ролики подшипников

Минимальное регистрируемое отклонение радиуса цилиндра:

$$\delta r_{obj, \min} = \frac{\Delta\gamma}{2\gamma_1} \delta r_{\min}, \text{ где } \delta r_{\min} - \text{точность измерения положения}$$

интерференционного максимума, $\Delta\gamma$ – угол между опорной и предметной волнами, γ_1 – угол конуса объектной волны. Для схемы (а) $\Delta\gamma \approx 0,35^\circ$, $\gamma_1 = 7,5^\circ$. Отсюда $\delta r_{obj} \approx 0,023\delta r_{\min}$. Для ССD матрицы с размером пикселя $\delta r_{\min} = 6,4\text{мкм}$, имеем $\delta r_{obj} \approx 15\text{нм}$.

Продольное разрешение $\delta z = \lambda / (2\gamma_1 \Delta\gamma)$ и равно $\delta z \approx 0,4\text{мм}$.

Волоконно-оптические устройства передачи информации, легированные редкоземельными ионами

профессор, д.т.н. Д.А.Давронбеков,
докторант, к.ф.-м.н. Н.И.Жураева

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразмий,
Ташкент.

juraeva.0878@gmail.com

Аннотация: Рассмотрены принципы работы волоконных лазеров и волоконно-оптических усилителей, легированных редкоземельными ионами. Редкоземельные ионы, такие как ионы иттрия, эрбия, неодима и другие, обладают уникальными оптическими свойствами, что делает их применение в волоконно-оптических системах очень привлекательным. Проведён обзор результатов исследований волоконных световодов, а также методов и устройств повышения эффективности оптических параметров волоконно-оптических систем связи.

Ключевые слова: усилитель, волоконный лазер, редкоземельный ион, EDFA.

Введение

Волоконно-оптическая система передачи информации обеспечивает высокую пропускную способность, низкую потерю и дальность передачи сигналов. Вместе с тем, с ростом требований к скорости и объему передаваемой информации, появляется необходимость в разработке более эффективных и инновационных волоконно-оптических устройств.

В данной работе рассматривается одна из перспективных технологий - использование легирования редкоземельными ионами в волоконно-оптических устройствах. Редкоземельные ионы обладают уникальными оптическими свойствами, такими как длительное время жизни возбужденного состояния и способность эффективно испускать и поглощать световую энергию в широком диапазоне длин волн. Применение легирования редкоземельными ионами позволяет улучшить характеристики волоконно-оптических устройств, такие как усиление сигналов и модификация их фазовых характеристик.

Волоконные усилители и лазеры обеспечивают высокую производительность, надежность и гибкость волоконно-оптических систем, делая их неотъемлемой частью современных технологий связи, науки и промышленности.

1. Волоконно-оптические усилители.

Принцип действия усилителей на допированном волокне DFA (Doped Fiber Amplifier) основан на эффекте возбуждения посредством внешней накачки атомов редкоземельного материала, помещенных в сердцевину обычного одномодового стекловолокна. Редкоземельные элементы выбираются таким образом, чтобы имелись зоны поглощения внешней энергии и создавалась инверсная населенность, которая приводит к спонтанной и вынужденной люминесценции. При этом вынужденное свечение обусловлено входным сигналом и совпадает с ним по длине волны. Наиболее подходящими для DFA считаются редкоземельные празеодим Pr , неодим Nd , эрбий Er , тулий Tm , совместно эрбий Er и иттрий Y , а также гольмий, самарий, висмут. Они позволяют создать DFA, работающий на различных длинах волн от 500 до 3500 нм. Наибольшее распространение среди DFA получили эрбиевые усилители EDFA [1]. Функциональная схема DFA приведена на рис.1[1].

Для того, чтобы волокно стало усиливающей средой, оно накачивается излучением λ_p от отдельного лазера. При этом возможны как прямая (сонаправленная) и встречная (противонаправленная) накачка от одного лазера, так и двусторонняя накачка (прямая +

встречная) от двух лазеров. Система контроля усиления управляет током накачки лазера благодаря обратной связи, устанавливаемой через делитель мощности.

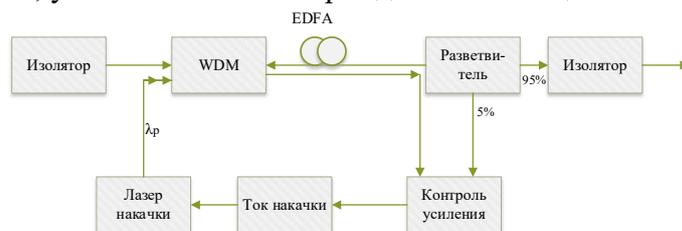


Рис. 1. Функциональная схема DFA.

Усиливаемый сигнал λ_s и накачка λ_p объединяются в мультиплексоре и направляются в оптическое волокно с примесью, где происходит увеличение мощности сигнала. Большая часть мощности усиленного сигнала (95 %) проходит через фильтр на выход. Фильтр отсекает накачку λ_p и шумы вне полосы частот сигнала. Оптический изолятор исключает прохождение отраженных в усилителе сигналов во входящее волокно.

EDFA является одним из наиболее практичных, однако его применение ограничено окном прозрачности 1550 нм. Усиление в EDFA происходит по всей длине волокна, легированного редкоземельным металлом эрбием. Усилитель EDFA состоит из двух активных элементов: активного волокна, легированного Er^{3+} , и полупроводникового лазера накачки. Для подачи сигнала накачки в волокно требуется, по крайней мере, один разветвитель, селективный к длине волны. Реально используются длины волн 1480 и 980 нм. Это обусловлено рядом причин: эффективностью полупроводниковых лазеров большой мощности, малым затуханием оптического волокна, низкими требованиями к точности длины волны накачки.

Усилитель на кварцевом волокне, легированном эрбием, обеспечивает полосу около 35 нм в окне прозрачности 1550 нм. Для использования широкой полосы требуются усилители с другими редкоземельными легирующими добавками. Одним из таких усилителей может быть оптический усилитель на теллуритовом волокне, легированном эрбием (EDTFA-erbium-doped tellurite fiber amplifier), который способен расширить полосу усиления до 90 нм [7]. Полезную полосу пропускания в окне 1550 нм можно еще больше расширить, если использовать оптические усилители на фтористом волокне, легированном тулием (TDFFA-thulium-doped tellurite fiber amplifier) или празеодимом (PDFFA-praseodymium-doped tellurite fiber amplifier). Используя тулиевый усилитель типа TDFFA, можно получить полосу усилителя с 1470 до 1650 нм.

Усилители на волоконном световоде, легированном ионами эрбия (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA) обладают сочетанием уникальных свойств, обеспечившим им быстрое внедрение в системы дальней связи. Среди этих свойств следующие [2]:

- возможность одновременного усиления сигналов с различными длинами волн.
- непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно.
- практически точное соответствие рабочего диапазона эрбиевых усилителей области минимальных оптических потерь световодов на основе кварцевого стекла.
- низкий уровень шума и простота включения в волоконно-оптическую систему передачи.

Для практического использования в системах волоконно-оптической связи наибольшее значение имеют параметры эрбиевых усилителей такие как: коэффициент усиления, выходная мощность сигнала, шум-фактор и мощность усиленного спонтанного излучения, спектральная ширина и равномерность полосы усиления. Эти параметры наиболее подробно рассмотрены в работах [2,3].

Коэффициент усиления оптического усилителя EDFA зависит от длины волны и мощности входного сигнала. Зависимость от длины волны определяется формой энергетических уровней легированных атомов эрбия, их концентрацией [3], распределением, длиной волны лазера накачки и многими другими параметрами и имеет достаточно сложную форму.

2. Волоконные лазеры легированные редкоземельными ионами.

В волоконных лазерах в качестве активной среды используется сердцевина световода, легированная редкоземельными (РЗ) ионами Yb^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} , Nd^{3+} , Pr^{3+} , Ho^{3+} и др. в зависимости от требуемой длины волны генерации [4].

Применимость активного иона для легирования волоконных световодов на основе кварцевого стекла определяется тем, что активный ион должен иметь излучательный переход в ближней инфракрасной области спектра, в кварцевом стекле энергия фотонов составляет $400\text{-}1100\text{ см}^{-1}$, поэтому наличие энергетических уровней с малым энергетическим зазором внутри оптического перехода приводит к безизлучательной релаксации, препятствуя появлению люминесценции [5].

Основные свойства трёхвалентных РЗ ионов, связанные с процессами поглощения света или с процессами излучения света, то есть люминесценцией, определяются внутриконтинуальными переходами между $4f^n$ состояниями, а также межконтинуальными переходами между $4f^n$ и $5d$ состояниями, в соответствии с правилами отбора. Благодаря наличию у ионов РЗЭ полностью заполненных $5s^2$ и $5p^6$ оболочек, электроны, находящиеся на уровнях $4f^n$ оболочки, практически полностью экранированы от влияния внешнего кристаллического поля [6]. Оптические, магнитооптические свойства РЗ-ионов Ho^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} в низкосимметричных кристаллических полях экспериментально и теоретически исследованы в работах [7-8].

Результаты анализа оптических волокон с усилением показывают, что концентрация ионов в оптических волокнах, легированных редкоземельными элементами, оказывает важное влияние на люминесценцию [9].

Верхний предел концентрации активных ионов определяется возникновением эффекта кооперативной апконверсии. Это явление состоит в том, что при большой концентрации активных ионов возможно образование кластеров, состоящих из двух и более ионов эрбия. Когда эти ионы оказываются в возбужденном состоянии, происходит обмен энергиями, в результате чего один из них переходит в состояние с еще более высокой энергией, а второй – безизлучательно релаксирует на основной уровень. Таким образом, часть ионов эрбия поглощает излучение усиленного сигнала, снижая эффективность усилителя. Нижний предел по концентрации ионов эрбия определяется тем, что слишком длинный активный световод неудобен при изготовлении усилителя, а также тем, что при использовании большого количества активного световода повышается стоимость усилителя. На практике концентрация ионов эрбия составляет $10^{18} - 10^{19}\text{ см}^{-3}$, что обеспечивает длину используемого активного световода от нескольких единиц до нескольких десятков метров [2].

Метод легирования оптических материалов редкоземельными элементами ионно-лучевым напылением с последующим термическим отжигом, позволяет создавать достаточно однородные слои эрбия и на достаточную глубину в оптических волокнах [10].

В работах [11-13] экспериментально доказано что, дополнительное легирование оксида эрбия (Er_2O_3) с оксидом алюминия (Al_2O_3), способствует подавлению кластеризации ионов эрбия, что ведет к уменьшению эффекта ап-конверсии, тем самым позволяя достигать экстремально высокой концентрации активных ионов эрбия ($10^{20}\text{-}10^{21}$) см^{-3} в малых размерах модифицированного участка 2-5 см.

В настоящее время одной из актуальных задач является исследование методов улучшения спектральных характеристик волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), которые находят широкое применение в телекоммуникациях, в том числе мобильных системах

связи, беспроводных сенсорных сетях и т.д. [14, 15]. Ещё одним из требований является повышение надежности и живучести сетей телекоммуникаций. Устройство, разработанное для диагностики и оптимизации спектральных характеристик оптоволоконных систем передачи информации, позволяет тестировать оптические усилители, в частности оптические усилители на основе оптического волокна, легированного эрбием EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier), измерять функционирование волоконно-оптических линий связи с оптическим спектральным уплотнением [17-18].

Выводы

В результате проведенного аналитического исследования показано, что волоконно-оптические устройства обладают рядом преимуществ, обеспечивающих широкое использование в системах дальней связи. Концентрация примеси редкоземельного элемента в сердцевине волоконного световода характеристика, влияющая, на величину люминесценции которая определяет основные параметры будущих лазеров и усилителей. Длина волны излучения волоконных лазеров зависит от вида легированного редкоземельного иона. Разработанные устройства [14, 15, 17, 18] позволяют повысить эффективность ВОСП и выполнить диагностику элементов волоконно-оптических линий связи.

Применение волоконных усилителей, легированных различными редкоземельными ионами даёт возможность передачи на протяженных волоконно-оптических линиях связи.

Список литературы

1. Е.А.Довольнов, В.В.Кузнецов, В.Г.Миргород, С.Н.Шарангович. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем передачи : Учебное пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 156 с.
2. Курков А.С., Наний О.Е. Эрбиевые волоконно-оптические усилители. // LightwaveRE. 2003. № 1. С. 14–19.
3. T.D. Radjabov, A.M. Nazarov, A.A. Simonov, S.V. Pichko, Z.T. Khakimov. Implantation of optical materials by rare-earths elements - erbium// 2007 3rd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet, ICI 2007
4. А.К. Пржеvusкий, Н.В. Никоноров. «Конденсированные лазерные среды». Учебное пособие, курс лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 г. – 147 стр
5. А.С.Курков, Е.М.Дианов. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности. // Квантовая электроника. 34, №14.2004г. – 881-900
6. В.А. Пустоваров. Спектроскопия редкоземельных ионов. Учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург, УрФУ, 2016 г. – 70 стр.
7. У.В. Валиев, J.B. Gruber, И.Р. Гапдулхаков, Н.И. Жураева, А.К. Мухаммадиев, Ш.А.Рахимов, И.С. Эдельман. Магнитооптика излучательного перехода $^1D_2 \rightarrow ^3F_4$ в тулий-иттриевом гранате-алюминате $Tm^{3+}:YAG$ // Опт. и Спектр. - 2009. - Т.106. - № 6. - с. 959-966.
8. U.V. Valiev, Sh. A. Rakhimov, N.I. Juraeva, R.A. Rupp, L. Zhao, Zh. Wang, Zh. Zhai, J.B. Gruber and G.W. Burdick. Optical and magneto-optical properties of $Ho^{3+}:YGG$ // Phys. Stat. Sol.(b) – 2010 - Vol. 247 - No. 1 - p. 163–169
9. Ning Zhang, Huijuan Sun, Yang Luo. Research on key technologies for 2 μ m band of thulium-doped fiber laser. // Journal of Physics: Conference Series. 1812 (2021) 012014
10. Inogamov A.M., Radjabov T.D. Modified thin-film fabrication method using vacuum thermal evaporation and vacuum synthesis: application to preparation of Er-doped fiber amplifiers// International Journal of Innovation and Applied Studies, 2014. – vol. 5, N 1. – pp. 16-22,
11. Патент РУз №04944. Способ изготовления заготовки активированных оптических волокон/ Раджабов Т.Д., Иногамов А.М., Камардин А.И., Симонов А.А., Давронбеков Д.А., Таженев К.Е.// Расмий ахборотнома. – 2014. - №4.

12. Д.Давронбеков, З.Хакимов. Методы улучшения спектральных характеристик волоконно-оптических систем передачи информации: монография. – Т.: “Yoshlar nashriyot uyi”, 2020. – 112 с.
13. T.Radjabov, Z.Hakimov, D.Davronbekov, A.Nazarov. Improve the Spectral Characteristics of High-Speed Broadband Telecommunications Networks // XVIII Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи»: Материалы конференции. - Минск, 2013. – С.34-36.
14. Hakimov Z.T., Davronbekov D.A. Equalization of spectral characterist of optical signals by acousto-optic filters // 2007 3rd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet, ICI 2007. – p.1-3
15. D.A. Davronbekov; Z.T. Khakimov. Joint Application of A Runiing Wave Amplifier and Acousto-Optical Configurable Filter for Linearization of The Passage Spectral Characteristics of Focles // 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT - 2020. – p.1-4.
16. Nazarov A.M., Rakhmonov A.R., Khurbanbayev Sh.Z., Mavlyanov A.Sh., Davronbekov D.A. The device for diagnostics of optical fiber cables // European Journal of Technical and Natural Sciences Scientific journal. - №5. - 2017. - p.82-88

Создание колориметрической установки на основе акустооптики и исследование восприятия цвета для случая полного цветового охвата

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Ершов Е.И.¹
старший научный сотрудник, д.т.н., Мачихин А.С.²
старший научный сотрудник, д.т.н., Беляева А.С.²
доцент, к.т.н., Романова Г.Э.³

¹Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва

²Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

³Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург
e.i.ershov@gmail.com

Аннотация: Целью данного исследования является разработка новой лабораторной установки на основе акустооптического фильтра и методологии проведения исследований свойств зрительной системы человека (ЗСЧ). Новая лабораторная установка и методология проведения исследований (включая способ предъявления стимулов, измерение порогов и количественных характеристик, а также их анализа) свойств цветовосприятия ЗСЧ с использованием акустооптических фильтров с динамической спектральной адресацией впервые позволит существенно продвинуться в понимании устройства восприятия зрительной системы человека на всей площади цветового треугольника стандартного наблюдателя CIE XYZ 1931 года.

Ключевые слова: колориметрия, акусто-оптика, цветовая репродукция, зрительная система человека

Знания о восприятии цвета человеком являются важнейшей частью фундамента множества отраслей экономики. Стандарты колориметрии и цветовой репродукции необходимы для воспроизведения и регистрации цветовых характеристик. Задача воспроизведения возникает в таких отраслях как полиграфия, репрография, текстильная, строительная, автомобильная и цифровая промышленность в части изготовления

дисплеев, проецирующих систем и др. Задача регистрации — в индустриях создания цифровых камер и сканирующих систем. Колориметрические модели цветового восприятия являются неотъемлемой составляющей во всех современных системах формирования, регистрации и сжатия изображений, предъявляемых человеку.

Заявленную научную проблему необходимо рассмотреть и с другого ракурса. Вопросы формирования актуальных стандартов в области колориметрии являются чрезвычайно важными для мирового сообщества, что подтверждается активной их разработкой международными организациями ISO и CIE. В контексте этого, формирование стандартов колориметрии (и стандартных моделей, в частности) представляется важнейшей государственной задачей, незаслуженно обделенной вниманием (в ГРНТИ не содержится упоминаний о колориметрии, а только о репрографии, что является лишь не самой большой подзадачей цветовой репродукции). Запланированная к разработке новая методология исследования свойств зрительной системы человека (ЗСЧ) позволит продвинуться в формировании новых российских, а также повлиять на формирование международных стандартов колориметрии.

Существенным фактором, стимулирующим развитие науки и стандартов колориметрии, является бурное развитие технологий цифрового воспроизведения цветов. За последние 10 лет в массовое употребление поступили дисплеи с технологиями LED, uLED, muLED, AMOLED и QLED, обеспечивающие большой цветовой охват. Многие современные мобильные устройства и дисплеи уже поддерживают цветовой профиль DCI-P3, который покрывает 86% площади цветового треугольника CIE XYZ 1931.

При этом достоверно можно заявить, что все еще не существует моделей, гарантированно обеспечивающих высокое качество представления или предсказания цвета для всего цветового охвата стандартного наблюдателя. Это объясняется отсутствием инструмента научного познания, позволяющего проводить исследование цветовосприятия для произвольного опорного цвета вблизи к границе цветового треугольника. Наиболее популярные современные методы, основанные на дисплеях с широким охватом, попросту не позволяют этого сделать, а колориметрические установки требуют использования множества различных цветных фильтров, что делает проведение массовых крупномасштабных измерений почти невозможным.

Предлагаемая к разработке в работе новая лабораторная установка и методология проведения исследований свойств цветовосприятия ЗСЧ с использованием акустооптических фильтров (АОФ) с динамической спектральной адресацией впервые позволит преодолеть эти ограничения и продвинуться в понимании устройства восприятия ЗСЧ на всей площади цветового треугольника CIE XYZ 1931 года.

Новизна поставленной задачи обосновывается, во-первых, созданием принципиально новой научно-исследовательской колориметрической установки на основе АОФ, которая обеспечит ранее недоступную возможность исследования свойств цветового восприятия на всей площади цветового треугольника. Во-вторых, получением нового, ранее недоступного знания о свойствах цветового восприятия во всех областях цветового треугольника CIE XYZ в форме новых измерений, моделей и математических свойств цветового пространства.

Результаты работы позволят снабдить российское и международное научное сообщество новым исследовательским инструментом, открыв новый метод и направление исследований, а также получить новые знания о цветовом восприятии его моделях и математической структуре на всей площади цветового треугольника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 23-71-10089.

New colorimetric setup creation based on acousto-optics and research of color appearance for full color gamut scenario

Senior Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences., Ershov E.I.¹
Senior Researcher, Doctor of Engineering degree, Machikhin A.S.²
Junior Researcher, Belyaeva A.S.²
Assistant professor, Ph.D. of Engineering degree, Romanova G.E.³

¹Institute for information transmission problems (Kharkevich institute) of RAS, Moscow

²Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

³Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg
e.i.ershov@gmail.com

Abstract: The purpose of this study is to develop a new laboratory setup based on an acousto-optical filter and a methodology for conducting research on the properties of the human visual system (HVS). A new laboratory setup and methodology for conducting research (including the method of presenting stimuli, measuring thresholds and quantitative characteristics, as well as their analysis) of the properties of color perception of HSV's using acousto-optic filters with dynamic spectral addressing will, for the first time, significantly advance in understanding the perception of the human visual system over the entire color area. triangle of the standard observer CIE XYZ 1931.

Keywords: colorimetry, acousto-optics, color reproduction, human visual system

Позиционно-чувствительный детектор ионизирующих излучений на основе прозрачного световода и кремниевых фотоумножителей

младший научный сотрудник, Трунов Д.Н.^{1,2} (SPIN: 7201-1460)
научный сотрудник, Марин В.Н.^{1,2}
научный сотрудник к.ф.-м.н., Алтынбаев Е.В.²
ведущий научный сотрудник к.ф.-м.н., Садыков Р.А.¹ (SPIN: 2717-9005)

¹Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Троицк, Москва

²НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина
dtrunov@inr.ru

Аннотация: Описан одномерный позиционно-чувствительный детектор нейтронов, разработанный на основе 2 кремниевых фотоумножителей и органического световода. Двустороннее считывание SiPM используется для определения координаты в подобных типах детектора. Показан метод определения координаты, основанный на затухании фотонов в объеме прозрачного световода и анализе сигналов, получаемых с кремниевых фотоумножителей. Описан используемый предусилитель с функцией компенсации заряда. Исследованы тестовые детекторы на основе сцинтиллятора ZnS (Ag):⁶LiF и прозрачного световода. Приведены измерения 2-х типов детекторов: на основе SiPM фирмы Sensl тип C и Hamamatsu s12572-015p. Сигналы SiPM записываются цифровым диджитайзером Saen DT5720 с частотой дискретизации 250 Мвыб/с. Анализ координаты производится по анализу амплитуды сигналов. Показана возможность определения координаты только по анализу амплитуды, а также получено координатное разрешение в тестовых детекторах.

Ключевые слова: детектор, ионизирующее излучение, кремниевый фотоумножитель, нейтроны, дифракция.

Введение

В данной работе стояла задача создать недорогой линейный сцинтилляционный позиционно-чувствительный детектор (ПЧД) с простой электроникой, и исследовать возможность анализа координаты только с использованием амплитуда сигнала получаемой с кремниевых фотоумножителей, что в свою очередь позволит упростить и удешевить электронику. Для исследования возможности создания подобного типа детекторов были протестированы 2 типа SiPM с различным количеством ячеек. Так же проведена оценка влияние типа покрытия световода на оптические параметры.

1. Описание метода определения координаты

Принцип работы детектора: Ионизирующая частица попадает в объём сцинтиллятора, где происходит ее конвертация в фотоны. Фотоны, испускаемые сцинтиллятором, попадают в объём световода и по нему попадают на чувствительную область кремниевого фотоумножителя (SiPM), где вызывают срабатывание ячеек кремниевого фотоумножителя пропорционально количеству попавших фотоном. В зависимости от места попадания фотонов в световод их путь до левого (1а, 2а рис. 1) и правого фотоумножителя (1б, 2б рис. 1) будет отличаться, а так как световод имеет коэффициент пропускания около 90%, следовательно будет отличаться количество фотонов [1]. Из анализа амплитуды возможно получить координаты попадания фотонов.

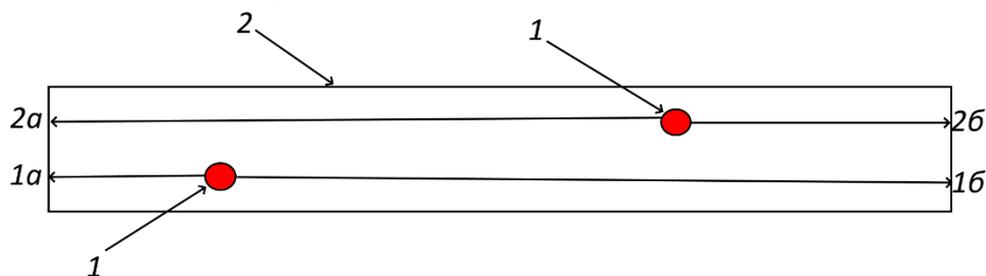


Рис. 1. Показания различия траектории при различном расположении сцинтилляционной вспышки, 1 – вспышка фотонов, 2 – световод.

2. Тестовые детекторы

В качестве прототипа для создания детектора использованы разработанные ранее детекторы [2, 3]. Габаритные размеры детектора 5x60 мм, размер сцинтиллятора 5x50 мм, количество слоев сцинтиллятора - 1. В качестве сцинтиллятора использован нейтроночувствительный сцинтиллятор BC-704 ZnS:⁶LiF 1:2, толщиной 0,45 мм, в качестве световода оргстекло с со светопропускание 92% (для 400–800 нм). В качестве SiPM были выбраны 2 варианта: Sensl MicroSC/FC 30035 и Hamamatsu s12572-015p. Параметры SiPM от Sensl: количество ячеек 4774, квантовая эффективность 47%, коэффициент усиления 6*10⁶. Параметры Hamamatsu: коэффициент усиления 2,30*10⁵, темновой шум 0,98М, Напряжение питания SiPM 71,6 В, количество ячеек 40000, квантовая эффективность 25%. Hamamatsu имеет меньшую квантовую эффективность и меньший коэффициент усиления, но при этом имеет большее количество ячеек. Для улучшения качества сбора света, по краям световода изготовлены сверхширокоугольные объективы с целенаправленно увеличенной дисторсией (“Рыбий глаз”), которые заполнены клеем типа оптический цемент EJ-500. На рис. 2 показан внешний вид подобного детектора.

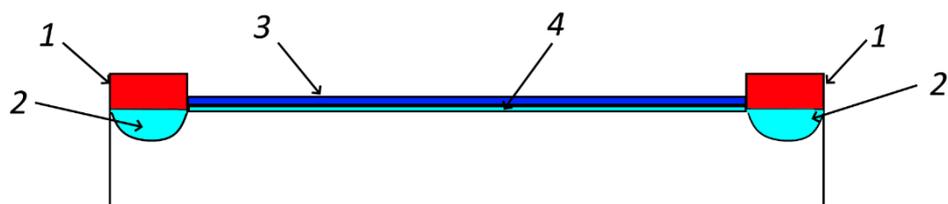


Рис. 2. Блок схема детектора, 1- SiPM, 2 Линза типа рыбий глаз, заполненная клеем, 3 – Сцинтиллятор ZnS: LiF, 4- клеевая прослойка.

3. Предусилитель с функцией компенсации заряда

Для усиления сигналов с кремниевых фотоумножителей используется предусилитель с функцией компенсации заряда[4]. Принцип работы основан на линейном заряде кремниевого фотоумножителя после регистрации фотонов. Это дает уменьшение времени восстановления до 2мкс и увеличение загрузочной способности сцинтилляционных детекторов.

4. Установка для тестирования

В качестве источника нейтронов использовался ^{252}Cf после которого расположен замедлитель нейтронов толщиной 100 мм, заполненный тяжелой водой D_2O . Детектор расположен на линейной подвижке Zaber LHM100A-T3A с ходом 100мм, которая перемещает детектор вдоль пучка. После замедлителя расположена комбинированная защита толщиной 5 см состоящая из слоев кадмия и слоев свинца со щелью размером 2 мм x 20 мм. Общая толщина кадмия около 2 см, свинца 3 см. Расстояние источник нейтронов - детектор 30 см. Детектор расположен на расстоянии около 3 мм от щели. Дополнительно для защиты от рассеянного излучения детектор с подвижкой были закрыт со всех сторон свинцовыми кирпичами толщиной 30 мм перед которыми расположены листы кадмия толщиной 2 мм. Сигналы полученные с SiPM попадают на предусилитель, сигналы с которого анализируются и сохраняются диджитайзером Caen DT5720.

Также была написана программа для автоматизации эксперимента, которая сохраняла данные с диджитайзера и после сбора необходимой статистики перемещала детектор на 1 мм до тех пор, пока не будет пройден весь чувствительный объем детектора.

5. Тестирование детекторов

Первым был протестирован детектор на основе SiPM фирмы Sensl с диффузионным отражателем. Аналоговый сигнал снимался сразу после зарядово-чувствительного усилителя. Напряжение питания SiPM 33,1 В, количество измерений на точку 1000 шт. В результате измерений не удалось получить зависимость амплитуды от положения поэтому графики не приводятся. Детектор без диффузионного отражателя не тестировался. Предполагаем, что это связано с низким количеством ячеек кремниевого фотоумножителя т.к. количество ячеек всего около 4000 шт., а количество фотонов получаемого с одного события регистрации нейтрона примерно 1.6×10^5 .

Далее было проведено измерение детектора с диффузионным отражателем на основе Hamamatsu, количество измерений на точку 5000. На графике в качестве амплитуды отображена средняя амплитуда в точке. Результаты измерения показаны на рис. 3.

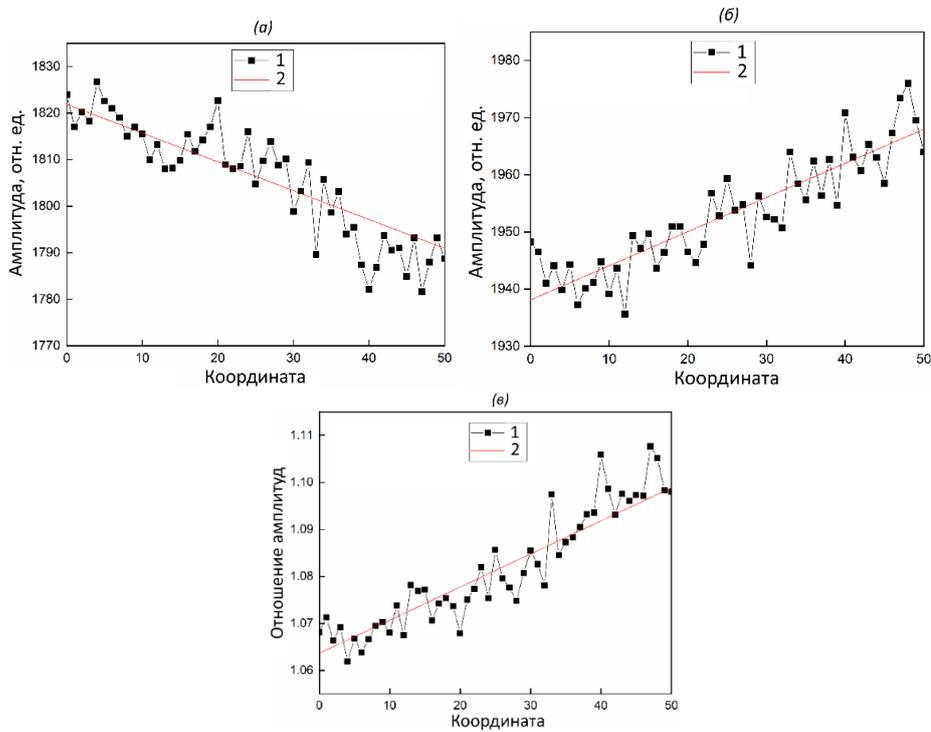


Рис. 3. (а) – средняя амплитуда с левого SiPM, (б) – средняя амплитуда с правого SiPM, (в) – отношение амплитуд: 1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимация.

Как видно из результатов измерений, форма затухания фотонов в световоде имеет линейный характер и отслеживается зависимость амплитуды от координаты, которая описывается линейной функцией. В общем виде, затухание фотонов в объеме световода описывается Законом Бугера — Ламберта — Бера, который описывается формулой:

$$I = I_0 e^{-k_l}, \quad (1)$$

где I – интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной l , I_0 – интенсивность света на входе в вещество, k – показатель поглощения. Как видно из формулы, затухание света в веществе происходит по экспоненциальному закону и не учитывает отражения от стенок световода. Линейная форма зависимости, полученной из экспериментальных данных, позволяет судить о том, что на данной длине световода затухание не сильно выражено, и позволяет предположить, что возможно увеличить длину детектора без сильной потери интенсивности. Разрешение по координате в данном образце детектора примерно 10 мм.

Далее были проведены измерения детектора без диффузионного отражателя. По результатам измерения детектор имеет большее затухание, и форма приближается к экспоненциальной, однако имеет линейный характер на начальной части. За счет большего затухания данный детектор имеет большее разрешение (примерно 5 мм).

Выводы

Из проведенных измерений можно сделать вывод, что возможно получать координату (в) подобного типа детекторов только на анализе амплитудной характеристики с двух SiPM, что в свою очередь позволяет создавать дешевые одномерные ПЧД. Хотя подобные ПЧД не позволяют получить высокую разрешающую способность, но позволяют получать дополнительную информацию при проведении различных экспериментов. Пространственное разрешение детектора в нашем случае ограничено шириной детектора (5 мм) и сильно зависит от типа отражающей поверхности световода. Это позволяет сделать вывод что подбором материалов, ширины световода и типа покрытия позволяет менять параметры подобных детекторов. Минимально-возможная толщина световода (в)

подобного типа детекторов ограничена размерами SiPM (1мм) и является одним из ограничений по минимальному пространственному разрешению.

Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075–10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15. СИН.21.0021).

Список литературы

1. Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков [и др.] Моделирование оптических параметров сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов с органическим световодом // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 4. – С. 71-76.
2. Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н. [и др.] Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе zns(ag)/lif и лавинных фотодиодов// Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. № 18. С. 96-101.
3. Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н. [и др.] Кольцевой детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра, состоящий из линейных сцинтилляционных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 1. С. 5-12.
4. Патент № 2782417 С1 Российская Федерация, МПК G01T 1/208. Устройство для регистрации излучения: № 2022105038: заявл. 25.11.2021: опубл. 26.10.2022 / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Е. В. Алтынбаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

Position-sensitive detector of ionizing radiation based on a transparent light guide and silicon photomultipliers

Junior Researcher, Trunov D.N.^{1,2} (SPIN: 7201-1460)

Researcher, Marin V.N.^{1,2}

Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Altynbaev E.V.²

Leading Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Sadykov R.A.¹ (SPIN: 2717-9005)

¹Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow

²NRC "Kurchatov Institute" - PNPI, Gatchina

dtrunov@inr.ru

Abstract: A one-dimensional position-sensitive neutron detector based on two silicon photomultipliers and an organic light guide is described. Bidirectional SiPM reading is used for position determination in these types of detector. A method for determining the coordinate is shown, based on the attenuation of photons in the volume of a transparent light guide and the analysis of signals received from silicon photomultipliers. The used preamplifier with charge compensation function is described. Test detectors based on a ZnS(Ag):6LiF scintillator and a transparent light guide have been studied. Measurements of 2 types of detectors are given: based on SiPM by Sensl type C and Hamamatsu s12572-015p. The SiPM signals are recorded with a Caen DT5720 digital digitizer at a sampling rate of 250 MSa/s. The analysis of the coordinate is carried out by analyzing the amplitude of the signals. The possibility of determining the coordinate only by analyzing the amplitude is shown, and the coordinate resolution in test detectors is also obtained.

Keywords: detector, ionizing radiation, silicon photomultiplier, neutrons, diffraction.

Компактный спектрометр возмущенных угловых гамма-гамма корреляций

научный сотрудник, к.ф.-м.н., Саламатин Д.А.^{1,2} (SPIN: 7657-4476)

начальник группы 5 СГИ ОРБ, Михин М.В.²

научный сотрудник, к.ф.-м.н., Саламатин А.В.²

заведующий сектором ЛНМиСМ, к.ф.-м.н., Цвященко А.В.¹

¹Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, Троицк, Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

dasalam@gmail.com

Аннотация: Метод возмущенных угловых гамма-гамма корреляций позволяет определять параметры сверхтонких взаимодействий в конденсированных средах, в которые помещено ядро-зонд. Для этого требуется проводить измерения энергетических спектров гамма квантов от зонда и временных спектров двойных мажоритарных совпадений. Нами был разработан компактный спектрометр возмущенных угловых гамма-гамма корреляций VUKAP на базе цифровой электроники и цифровой обработки сигналов. Спектрометр состоит из АЦП с частотой оцифровки 250 МГц, на который поступают сигналы со сцинтилляционных детекторов с кристаллами LaBr₃. После отбора полезных событий с помощью ПЛИС сигналы через USB контроллер поступают на ПК, где происходит цифровая обработка, позволяющая определить энергию и временной момент прихода гамма кванта. Спектрометр также может быть использован для измерения времени жизни аннигилирующих позитронов.

Ключевые слова: возмущенные угловые корреляции, цифровая обработка сигналов, аннигиляция позитронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-72-00014, <https://rscf.ru/project/22-72-00014/>.

Compact time differential perturbed angular gamma-gamma correlations spectrometer

Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Salamatin D.A.^{1,2} (SPIN: 7657-4476)

Head of group 5 SGI ORB, Mikhin M.V.²

Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Salamatin A.V.²

Head of Sector LNMiSM, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Tsvyashchenko A.V.¹

¹Vereshchagin Institute of High Pressure Physics, Russian Academy of Sciences, Troitsk

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

dasalam@gmail.com

Abstract: The time differential perturbed angular gamma-gamma correlations technique makes it possible to determine the parameters of hyperfine interactions (electric field gradient and hyperfine magnetic field) in condensed media on the site which a probe nucleus is placed. This requires measurements of the energy spectra of gamma quanta from the probe and the time spectra of majority coincidences. We have developed a compact spectrometer of perturbed angular gamma-gamma correlations VUKAP based on digital electronics and digital signal processing. The spectrometer consists of an ADC with a sampling frequency of 250 MHz, which receives signals from scintillation detectors with LaBr₃ crystals. After the selection of useful events using the FPGA, the signals via the USB controller are sent to the PC, where digital processing takes place, which makes it possible to determine the energy and time of arrival of the

gamma quantum. The spectrometer can also be used to measure the lifetime of annihilating positrons.

Keywords: time differential perturbed angular correlations, digital signal processing, positron annihilation

This work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-72-00014, <https://rscf.ru/project/22-72-00014/>.

Обобщение зависимостей сигналов трансформаторных дифференциальных вихретоковых преобразователей

главный научный сотрудник, д.т.н., Шкатов П.Н. (SPIN: 6013-5780)

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
МИРЭА - РТУ, Москва
petr_shkatov@mail.ru

Аннотация: Для обобщения зависимостей вихретоковых сигналов от измеряемых параметров применяется их нормировка по величине U_0 на выходе измерительной обмотки. Однако это невозможно сделать для дифференциальных трансформаторных вихретоковых преобразователей (ВТП) с $U_0=0$, например, для ВТП с ортогональными возбуждающей и измерительными обмотками. Предложен способ определения нормирующего напряжения U_N в подобных случаях, реализуемый как в расчетах, так и экспериментально.

Ключевые слова: дифференциальный вихретоковый преобразователь, нормировка.

Введение

К наиболее эффективным ВТП для дефектоскопии относятся дифференциальные трансформаторные ВТП с начальным напряжением $U_0 = 0$ на измерительных катушках при отсутствии объекта контроля (ОК) [1]. Следовательно, не удастся обычным путем [2] определить зависимости для относительных вносимых дефектом напряжений нормировкой получаемых вихретоковых сигналов по величине U_0 .

1. Способ определения нормирующего напряжения

Нормирующее напряжение U_N должно также, как и U_0 в ВТП с соосными катушками, быть пропорциональна величине $k=f I_B W_1 W_2$, где f – частота возбуждающего тока I_B , W_1 и W_2 . Предлагается в качестве величины U_N выбирать максимум напряжения при перемещении двух идентичных ВТП, приложенных рабочими торцами друг к другу (рис. 1). При этом ВТП₁ подключается к электронному блоку прибора только измерительной обмоткой, а ВТП₂ – только возбуждающей.

На рис. 2 приведена зависимость амплитуды U вносимого напряжения, регистрируемая на дисплее прибора «Вектор – АКА Скан» при перемещении ВТП₁ относительно ВТП₂.

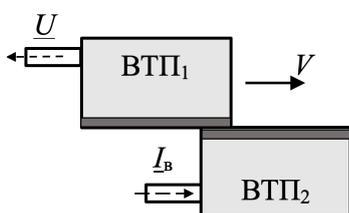


Рис. 1. Схема для измерения U_N .

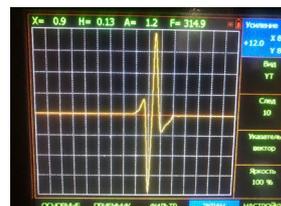


Рис. 2. Изменение U при перемещении ВТП₁.

Выводы

Предложенный способ позволяет получить обобщенные зависимости для дифференциальных ВТП любой конструкции, как экспериментально, так и в расчетах.

Список литературы

1. Uchanin V.M. Surface EDDY current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems // The Paton Welding Journal, 2023, N2, pp. 46-55.
2. Федосенко Ю. К., Шкатов П. Н., Ефимов А. Г. Вихретоковый контроль. – Москва: Издательский дом "Спектр", 2014. – 224 с.

Разработка специализированной приставки для *in vivo* ультразвуковых исследований высокого разрешения мелких лабораторных животных

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Мороков Е.С. (SPIN: 1234-5678)

Институт биохимической физики им Н.М. Эмануэля РАН, Москва
es_morokov@yahoo.com

Аннотация: В работе представлены первые результаты применения нового подхода для ультразвуковой визуализации высокого разрешения процессов деградации биополимеров *in vivo*. Высокочастотный акустический микроскоп был модифицирован для неинвазивного сканирования мелких лабораторных животных прижизненно. Установка включает в себя систему наркоза, юстировочный стол, систему подогрева и поддержания температуры мелких лабораторных животных, иммерсионную ванну, которые совмещены с акустическим микроскопом. Установка позволяет изучать и визуализировать объемную микроанатомическую структуру имплантируемого полимера и окружающих тканей с разрешением нескольких единиц микрон. Экспериментальное оборудование было верифицировано на образцах быстро резорбируемых полимеров PLGA.

Ключевые слова: Ультразвук, акустическая микроскопия, *in vivo* мониторинг, деградация полимеров.

Новая конструкция генератора высоковольтных прямоугольных импульсов

Деспотули А.Л., Казьмирук В.В., Деспотули А.А., Андреева А.В.

ФГБУН Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (ИПТМ РАН), 142432, Черноголовка, Московская область, Россия

Слаботочные генераторы высоковольтных (вв) прямоугольных (П) импульсов широко востребованы в практике современной научной лаборатории. В биомедицине, такие импульсы используют для подавления/стимуляции жизнедеятельности микроорганизмов (клеток) и для модификации биологических структур. В случае вакуумной импульсной эмиссии ионов/электронов, целью вв-экспериментов может быть поиск (например, среди твердых электролитов и суперионных проводников), материалов, перспективных для эмиттеров ионов/электронов.

Генератор новой конструкции [1] отличается схемами ключа, образованного последовательным соединением N транзисторов ($T_k, k=1, \dots, N$), и, сопряженного с ключом регулируемого вв-источника, создающего несколько постоянных вв-эдс. Транзисторы T_k питаются от эдс E_k ($E_i/E_j = \text{const} (i, j); i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, N$) через индивидуальные нагрузки R_k . В отличие от генераторов-аналогов, (I) в предложенном генераторе для выравнивания напряжений U_k на T_k не нужны резистивные делители и снабберы; (II) ΣU_k может быть $\approx \Sigma U_{k, \text{MAX}}$; (III) могут использоваться транзисторы с разными максимальными рабочими напряжениями ($U_{i, \text{MAX}} \neq U_{j, \text{MAX}}$); (IV) наладка прибора проста, а значительное улучшение балансировки напряжений на транзисторах позволяет беспрепятственно наращивать импульсы вв-напряжения путем увеличения числа транзисторов. Минимальная длительность П-импульсов определяется характеристиками вв-транзисторов. Впервые в генераторе использованы вв-транзисторы разных типов с $U_{\text{MAX}} = 4500$ В. Как результат: легкость постановки вв-экспериментов, что способствует поиску новых путей выполнения НИР. Предложенное техническое решение может быть воспроизведено во многих научных лабораториях. На рис.1 показаны осциллограммы напряжений для генератора с двумя последовательно соединенными MOSFET (T_1 : IXTL2N450, $U_{1\text{MAX}} = 4.5$ кВ, T_1 питается через нагрузку $R_1 = 220$ Ом; T_2 : IXTH1N450HV, $U_{2\text{MAX}} = 4.5$ кВ, T_2 питается через нагрузку $R_2 = 1.2$ кОм) при $E_2/E_1 = 2$.

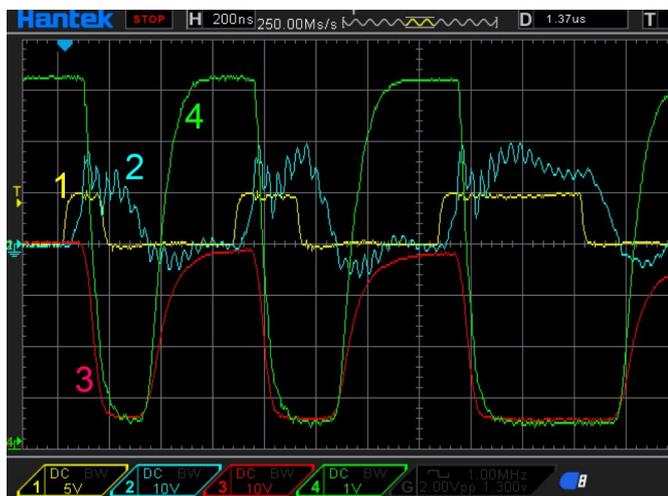


Рис. 1. Осциллограммы напряжений. 1 - три импульса разной длительности на входе драйвера FAN3122, который управляет затвором T_1 ; 2 - импульс на затворе T_1 ; 3 - вв-импульс на стоке T_1 , в состоянии OFF эдс $E_1 = 4.0$ кВ, регистрация импульсов вв-напряжения пробником (100:1); 4 - вв-импульс на стоке T_2 , в состоянии OFF эдс $E_2 = 7.3$ кВ, регистрация импульсов вв-напряжения пробником (1000:1). Скорость развертки по горизонтали 200 нс/дел, масштаб по вертикали 1 кВ/дел.

Список литературы

[1] А.Л.Деспотули, В.В.Казьмирук, А.А.Деспотули, А.В.Андреева // ПТЭ, 2023, в печати.

Наблюдение углового сдвига Гуса-Хенкен в субволновых дифракционных решетках

главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., Петров Н.И.¹ (SPIN: 1910-1133)

ведущий инженер, к.ф.-м.н., Соколов Ю.М.¹ (SPIN: 9923-7521)

ведущий инженер, Стоякин В.В.¹

научный сотрудник, Данилов В.А.¹ (SPIN: 4727-8626)

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Попов В.В.²

старший научный сотрудник, Усиевич Б.А.³ (SPIN: 5622-0561)

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

²Московский государственный университет "МГУ", Москва

³Институт общей физики "ИОФАН", Москва

petrov.ni@ntcup.ru

Аннотация: Проведено теоретическое и экспериментальное исследование углового сдвига Гуса-Хенкен при возбуждении поверхностного плазмонного резонанса в металлических субволновых решетках из никеля, серебра и золота. Продемонстрировано усиление углового сдвига отраженного пучка вблизи поверхностного плазмонного резонанса (ППР). Установлено, что существует оптимальная глубина решетки, при которой угловой сдвиг принимает максимальное значение.

Ключевые слова: субволновая дифракционная решетка, эффект Гуса-Хенкен, угловой сдвиг Гуса-Хенкен.

Введение

Продольные смещения отраженного пучка на границе раздела двух сред относительно падающего представляют собой хорошо известный сдвиг Гуса-Хенкен (ГХ) в плоскости падения [1, 2]. Заметное увеличение углового смещения можно наблюдать для сильно сфокусированного пучка, отраженного диэлектрической границей раздела вблизи угла Брюстера [3]. В [4] исследовано смещение центра тяжести сагиттальных лучей, распространяющихся в градиентном световоде. Угловой сдвиг ГХ был исследован в работе [5]. В [6, 7] показано усиление продольного и углового сдвигов ГХ вблизи плазмонного резонанса в субволновой дифракционной решетке.

В настоящей работе мы исследуем влияние глубины субволновой дифракционной решетки на угловой сдвиг ГХ при возбуждении поверхностного плазмонного резонанса.

1. Расчет сдвига Гуса-Хенкен

На рис. 1 показаны рассчитанные пространственные профили интенсивности в зависимости от поперечной координаты x для различных углов падения на расстоянии $z = 11$ см от поверхности никелевой решетки с периодом $\Lambda = 400$ нм и глубиной $h = 80$ нм.

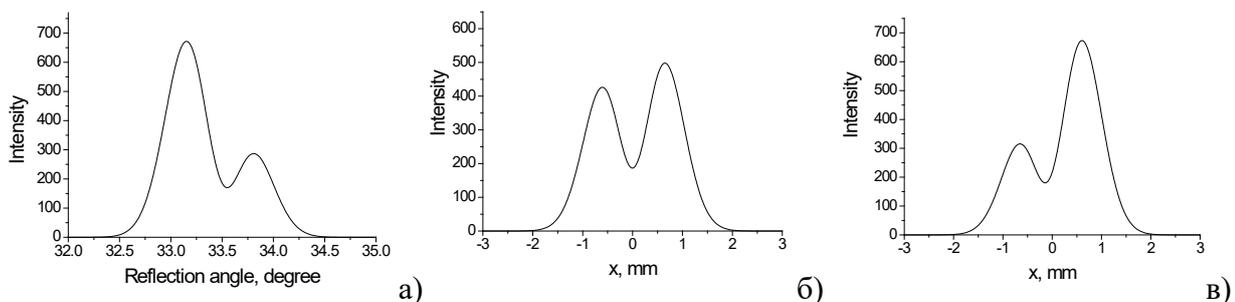


Рис. 1. Зависимости интенсивности отраженного пучка от координаты в поперечном направлении: (а) $\theta_i = 33,43^\circ$; (б) $\theta_i = 33,53^\circ$; (в) $\theta_i = 33,59^\circ$.

На рис. 2 представлены рассчитанные и измеренные значения отраженной интенсивности пучка от золотой решетки с периодом 500 нм и глубиной 80 нм.

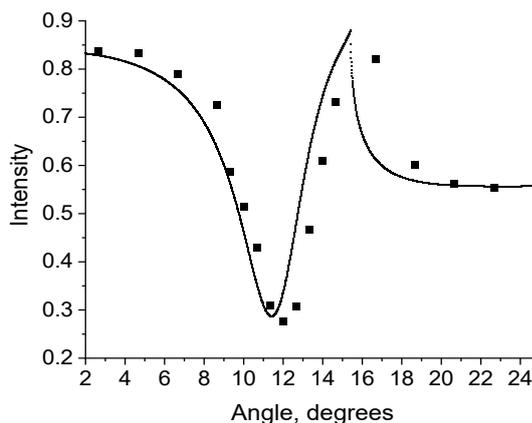


Рис. 2. Зависимости интенсивности отраженного пучка от угла падения: теория – сплошная кривая; квадраты – эксперимент.

Видно, что эксперименты показывают хорошее согласие с расчетами. Наличие небольшого сдвига измеренных значений вправо от расчетной кривой обусловлено точностью определения начального угла падения лазерного пучка.

2. Измерение углового сдвига Гуса-Хенкен

На рис. 3 представлены измеренные профили отраженной интенсивности для различных углов падения на расстоянии $z = 11$ см от поверхности никелевой решетки с периодом $\Lambda = 400$ нм и глубиной $h = 80$ нм. Падающее излучение с длиной волны $\lambda = 632.8$ нм имеет пятно фокусировки на решетке с радиусом $w = 16$ мкм. Из измерений следует, что разделение на два пучка происходит для сфокусированного пучка, падающего под углом ППР.

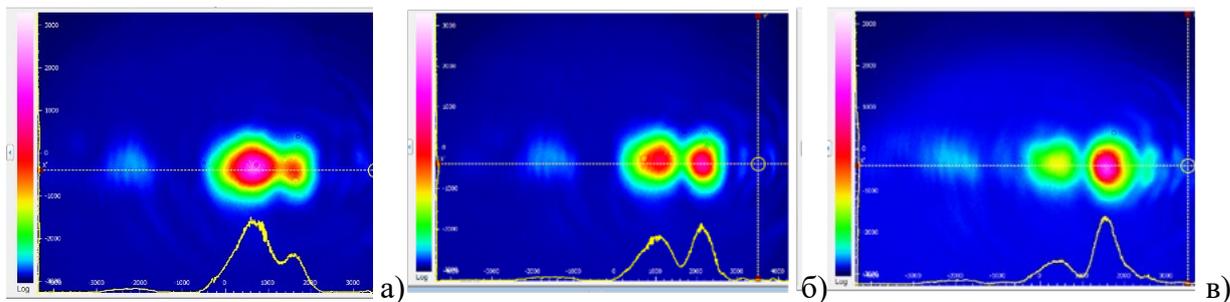


Рис. 3. Профили интенсивностей отраженного пучка от поверхности решетки. Углы падения пучка: (а) $\theta_i = 33,43^\circ$; (б) $\theta_i = 33,53^\circ$; (в) $\theta_i = 33,59^\circ$.

Видно, что численные расчеты профилей пучков для различных углов падения демонстрируют очень хорошее согласие с экспериментом.

Выводы

Продемонстрирована высокая чувствительность сдвига ГХ и изменения формы пучка к углу падения светового пучка вблизи поверхностного плазмонного резонанса. Аномально большие отрицательные и положительные угловые сдвиги ГХ, усиленные поверхностным плазмонным резонансом, обнаружены для отраженного пучка от решетки с оптимальной глубиной. Показано, что отраженный пучок распадается на два разделенных под углом пучка с большими отрицательным и положительным угловыми сдвигами. Угловое

расстояние между пиками интенсивности увеличивается с уменьшением ширины падающего пучка. Эффект расщепления пучка при изменении угла падения за пределами области поверхностного плазмонного резонанса отсутствует.

Результаты могут быть полезны при разработке различных датчиков, оптических переключателей, а также в угловой метрологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2022-0009.

Список литературы

1. Goos F. and Hanchen H. Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Total reflexion // *Annalen der Physik*. Vol. 436. 1947. P. 333-346.
2. Tamir T. and Bertoni H.L. Lateral displacement of optical beams at multilayered and periodic structures // *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 61. 1971. P. 1397- 1413.
3. Petrov N.I. Reflection and transmission of strongly focused light beams at a dielectric interface // *J. Mod. Opt.* Vol. 52. 2005. P.1545-1556.
4. Petrov N.I. Beam shift in a graded-index optical fiber // *J. Opt.* Vol. 15. 2013. P. 014011.
5. Merano M., Aiello A., van Exter M.P., and Woerdman J.P. Observing angular deviations in the specular reflection of a light beam // *Nature Photon.* Vol. 3. 2009. P. 337-340.
6. Petrov N.I., Danilov V.A., Popov V.V., and Usievich B.A. Large positive and negative Goos-Hänchen shifts near the surface plasmon resonance in subwavelength grating // *Opt. Express*. Vol. 28. 2020. P. 7552-7564.
7. Petrov N.I., Sokolov Y.M., Stoiakin V.V., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. Observation of Giant Angular Goos-Hanchen Shifts Enhanced by Surface Plasmon Resonance in Subwavelength Grating // *Photonics*. Vol. 10. 2023. P. 180.

Observation of the angular Goos-Hanchen shift in subwavelength diffraction gratings

Chief Researcher, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Petrov N.I.¹ (SPIN: 1910-1133)

Principal Engineer, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Sokolov Yu.M.¹ (SPIN: 9923-7521)

Principal Engineer, Stoiakin V.V.¹

Scientific Researcher, Danilov V.A.¹ (SPIN: 4727-8626)

Senior Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Popov V.V.²

Senior Researcher, Usievich B.A.³ (SPIN: 5622-0561)

¹Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

²Moscow State University, Moscow

³General Physics Institute, Moscow

petrov.ni@ntcup.ru

Abstract: A theoretical and experimental study of the Goos-Hanchen angular shift during the excitation of surface plasmon resonance in metal subwavelength gratings made of nickel, silver and gold has been carried out. The amplification of the angular shift of the reflected beam near the surface plasmon resonance (SPR) is demonstrated. It is established that there is an optimal grating depth at which the angular shift takes the maximum value.

Keywords: subwavelength diffraction grating, effect of Goos-Hanchen shift, angular Goos-Hanchen shift.

Лазерные рефрактографические измерительные системы для диагностики оптически неоднородных жидких сред

научный сотрудник, Ведяшкина А.В.¹ (SPIN: 5489-8081)

доцент, к.т.н., Павлов И.Н.² (SPIN: 6753-5073)

доцент, д.т.н., Расковская И.Л.² (SPIN: 6069-5541)

¹АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», Москва

²Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва

pavloviln@mpei.ru

Аннотация: В работе описан новый метод диагностики оптически неоднородных жидких прозрачных сред – лазерная рефрактография. Представлены схемы экспериментальных установок, позволяющих реализовать данный метод при исследовании неоднородностей температуры и плотности, а также рельефа поверхности прозрачных сред.

Ключевые слова: рефракция, структурированное лазерное излучение, оптические неоднородности.

Введение

Лазерные методы активно используются в последние годы для диагностики полей акустического давления, температур, плотности, скоростей потоков в прозрачных средах [1-10]. Существенный интерес представляет исследование процессов тепло- и массообмена, таких как нагревание или охлаждение объектов, диффузия жидкостей и др. С развитием методов цифровой регистрации изображений и их компьютерной обработки значительно расширяются возможности применения лазерных методов диагностики, которые позволяют производить дистанционное наблюдение и количественное измерение динамически меняющихся характеристик среды. Также в ряде практических приложений необходимо обеспечение высокочувствительной качественной диагностики с целью понимания физических процессов, происходящих в исследуемых жидких средах. Одним из методов, решающих указанные задачи, является метод лазерной рефрактографии.

1. Метод лазерной рефрактографии

Лазерная рефрактография – это новая информационно-измерительная технология, предназначенная для визуальной и количественной диагностики процессов в объеме и пограничных слоях жидкостей [11]. В ней для зондирования исследуемой среды используется структурированное лазерное излучение (СЛИ), которое представляет собой лазерные пучки с пространственной модуляцией интенсивности, что позволяет получать рефракционные изображения с дискретной контурной структурой (рефрактограммы). СЛИ чаще всего создается с помощью дифракционных оптических элементов. Таким образом можно получать разнообразные конфигурации пространственного распределения интенсивности, такие как линия, крест, набор параллельных линий, концентрические кольца, матрица точек и т.д. Конкретный вид СЛИ подбирается в зависимости от параметров решаемой задачи. Образующие после прохождения через неоднородную среду двумерные и трехмерные рефрактограммы регистрируются с помощью цифровых камер, а затем обрабатываются на компьютере с целью получения посредством косвенных измерений количественных данных о распределении интересующего параметра, например, температуры, солености или концентрации раствора. При наличии параметрической модели неоднородности на ее основе могут быть получены расчетные рефрактограммы, сравнение которых с экспериментальными позволяет осуществить оптимальный выбор параметров модели среды, которые подбираются таким образом, чтобы расчетная рефрактограмма наилучшим образом соответствовала экспериментально полученной.

2. Схема экспериментальной установки

Обобщенная схема экспериментальной установки, реализующей метод лазерной рефрактографии, показана на рис. 1 [11].

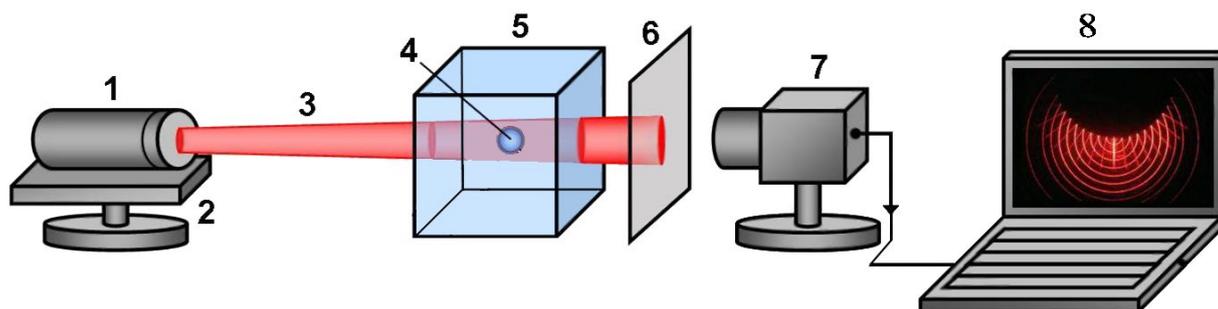
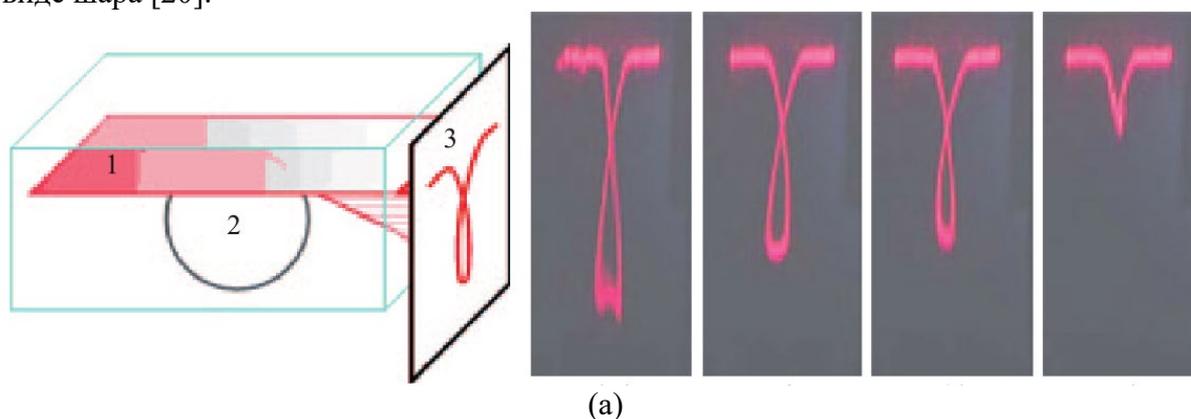


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для реализации метода лазерной рефрактографии: 1 – оптическая система формирования СЛИ, 2 – система юстировки, 3 – СЛИ, 4 – исследуемая неоднородность, 5 – кювета, 6 – экран, 7 – цифровая камера, 8 – компьютер.

Она состоит из оптической системы формирования СЛИ 1 (обычно это лазер с дифракционным элементом и коллимирующей линзой), системы юстировки 2, стеклянной кюветы 5 с исследуемой жидкой средой с неоднородностью 4, бумажного экрана 6 в случае регистрации двумерных рефрактограмм, цифровой камеры 7 для записи и компьютера 8 для хранения и обработки полученных изображений. В разных модификациях метода лазерной рефрактографии схема установки может иметь некоторые изменения. Например, если требуется зарегистрировать трехмерную рефрактограмму [12], то вместо экрана 6 используется вторая кювета с рассеивающей средой (коллоидным раствором полистирола), либо экран и камера фиксируются на основании, которое может перемещаться относительно кюветы с неоднородной жидкостью и записываются двумерные рефрактограммы на разных расстояниях, которые затем на компьютере объединяются в трехмерную рефрактограмму [13]. В случае исследования каустик СЛИ, что может давать дополнительную информацию о параметрах неоднородности, камера ставится сбоку от кюветы с исследуемой средой и регистрируется распределение интенсивности СЛИ внутри кюветы [14].

3. Примеры исследуемых объектов

С помощью описанного метода были успешно исследованы такие объекты, как горячий шар в холодной воде [15], холодный шар в горячей воде [16], нагретые тела различных конфигураций [17], диффузионный слой между двумя жидкостями [18], неоднородно нагретое твердое прозрачное тело [19] и некоторые другие. На рис. 2 показаны примеры полученных двумерных рефрактограмм при исследовании температурной неоднородности в виде шара [20].



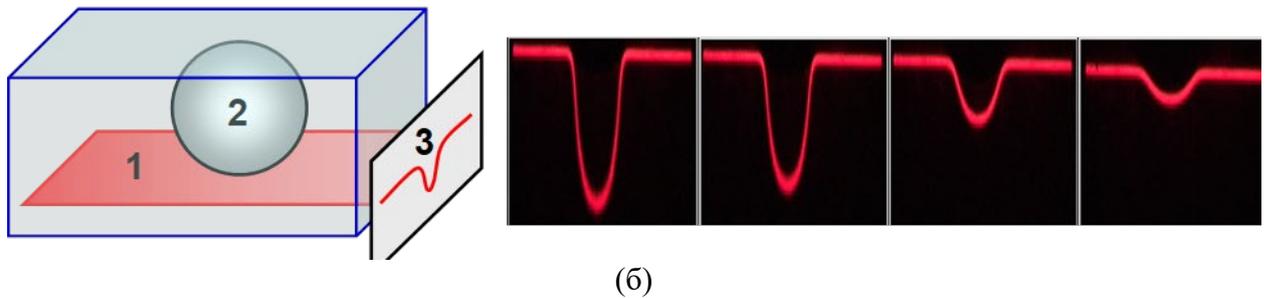


Рис. 2. Двумерные рефрактограммы при исследовании сферической температурной неоднородности в виде холодного шара (а) и горячего шара (б): 1 – плоский лазерный пучок, 2 – исследуемый шар, 3 – рефрактограмма на экране.

Слева показана схема зондирования среды, а справа набор полученных в экспериментах рефрактограмм при уменьшении разности температур между исследуемым объектом и окружающей жидкостью.

Выводы

С помощью описанной информационно-измерительной технологии возможно исследовать и проводить количественную диагностику оптически неоднородных жидких сред. Преимуществами разработанной технологии является простота реализации, наглядность полученных результатов, хорошая чувствительность и разрешающая способность, возможность дистанционного неразрушающего контроля исследуемых сред, а также возможность проводить измерения при больших градиентах температур и концентраций в условиях существенной рефракции.

Список литературы

1. Panigrahi, P. K., Muralidhar, K. Visualization of Convective Heat Transfer. Handbook of Thermal Science and Engineering, 2018, P. 759–803.
2. Tanda G., Fossa M., Misale M. Heat transfer measurements in water using a schlieren technique. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014, Vol.71, Pp. 451–458.
3. Cerisier P., Sylvain J., Dauby P. Application of the laser beam deflection to the study of temperature fields in Rayleigh-Benard convection. Experiments in Fluids, 2002, vol. 33, no. 3, pp. 391–397.
4. Znamenskaya I., Koroteeva E., Shagiyanova A. Thermographic analysis of turbulent non-isothermal water boundary layer. Journal of Flow Visualization and Image Processing. 2019, Vol. 26, Pp. 49–56.
5. Yesin M.V., Evtikhieva O.A., Orlov S.V., Rinkevichius B.S., Tolkachev A.V. Laser refractometral method for visualization of liquid mixing in twisted flows. CD Rom Proceedings. 10th International Symposium on Flow Visualization. (Kyoto, August 26-29, 2002). Paper No. F037. P.1-8.
6. Ринкевичюс Б.С. Лазерная доплеровская анемометрия. – Москва: Русайнс, 2019, 160 с.
7. Albrecht H.E., Borys M., Damashke N., Tropea C. Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques. – Berlin: Springer, 2003, 738 p.
8. Corvaro F., Paroncini M., Sotte M. Experimental PIV and interferometric analysis of natural convection in a square enclosure with partially active hot and cold walls. International Journal of Thermal Sciences. Sci. 2011, Vol.50, no. 9, Pp.1629–1638.
9. Svetov I. E., Derevtsov E. Yu., Volkov Yu. S., Schuster T. A numerical solver based on B-splines for 2D vector field tomography in a refracting medium. Math. Comput. Simulation, 2014, Vol.97, Pp.207–223.
10. Crickmore R.I., Jack S.H., Hann D.B., Greated C.A. Laser Doppler anemometry and the acousto-optic effect. Optics and laser technology. 1999, Vol. 31, Pp. 85 – 94.

11. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.
12. Ринкевичюс Б.С., Ведяшкина А.В., Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Визуализация динамических тепловых процессов в прозрачных средах с помощью структурированного лазерного излучения // Научная визуализация, 2016, Т. 8, № 4, С. 50.
13. Ринкевичюс Б.С., Сапронов М.В., Павлов И.Н. Исследование рефракции цилиндрического лазерного пучка в стратифицированной жидкости // Оптика и спектроскопия, 2016, Т. 121, № 3, С. 480-484.
14. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S., Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Tolkachev A.V. Optical-electronic complex for investigation of the processes of heat and mass transfer by laser contactless method // Scientific Visualization, 2019, Vol. 11, No 3, p. 43-53.
15. Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Tolkachev A.V., Vedyashkina A.V. Structured laser radiation in optical inhomogeneous media refractography // Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2015, p`. 2660-2664.
16. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S. Investigation of heat and mass transfer processes by the method of structured laser radiation caustics // Journal of Physics: Conference Series, 2017, Paper 012097.
17. Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Юркевичюс С.П. Лазерная рефрактография - новая технология рефрактометрии жидких сред // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2019. № 3 (28). С. 157-166.
18. Ведяшкина А.В., Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Визуализация каустик лазерного излучения в жидких средах в условиях сильной рефракции // Научная визуализация, 2017, Т. 9, № 3, С. 60-69.
19. Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Laser refraction thermometry of transparent solids with inhomogeneous heating // Measurement Techniques, 2017, Vol. 59. No 10. p. 1084-1087.
20. Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Лазерная рефрактография оптически неоднородных сред // Квантовая электроника, 2007, Т. 37, № 12, С. 1176-1180.

Laser refractographic measurement systems for diagnostics of optically inhomogeneous liquid media

Researcher, Vedyashkina A.V.¹ (SPIN: 5489-8081),

Assistant Professor, Ph.D. of Technical Sciences, Pavlov I.N.² (SPIN: 6753-5073),

Assistant Professor, Doctor of Engineering degree, Raskovskaya I.L.² (SPIN: 6069-5541)

¹JSC “Special Research Bureau of Moscow Power Engineering Institute”, Moscow

²National Research University “MPEI”, Moscow

pavloviln@mpei.ru

Abstract: The new technique for diagnostics of optically inhomogeneous transparent liquid media which is named laser refractography is described. Besides, the scheme of experimental setup is presented, with help of which this technique can be used to study temperature, concentration and phase inhomogeneities.

Keywords: refraction, structured laser radiation, optical inhomogeneities.

Вычислительная микроскопия в биологии и медицине

ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., Коваленко И.Б.^{1,2} (SPIN: 3254-5977)

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

² Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
ikovalenko78@gmail.com

По выражению одного из пионеров применения метода молекулярной динамики в биологии, профессора К.Шультена, этот метод является «вычислительным микроскопом», позволяющим увидеть внутреннюю жизнь макромолекул, что недоступно никаким другим средствам наблюдения. В работе обсуждаются методы молекулярной и броуновской динамики в применении к белок-белковым взаимодействиям и взаимодействию антимикробных веществ с мембранами бактерий и вирусов, а также динамика микротрубочек. Приведены тесты производительности вычислительных ресурсов с различной архитектурой в задачах молекулярной динамики.

Ключевые слова: молекулярная динамика, суперкомпьютер, белок-белковые взаимодействия.

Образование белкового комплекса — это сложный многостадийный процесс, требующий учета множества физико-химических факторов. Нами разработан оригинальный подход, позволяющий, благодаря совместному использованию методов броуновской и молекулярной динамики, предсказать структуру образовавшегося комплекса и молекулярные механизмы, приведшие к его образованию. Данный подход позволил выявить роль электростатических и гидрофобных взаимодействий в образовании комплекса белков пластоцианина и цитохрома *f* в цианобактериях, зеленых водорослях и высших растениях, и показать, что их роль в формировании комплекса меняется вместе с эволюционными изменениями в белковых последовательностях.

Изучение механизмов действия таких широко применяемых антисептиков, как мирамистин, хлоргексидин, октенидин и других на бактерии стало возможным благодаря использованию молекулярного моделирования и высокопроизводительных вычислений. Выявлены молекулярные механизмы действия данных антисептиков с применением крупнозернистой молекулярной динамики. Изучены механизмы действия фотосенсибилизаторов (фталоцианин цинка, метиленовый синий) на внешние мембраны бактерий и вирусов. Рассмотрено взаимодействие фотосенсибилизаторов с поверхностью вириона SARS-CoV-2. Рассмотрено поведение отдельных тубулиновых протофиламентов и неструктурированных хвостов тубулина с целью изучения явления динамической нестабильности микротрубочек и роли "тубулинового кода" в регуляции динамики микротрубочек.

Список литературы

1. V. A. Fedorov, I. B. Kovalenko et al. Comparative analysis of plastocyanin-cytochrome *f* complex formation in higher plants, green algae and cyanobacteria // *Physiologia Plantarum*. V. 166, No. 1. 2019. P. 320-335.
2. E. G. Kholina, I. B. Kovalenko et al. Cationic antiseptics facilitate pore formation in model bacterial membranes // *Journal of Physical Chemistry B*. Vol. 124, no. 39. 2020 P. 8593–8600.
3. E.G. Kholina, I.B. Kovalenko et al. Insights into the formation of intermolecular complexes of fluorescent probe 10-n-nonyl acridine orange with cardiolipin and phosphatidylglycerol in bacterial plasma membrane by molecular modeling // *Molecules*. Vol. 28, no. 4. 2023. P. 1929.

Computational microscopy in biology and health science

Leading Researcher, Ph.D., Dr. of Sciences, Kovalenko I.B.^{1,2} (SPIN: 3254-5977),

¹Moscow Lomonosov State University, Moscow

² Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
ikovalenko78@gmail.com

In the words of one of the pioneers of the application of the molecular dynamics method in biology, Professor K. Schulten, this method is a "computational microscope" that allows you to see the inner life of macromolecules, which is not available to any other means of observation. We discuss the methods of molecular and Brownian dynamics applied to protein-protein interactions, the interaction of antimicrobial substances with bacterial and viral membranes, as well as the dynamics of microtubules. We also present performance tests of computing resources with different architectures in molecular dynamics.

Keywords: molecular dynamics, supercomputer, protein-protein interaction.

Углочастотная характеристика акустооптического дефлектора, использующего секционированный излучатель ультразвука

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Никитин П.А. (SPIN: 8553-3035)

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
nikitin.pavel.a@gmail.com

Аннотация: В работе рассмотрена проблема определения рабочей точки акустооптического ячейки с секционированным излучателем ультразвука для использования её в качестве дефлектора излучения. Получена в аналитической форме углочастотная характеристика, а также оптимальный угол падения излучения и центральная частота дефлектора.

Ключевые слова: дефлектор, акустооптика, дифракция, секционированный излучатель.

Введение

В последнее время активно исследуется возможность использования секционирования излучателя ультразвука для улучшения характеристик акустооптических (АО) устройств [1]. В данной работе сделан акцент на разработку АО дефлектора на основе оптически изотропной среды. Расчёты выполнены для излучателя с $m=4$ секциями.

1. Модель акустооптического взаимодействия

Выражение для эффективности ξ дифракции приведено в работе [2], а оценочные выражения для оптимального угла θ_i падения излучения на ультразвуковой столб и для центральной частоты ультразвука F_d получены в работе [3]:

$$\theta_i = \sqrt{m \frac{\lambda}{nL}}; \quad F_d = V \sqrt{m \frac{n}{\lambda L}}. \quad (1)$$

Для удобства были введены следующие безразмерные параметры:

$$\varphi = \frac{\theta}{\theta_i}; \quad f = \frac{F}{F_d}. \quad (2)$$

Можно заметить, что при $\theta \ll 1$ выражение для эффективности дифракции зависит лишь от комбинации:

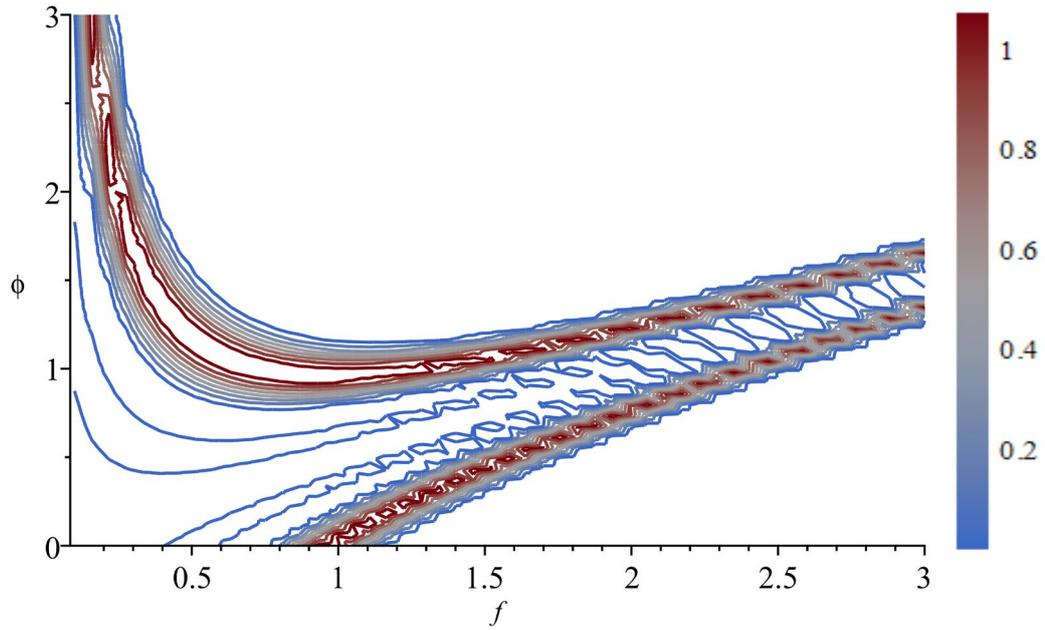
$$x = f(f - 2\varphi), \quad (3)$$

т.е. сводится к функции одной переменной $\xi = \xi(x)$. Это позволяет определить оптимальное значение x_{opt} , при котором достигается максимальная эффективность АО дифракции.

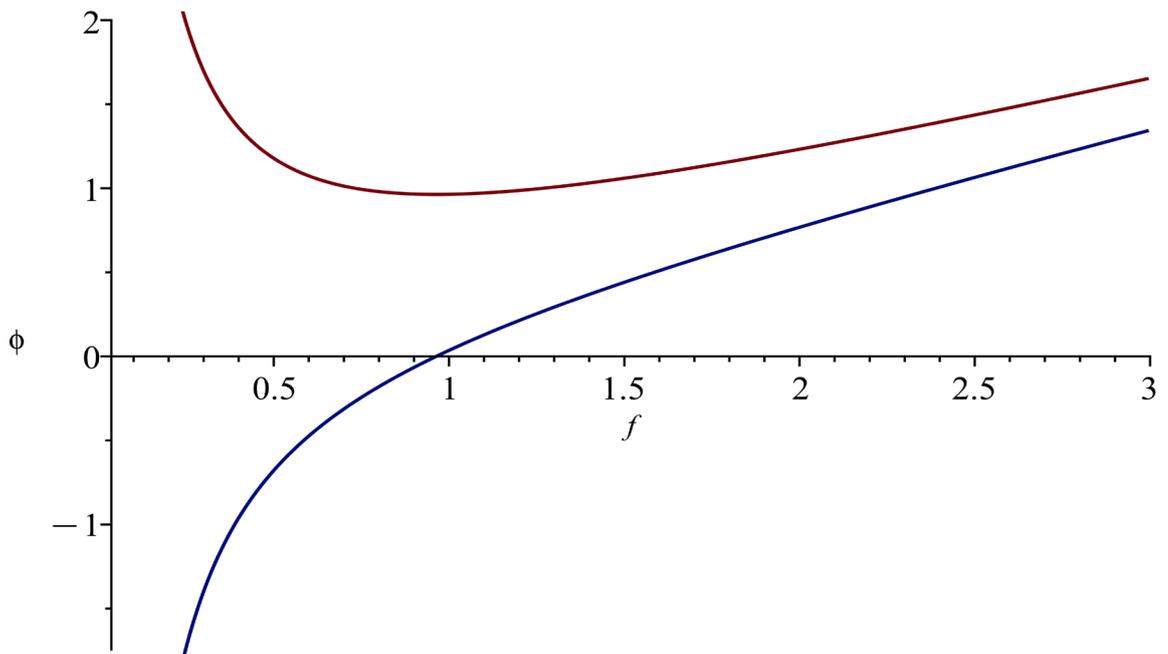
Для АО дефлектора с излучателем ультразвука, электрод которого разделён на $m=4$ секции, была сделана оценка влияния зазора между секциями. Поскольку $\xi(x)$ является чётной функцией, то мы приведём лишь выражение для x_{opt} , близкое к -1 :

$$x_{\text{opt}} = -1 + 0.0719C_D^2, \quad (4)$$

где коэффициент C_D равен отношению длины электрода одной секции к длине всей секции.



(a)



(б)

Рис. 1. Акустооптический дефлектор ($m=4$, $C_D=1$): (а) зависимость эффективности дифракции от угла и частоты; (б) углочастотная характеристика.

2. Результаты

На рис. 1 приведена зависимость $\xi(\varphi, f)$, рассчитанная по формулам из [2], а также полученные нами зависимости $\varphi(f)$ для двух значений $x=x_{\text{opt}}$ (красная кривая) и $x=-x_{\text{opt}}$ (синяя кривая):

$$\varphi(f) = \frac{f^2 - x}{2f} \Big|_{x=\pm x_{\text{opt}}} . \quad (5)$$

Непосредственно из (5) получены следующие выражения для центральной частоты f_d и оптимального угла падения излучения φ_i :

$$f_d = \sqrt{-x_{\text{opt}}}; \quad \varphi_i = \sqrt{-x_{\text{opt}}} . \quad (6)$$

Выводы

В работе получены уточнённые соотношения для центральной частоты АО дефлектора на основе оптически изотропной среды и для оптимального угла падения излучения, учитывающие влияние зазора между секциями излучателя ультразвука. Также выведено уравнение для углочастотной характеристики такого дефлектора. Полученные соотношения могут быть использованы при проектировании АО дефлекторов, использующих секционированный излучатель ультразвука.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFNS-2022-0009).

Список литературы

1. Balakshy. V., Kupreychik M., Mantsevich S., Molchanov V. Acousto-optic cells with phased-array transducers and their application in systems of optical information processing // Materials. V. 14. 2021. Art.n. 451.
2. Gordon E. I. A review of acoustooptical deflection and modulation devices // Proc. of the IEEE. V. 54. № 10. 1966. Pp. 1391-1401.
3. Никитин П. А. Моделирование работы акустооптического дефлектора терагерцевого излучения, использующего секционированный излучатель ультразвука // Оптический журнал. Т. 90. № 2. 2023. С. 59–67

Angle-frequency relationship of an acousto-optic deflector using a sectioned ultrasonic transducer

Senior Researcher, Ph.D. of Physico-Mathematical Sciences, Nikitin P.A. (SPIN: 8553-3035)

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
nikitin.pavel.a@gmail.com

The paper considers the problem of determining the operating point of an acousto-optic cell with a sectioned ultrasonic transducer for its use as a radiation deflector. The angle-frequency relationship, as well as the optimum angle of incidence of radiation and the central frequency of the deflector are obtained in analytical form.

Keywords: deflector, acousto-optics, diffraction, sectioned transducer

Контроль напыления ультратонких диэлектрических пленок с помощью трехволновой микроскопии поверхностного плазмонного резонанса

аспирант 3-го года обучения А.В. Анисимов
научный руководитель: к.ф.-м.н., И.Ш. Хасанов

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
Бутлерова 15, Москва, Россия
anisimov.av@ntcup.ru, khasanov@ntcup.ru

Аннотация: В статье представлен метод контроля толщины диэлектрической пленки при вакуумном напылении. Контроль осуществляется с помощью углового сканирования коэффициента отражения при наблюдении поверхностного плазмонного резонанса на трех различных длинах волн с помощью RGB-камеры. Наблюдаемые смещения положений минимумов отражения при росте толщины диэлектрического слоя позволяют проводить контроль в реальном времени.

Ключевые слова: поверхностный плазмонный резонанс, плазмоника, тонкие пленки, напыление.

Введение

В настоящее время для контроля толщины напыляемого слоя в реальном времени используются спектрофотометрические методы. Эти методы не обладают достаточной чувствительностью для определения толщины диэлектрических пленок, значительно меньшей, чем длина волны падающего излучения. Зондирование методом поверхностного плазмонного резонанса (ППР) является одним из наиболее чувствительных методов оптической характеристики и неразрушающего контроля для пленок субволновой толщины [1, 2]. Метод основан на возбуждении поверхностных-плазмон поляритонов (ППП), которые являются частным случаем поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ). Напряженность поля ПЭВ экспоненциально возрастает при приближении к границе раздела металл-диэлектрик, что обуславливает высокую чувствительность метода к слоям вещества, прилежащим к поверхности возбуждения ПЭВ, за счёт сильного взаимодействия излучения с веществом [3]. Глубина проникновения поля ПЭВ нелинейно зависит от длины волны, что позволяет извлекать дополнительную полезную информацию из резонансных кривых, измеренных на разных длинах волн, и дает возможность использовать плазмонную спектроскопию для определения оптических констант на глубине тонкого слоя. Предложенный метод контроля не требует использования спектрометра [4] и может быть полезен при производстве оптических покрытий: фильтров [5], металлических зеркал и зеркал с повышенной радиационной стойкостью.

1. Зависимость углового сдвига ППП от толщины напыления.

Волновой вектор поверхностного плазмон-поляритона (ППП), возбуждаемого на границе раздела металл-диэлектрик, определяется следующим уравнением [6]:

$$k_{0x} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon E}{\varepsilon + E}} \quad (1)$$

где ε и E — проницаемость металла и диэлектрика, соответственно. В дальнейшем будем считать, что осаждение происходит в вакууме и $E=1$. Когда между металлом и диэлектриком появляется тонкий слой какого-либо вещества, как показано на Рис.1, волновой вектор ППП изменяется следующим образом [7]:

$$k_x = \frac{\omega}{c} \left(\left(\frac{c \cdot k_{0x}}{\omega} \right)^2 + \Delta \right)^{1/2} \quad (2)$$

где

$$\Delta = -4\omega h \frac{(1-\eta)}{\eta\sqrt{-\varepsilon}} \quad (3)$$

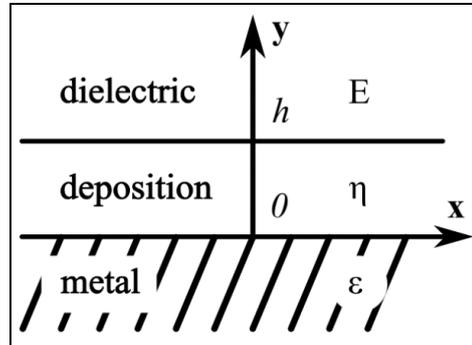


Рис. 1. Относительное расположение слоев, на границе раздела сред, на которой возбуждаются поверхностные плазмон-поляритоны, с указанием их диэлектрических постоянных.

Проекция волнового вектора излучения на ось x из геометрических соображений может быть записана следующим образом: $k_x = \omega/c \cdot \sqrt{\Sigma} \cdot \sin\theta$, где Σ — диэлектрическая проницаемость призмы, θ — угол падения излучения. Следовательно, используя (1) и (2), можно выразить угол возбуждения поверхностного плазмонного резонанса:

$$\theta = \arcsin \left(\frac{1}{\sqrt{\Sigma}} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon+1} + \Delta} \right) \quad (4)$$

После этого, разложив уравнение (4) в ряд Тейлора до 1-го члена вблизи точки $h = 0$, соответствующей началу процесса распыления, с учетом (3), легко получить формулу зависимости сдвига угла возбуждения поверхностного плазмона от толщины напыления:

$$d\theta = \frac{2(\varepsilon+1)(\eta-1)}{\varepsilon\eta\sqrt{\varepsilon-\Sigma^2(\varepsilon+1)}} \omega h$$

2. Проведение эксперимента.

Схема нашего эксперимента показана на рис. 2. Были проведены измерения на трёх длинах волн для красного лазера с $\lambda = 633$ нм и зеленого КТП лазера $\lambda = 532$ нм, который имеет дополнительную линию излучения, соответствующую накачке инфракрасного ИК диода на $\lambda = 803$ нм.

Эксперимент проводился на двух призмах из стекла ЛК-7 с $n = 1.480$, покрытых толстым слоем серебра, толщиной $h = 55$ нм. На одной призме было напыление SiO_2 с $n = 1.457$, вторая призма была без слоя SiO_2 . Толщина напыления на первой призме была заранее известна исходя из условий процесса напыления и равнялась $h \approx 9$ нм. На рис. 3 приведены примеры снимков, сделанных с камеры при фокусировке на основании призмы красного лазера (633 нм.) для схемы с чистой и осажденной призмой соответственно. Ниже выделен участок, соответствующий минимуму коэффициента отражения для расчета угла ППР. Красная кривая представляет собой аппроксимацию полиномом 4-й степени. 4-й порядок был выбран, чтобы учесть различный наклон графика резонансного провала, что позволяет с большой точностью вычислить положение резонансного минимума.

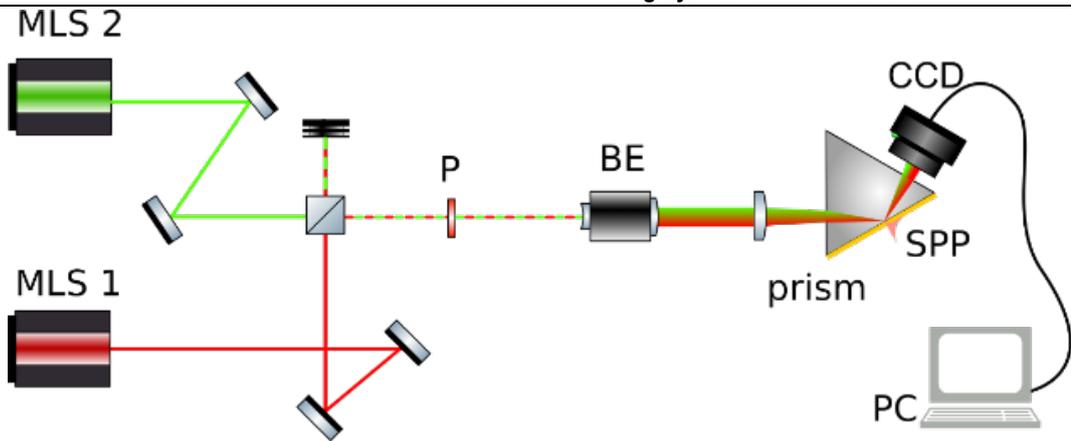


Рис. 2. Схема спектроскопии ППП (слева направо): MLS - (квази-) монохроматический источник света (например, гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения $\lambda = 633$ нм, КТП лазер ~ 532 нм + 803 нм), P - поляризатор видимого диапазона, BE - 8-кратный расширитель пучка, плосковыпуклая линза с фокусным расстоянием 50 мм, призма с напылением на вращающейся платформе, CCD - камера (Imaging Source DMK 23G445).

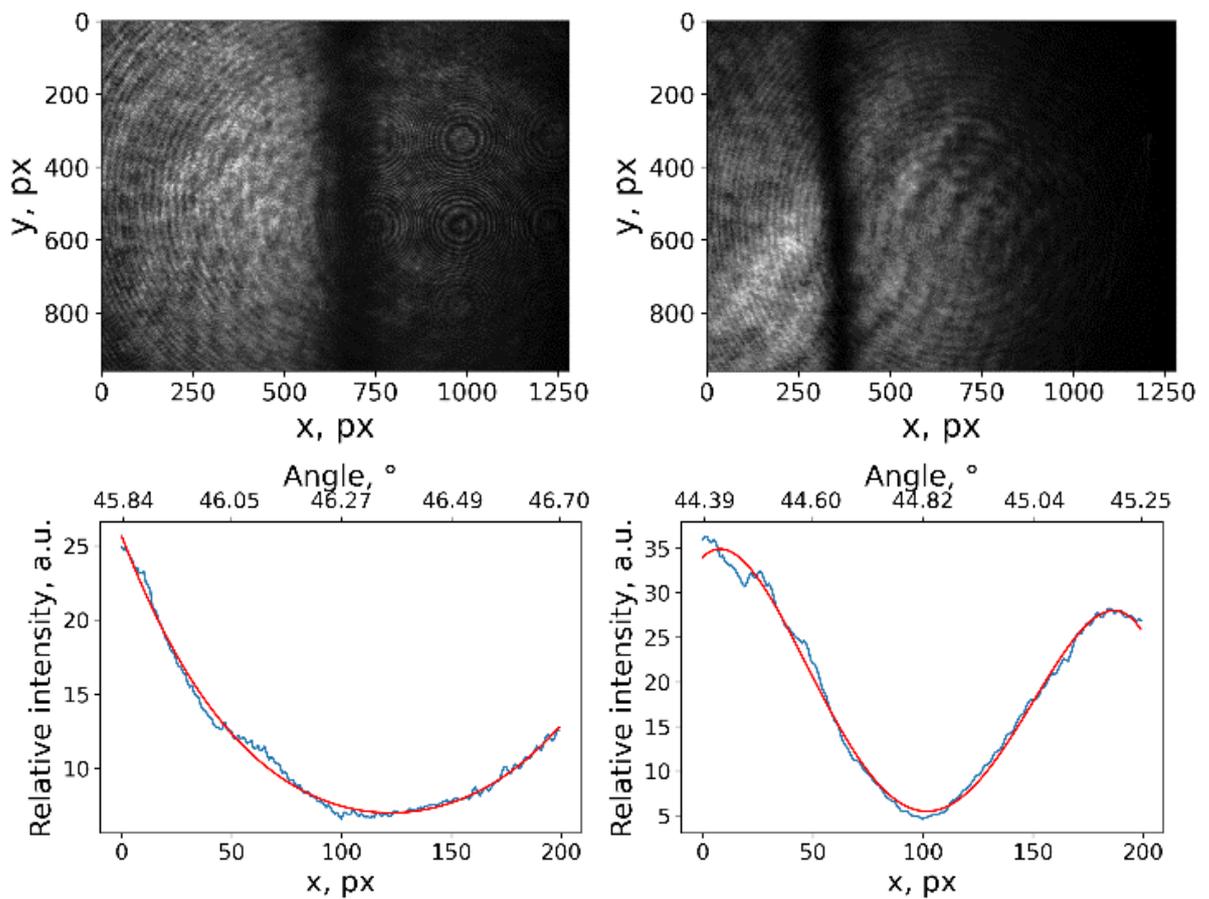


Рис. 3. Измеренные резонансные кривые для призмы без напыления и с напылением 9 нм.

Так как мы работаем с очень тонкими слоями, то погрешность в несколько нанометров может быть очень велика по относительной величине, для этого для исследований необходимо использовать от трёх разных длин волн для уточнения искомого значения и определения погрешности измерения. В эксперименте, описанном выше, были использованы три длины волны (633 нм, 532 нм и 803 нм), при этом вычисленное значение толщины напыления оказалось 9.8 нм с погрешностью 1.7 нм.

Выводы

Представленный метод может быть использован для расчета толщины осаждаемого слоя, если известны оптические параметры всех слоев в схеме. Используя изображения, полученные с камеры на трех длинах волн, можно определить толщину осаждаемого слоя. Поскольку метод не требует сложных вычислений, его можно использовать для измерения толщины осаждаемого слоя в реальном времени, во время процесса осаждения.

Используя большее число длин волн, возможно дополнительно повысить точность измерений. Однако измерения, проведенные с помощью трех длин волн, позволяют определять толщину тонких покрытий с разумной погрешностью, величина которой сравнима со средней шероховатостью покрытия.

Список литературы

1. Y. W. Fen and W. M. Mat Yunus, "Optical characterization of multilayer thin films using surface plasmon resonance method: From electromagnetic theory to sensor application," AIP Conference Proceedings, vol. 1482, no. 1, pp. 132–135, Sep. 2012, DOI: 10.1063/1.4757452.
2. A. K. Nikitin, V. V. Gerasimov, B. A. Knyazev, and I. Sh. Khasanov, "Development of the surface plasmon-polaritons absorption spectrometry method in the terahertz range," NAUCHNOE PRIBOROSTROENIE, vol. 28, no. 4, pp. 30–38, Dec. 2018, doi: 10.18358/np-28-4-i3038.
3. V. M. Agranovich, Surface Polaritons: Electromagnetic Waves at Surfaces and Interfaces. Elsevier, 2012.
4. A. V. Anisimov and I. S. Khasanov, "Algorithm for optical characterization of dielectric gradient index nanofilm by surface plasmon resonance spectroscopy," J. Phys.: Conf. Ser., vol. 2091, no. 1, p. 012067, Nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2091/1/012067.
5. A. Dobrowolski, S. Browning, M. Jacobson, and M. Nadal, "2007 Topical Meeting on Optical Interference Coatings: Manufacturing Problem," Appl. Opt., AO, vol. 47, no. 13, pp. C231–C245, May 2008, doi: 10.1364/AO.47.00C231.
6. V.V. Klimov, Nanoplasmonics, Phismatlit, 2009, 2010.
7. J. Bell, R.W. Alexander, Jr. C.A. Ward, I.L. Tyler, "Introductory theory for surface electromagnetic wave spectroscopy", Surface Science 48 (1975) pp 253-287.

Sputtering control of ultrathin dielectric films using three-wave surface plasmon resonance microscopy

PhD student of the 3rd year of study, Anisimov A.V.
supervisor: PhD. Khasanov I.Sh.

Scientific-technological center for unique instrumentation RAS, Butlerova 15, Moscow,
Russia

anisimov.av@ntcup.ru, khasanov@ntcup.ru

Abstract: The paper presents a method of controlling dielectric film thickness during ion-beam sputtering. Control is carried out by angular scanning of the reflection coefficient profile while observing surface plasmon resonance at three different wavelengths using an RGB camera. The observed shifts of the positions of the reflection minima at the appearance of a thin dielectric layer make it possible to determine its current thickness in real time.

Keywords: explosive plasmon resonance, plasmonics, film, sputtering.

Разработка акустооптического модулятора для инфракрасного диапазона с использованием жидкостей

аспирант, Утебаева З.Р.

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Никитин. П.А. (SPIN: 8553-3035)

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

utebaeva_1999@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена одна из основных задач современной оптоэлектроники разработка новых методов и технологий создания более эффективных и быстрых акустооптических модуляторов для инфракрасного диапазона.

Ключевые слова: оптоэлектроника, инфракрасное излучения, акустооптический эффект, оптические системы.

Введение

Существующие коммерческие акустооптические модуляторы для инфракрасного диапазона имеют некоторые недостатки, такие как низкая эффективность и ограниченная скорость модуляции. Одним из ключевых параметров акустооптических модуляторов является коэффициент акустооптического качества, который определяет эффективность устройства. Возможным способом повышения эффективности акустооптических модуляторов является использование жидкостей в качестве среды акустооптического взаимодействия. Отметим, что большое поглощение звука не позволяет использовать жидкие среды на частотах выше 50 МГц. Недостатком являются и такие характерные для жидких сред явления, как кавитация и конвекция. В настоящее время жидкости в акустооптических устройствах используются редко.

Однако жидкости характеризуются более высоким коэффициентом акустооптического качества. Это объясняется тем, что жидкости характеризуются большими значениями фотоупругой постоянной относительно кристаллических сред и прозрачны в сравнительно широком диапазоне длин волн. Благодаря этому акустооптические модуляторы на основе жидких сред обеспечивают более высокую эффективность дифракции на 1 Вт управляющей электрической мощности, чем традиционные модуляторы на кристаллах. Кроме того, акустооптические модуляторы на основе жидких сред имеют существенно более низкую себестоимость и могут быть легко интегрированы в оптические системы, а также они устойчивы к внешним воздействиям.

1. Акустооптическое взаимодействие в жидких средах

При выборе веществ для создания акустооптической ячейки (рис. 1) необходимо учесть сразу несколько важных параметров. Большое акустооптическое качество материала еще не определяет полностью его пригодность для применения в акустооптических устройствах. Необходимо учитывать и другие свойства материала, такие как затухание ультразвука, поглощение излучения в рабочем диапазоне длин волн, температурная стабильность параметров и т. д. Среди этих характеристик наиболее важной величиной является затухание звука. С увеличением частоты акустических волн затухание быстро растет (примерно по квадратичному закону), что ограничивает рабочий диапазон частот ультразвука [1]. На Рис. 1 приведена схема акустооптической ячейки, где d – расстояние от источника звуковых волн до пучка излучения, L – ширина излучателя ультразвука

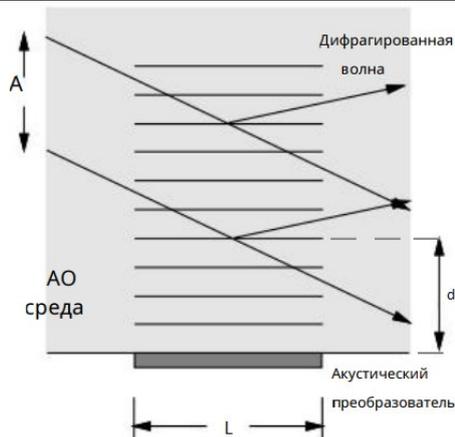


Рис. 1. Схема акустооптической ячейки.

Исторически первыми веществами, которые начали применяться в акустооптике, были жидкости [2]. Коэффициент акустооптического качества жидкостей может быть рассчитан по следующей формуле [3]:

$$M_2 = \left[\frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)}{6n} \right]^2 \frac{4}{\rho V^3}. \quad (1)$$

где n – показатель преломления, ρ – плотность вещества, V – скорость звука, причём чем выше акустооптическое качество M_2 , тем меньшая акустическая мощность требуется для получения необходимой эффективности дифракции.

Выводы

Показано, что использование жидкостей в акустооптических модуляторах инфракрасного излучения является перспективным направлением в разработке новых оптических устройств. Для инфракрасного диапазона предлагается использовать спирты или простые эфиры, так как многие из них прозрачны в данном диапазоне.

Список литературы

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. Издательство: М.: Радио и связь. 1985.
2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. — М.: Иностранная литература, 1957.
3. Nikitin P. A., Gerasimov V. V., Khasanov I. S. Temperature effects in an acousto-optic modulator of terahertz radiation based on liquefied SF6 gas // Materials. 2021. V. 14. № 19. Art.n. 5519.

Development of an acousto-optical modulator for the infrared range using liquids

Graduate student, Utebaeva Z.R.

Senior researcher, Ph.D. of physico-mathematical sciences, Nikitin P.A.(SPIN: 8553-3035)

Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of Russian Academy of Sciences,
Moscow
utebaeva_1999@mail.ru

Abstract: One of the main tasks of modern optoelectronics is the development of new methods and technologies for creating more efficient and faster acousto-optic modulators for the infrared range.

Keywords: optoelectronics, infrared radiation, acousto-optic effect, optical systems.

Применение зондовой НПВО-спектроскопии в среднем ИК-диапазоне

главный научный сотрудник, д.т.н., Вагин В.А.¹ (SPIN: 1244-6499)
аспирант, Кузнецова Д.Ю.¹ (SPIN: 6766-2823)
младший научный сотрудник, Муратов А.В.² (SPIN: 2035-1138)

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
darijez@mail.ru

Аннотация: В работе описана методика определения поглощения веществ в среднем ИК-диапазоне с помощью двухзондового ИК-Фурье-спектрометра. Исследованы жидкие пробы некоторых органических соединений: силиконовых эмульсий и фторуглеродных растворителей. Проведено дополнительное исследование образцов на спектрометре Bruker Tensor 27 для сравнения данных, оценки корректности методики и воспроизводимости измерений. Проведена оценка корреляции полученных ИК-спектров с помощью критерия Пирсона.

Ключевые слова: ИК-Фурье-спектроскопия, нарушенное полное внутреннее отражение, оптоволоконный зонд.

Введение

Для исследования параллельных процессов в режиме реального времени в среднем ИК-диапазоне разработана методика определения поглощения с использованием нарушенного полного внутреннего отражения, реализованного посредством оптоволоконных зондов. Предлагаемая методика также позволит проводить дистанционный спектральный анализ в труднодоступных местах.

1. Описание прибора

Двухзондовый ИК-Фурье-спектрометр (ДФС) представляет собой стационарный прибор, состоящий из основного блока, включающего в себя оптический и электронный узлы, персонального компьютера и двух волоконных зондов (ВОЗ). Особенностью ДФС является направление проинтерферированного излучения с выхода интерферометра на оптический разъем, к которому подключен жгут, состоящий из двух ВОЗ с детекторами исследуемого излучения на выходе каждого зонда. Другие концы ВОЗ соединены с НПВО-элементами, размещенными в непосредственном контакте с исследуемым веществом.

2. Эксперимент

Измерения проводились с помощью специальной установки: кювета с жидкостью и погруженный в нее зонд фиксировались держателями лабораторного штатива. В целях снижения нагрузки на штатив для каждого канала использовалась отдельная установка. Математическая обработка полученных ИК-спектров для последующего сравнительного анализа структурных составов веществ выполнена в программном пакете Origin. Оценка степени взаимной корреляции спектров проводилась путем расчета критерия Пирсона.

3. Результаты

Проведено исследование силиконовых эмульсий на основе полидиметилсилоксана (ПДМС) и фторуглеродных растворителей на основе перфторметилдекалина (ПФМД) в диапазоне от 4000 до 400 см⁻¹.

Значения коэффициентов корреляции ИК-спектров поглощения образцов ПДМС и ПФМД для обоих приборов (ДФС и Bruker Tensor 27) составили более 0,95, что свидетельствует о воспроизводимости измерений [1-3].

Выводы

Представлено описание методики определения поглощения жидких проб в среднем ИК-диапазоне с помощью ДФС, приведено сравнение с результатами, полученными методом НПВО на Bruker Tensor 27. Для сравнения образцов между собой, количественного определения степени совпадения их химического и структурного состава, а также оценки воспроизводимости измерений проведен численный анализ путем расчета критерия Пирсона.

Список литературы

1. Cai D., Neyer A., Kuckuk R., Heise H.M. Raman, mid-infrared, near-infrared and ultraviolet-visible spectroscopy of PDMS silicone rubber for characterization of polymer optical waveguide materials // Journal of Molecular Structure, 2010. – V. 976. – I. 1-3. – P. 274-281.
2. Riehle N., Gotz T., Kandelbauer A., Tovar G.E.M., Lorenz G. Data on the synthesis and mechanical characterization of polysiloxane-based urea-elastomers prepared from amino-terminated polydimethylsiloxanes and polydimethyl-methyl-phenyl-siloxane-copolymers // Data in Brief, 2018. – V. 18. – P. 1784-1794.
3. Fluoropolymers 2. Properties / G. Hougham, P.E. Cassidy, K. Johns, T. Davidson Ed. – Springer New York, 2006. – XVII. – P. 408.

Applications of ATR fiber probe in mid-IR region

Chief Researcher, Doctor of Engineering Sciences, Vaguine V.A.¹ (SPIN: 1244-6499)

Ph.D. student, Kuznetsova D.Yu.¹ (SPIN: 6766-2823)

Junior Researcher, Muratov A.V.² (SPIN: 2035-1138)

¹Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of Russian Academy of Sciences, Moscow

²The P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow
darijez@mail.ru

Abstract: The paper introduces a technique for determining the absorption of substances in the mid-IR range using a two-probe FTIR-spectrometer. Liquid samples of some organic compounds were studied, such as silicone emulsions and fluorocarbon solvents. The additional research of the samples on a Bruker Tensor 27 spectrometer was carried out to compare the data and assess the correctness of the technique and the reproducibility of measurements. The correlation of the obtained IR spectra was estimated using the Pearson criterion.

Keywords: FTIR-spectroscopy, ATR, ATR fiber probe.

Разработка блока контроля толщины ультратонких диэлектрических покрытий методом поверхностного плазмонного резонанса для установки вакуумного напыления

аспирант Лобастов С.А. (SPIN: 5549-3347)

научный руководитель: с.н.с к.ф.-м.н. Хасанов И.Ш. (SPIN: 6049-6419)

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

Аннотация: В докладе представлены результаты разработки измерительного блока для контроля толщины напыляемых диэлектрических покрытий непосредственно в процессе

напыления. При проектировании учитывалось, что данный блок можно будет установить в одну из имеющихся в НТЦ УП РАН установок вакуумного напыления. Полученные данные помогут в выработке методики неразрушающего контроля напыления ультратонких диэлектрических покрытий, основанной на эффекте поверхностного плазмонного резонанса.

Ключевые слова: поверхностный плазмонный резонанс, поверхностные плазмон-поляритоны, тонкие плёнки, диффузионный слой, спектроскопия, неразрушающий контроль.

Введение

Метод поверхностного плазмонного резонанса (ППР) является одним из наиболее чувствительных методов оптической характеристики и неразрушающего контроля для плёнок субволновой толщины [1, 2]. В основе метода лежит возбуждение поверхностных плазмон поляритонов (ППП), являющихся частным случаем поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ). ПЭВ по своей природе имеют эванесцентный характер, а напряженность поля ПЭВ экспоненциально возрастает при приближении к границе металл-диэлектрик, что и обуславливает высокую чувствительность метода за счёт более сильного взаимодействия излучения с веществом [3]. Предлагаемый измерительный блок не требует использования спектрометра [4] и может быть полезен при изготовлении оптических покрытий: фильтров [5], металлических зеркал и зеркал с повышенной радиационной стойкостью.

Наличие такого блока в напылительной установке позволит ускорить отработку технологии по созданию градиентных и других плёнок, а также даст возможность непосредственно контролировать процесс осаждения. Кроме того, данный блок, вследствие своих конструктивных особенностей, позволяет одновременно контролировать процесс напыления двумя способами: обычным спектрофотометрическим (по пропусканию) и при помощи ППП, где последний даёт большую точность при малых толщинах [6,7].

1. Анализ возможности установки блока оптического контроля

Для возможной модернизации были рассмотрены существующие в НТЦ УП РАН установки для вакуумного напыления ВУ-1 и УРМЗ.279.011П. Внутреннее устройство камер этих установок представлено на рис. 1 и рис. 2.

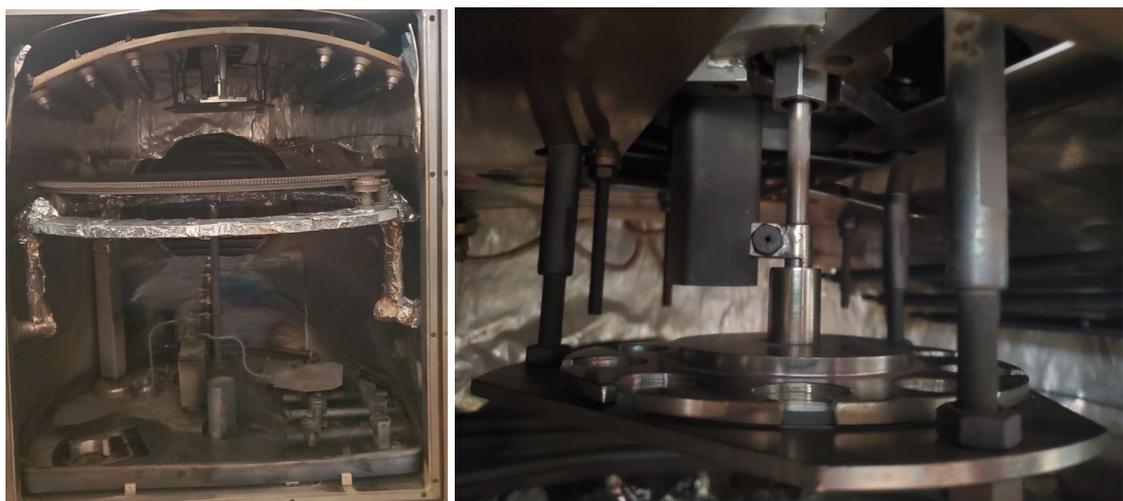


Рис. 1. Внутренняя часть камеры ВУ-1(слева) и блок свидетелей, крупно (справа).



Рис. 2. Внутренняя часть камеры УРМЗ: вид снизу (слева) и блок свидетелей, крупно (справа).

Наиболее оптимальным вариантом модернизации является замена штатного блока свидетелей на проектируемый, поскольку он будет выполнять ту же функцию оптического контроля и будет находиться вблизи карусели (держателя образцов, на которые планируется производить напыление).

После осмотра установок, было принято решение о проектировании блока контроля для установки ВУ-1, поскольку её камера имеет большее пространство для размещения нового блока, что упрощает проведение необходимых замеров и последующий монтаж блока. Дополнительным фактором является то, что монтаж в камеру установки УРМЗ затруднен, так как она колпачного типа, поэтому доступ к предполагаемому месту монтажа блока осуществляется через длинную горловину.

2. Проектирование блока контроля

Проектирование блока контроля осуществлялось в среде Компас (студенческая версия). Были спроектированы объёмные модели каждой из составных частей блока, а также сборочная модель (см. рис. 3).

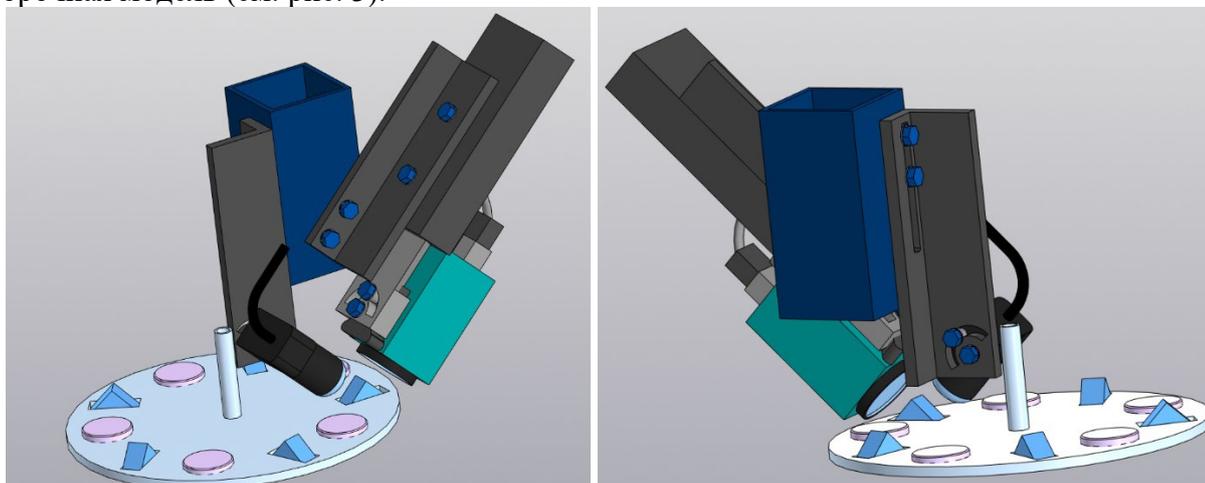


Рис. 3. Блок контроля толщины ультратонких плёнок в сборе (модель представлена с двух сторон).

3. Принцип работы блока

Контроль толщины напыляемой тонкой плёнки осуществляется следующим образом (в данном случае, речь идёт о напылении диэлектрических ультратонких покрытий толщиной не более 20 нм):

1. Камера и осветитель устанавливаются в вакуумную камеру на соответствующие места (см. рис. 4а).
2. В держатель образцов (см. рис. 4б) помещаются призмы из стекла ЛК-7, с предварительно нанесённым на её основание тонким слоем металла (серебра, меди

или золота) оптимальной толщины для наблюдения эффекта ППР. Также в круглые отверстия помещаются чистые плоскопараллельные образцы из стекла К8 (или ЛК-7) для осуществления более грубого (стандартного) контроля по пропусканию.

3. Держатель устанавливается в вакуумную камеру на положенное посадочное место (см. рис.4а).



Рис. 4. а) Место установки блока контроля в камере ВУ-1 (слева), б) Модель держателя образцов (справа).

4. Производится загрузка на карусель пробных образцов для напыления и выполнение подготовительных работ (загрузка вещества, откачка, прогрев), а также подключение и включение приборов блоков оптического контроля (фотокамеры, источников излучения, спектрометра).
5. Перед началом напыления, при помощи фотокамеры, определяется положение резонанса для призмы с металлической плёнкой.
6. При напылении контроль толщины методом ППР осуществляется:
 - визуально, по смещению резонансного угла (тёмная вертикальная полоса на рис. 5), определяя толщину из эмпирических данных предварительных экспериментов с пробными образцами различной толщины покрытий;
 - при помощи градуировки изображений по горизонтали в зависимости от смещения резонансного угла по известным данным о показателях преломления материалов образца и толщине слоев на нескольких длинах волн [6].



Рис. 5. Снимки ППР с фотокамеры для призмы с напылением (1-чистый металл, 2 и 3 – металл с оксидом кремния 13 и 17 нм соответственно)

7. Одновременно контроль можно осуществлять по спектру пропускания плоского образца при помощи спектрометра (например, Авеста ASP-150С).

Выводы

В докладе представлены промежуточные результаты разработки блока оптического контроля толщины слоёв при вакуумном напылении ультратонких покрытий методом поверхностного плазмонного резонанса. Была разработана конструкция устройства и

методика работы с ним. В дальнейшем планируется изготовить данный блок, установить его в вакуумную камеру установки ВУ-1, написать управляющее программное обеспечение, провести серию пробных процессов по напылению диэлектрических тонких плёнок.

В данной работе показана принципиальная возможность установки данного блока в вакуумную камеру. Размеры крепежа камеры и осветителя можно адаптировать для установки в других напылительные установки. Отметим, что данный блок позволяет не отказываться от имеющейся системы контроля напыления по пропусканию (одноволновой, широкополосной), а дополнить её, повысив точность процесса напыления.

Список литературы

1. Fen, Y.W., Mat Yunus, W.M. Optical characterization of multi layer thin films using surface plasmon resonance method: From electromagnetic theory to sensor application / Y.W. Fen, W.M. Mat Yunus // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2012. Vol. 1482, № 1. P. 132–135.
2. Никитин, А.К. Разработка метода абсорбционной спектроскопии поверхностных плазмон-поляритонов в терагерцовом диапазоне / А.К. Никитин [и др.] // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 30–38.
3. Агранович, В.М. Поверхностные поляритоны: электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред./ В.М. Агранович. М.: Наука, 1985. 525 с.
4. A. V. Anisimov and I. S. Khasanov, "Algorithm for optical characterization of dielectric gradient index nanofilm by surface plasmon resonance spectroscopy," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2091, no. 1, p. 012067, Nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2091/1/012067.
5. J. A. Dobrowolski, S. Browning, M. Jacobson, and M. Nadal, "2007 Topical Meeting on Optical Interference Coatings: Manufacturing Problem," *Appl. Opt., AO*, vol. 47, no. 13, pp. C231–C245, May 2008, doi: 10.1364/AO.47.00C231.
6. I. S. Khasanov, S.A. Lobastov, A. V. Anisimov, "Optical characterization of diffusion transition layers in thin films using surface plasmon resonance multiwavelength measurements", *J. Phys.: Conf. Ser.* 2091 012067, DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976853
7. Ildus Khasanov ¹, Boris Knyazev ², Sergey Lobastov ¹, Alexander Anisimov ¹, Pavel Nikitin ¹, Oleg Kameshkov ² «Optical characterization of thin films by surface plasmon resonance spectroscopy using an acousto-optic tunable filter», *Materials* 2022,15.

Development of a thickness control unit for ultrathin dielectric coatings by surface plasmon resonance for vacuum deposition installation

PhD student Lobastov S.A. (SPIN: 5549-3347)
supervisor: Ph.D. Khasanov I.Sh. (SPIN: 6049-6419)

Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of Russian Academy of Sciences,
Moscow

Abstract: The report presents the results of the development of a measuring unit for monitoring the thickness of dielectric coatings directly during the deposition process. When designing, it was taken into account that this unit could be installed in one of the vacuum deposition plants available at the STC UP RAS. The obtained data will help in the development of a technique for non-destructive control of the deposition of ultrathin dielectric coatings based on the effect of surface plasmon resonance.

Keywords: surface plasmon resonance, surface plasmon polaritons, thin films, diffusion layer, spectroscopy, non-destructive control.

Широкопольная амплитудная микроскопия поверхностного плазмонного резонанса в терагерцовом диапазоне

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Хасанов И.Ш.¹ (SPIN: 6049-6419)
ведущий научный сотрудник, д.т.н., Никитин А.К.¹
ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н., Герасимов В.В.²

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
khasanov@ntcup.ru

Аннотация: В докладе представлены результаты экспериментов по широкопольной амплитудной микроскопии поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в терагерцовом (ТГц) диапазоне, продемонстрированный впервые. Для наблюдения ППР была выбрана геометрия Отто с призмой из полимера Zeonex и полупроводниковой подложкой антимонида индия (InSb). В качестве источника использовался Новосибирский лазер на свободных электронах, генерирующий квазимонохроматическое излучение с длиной волны около 197 мкм. Варьируя воздушный зазор между призмой и исследуемой поверхностью, мы получили изображения полипропиленового покрытия толщиной 20 мкм и графенового покрытия толщиной 35 нм. Граница между областями с покрытием и без покрытия может быть точно локализована путем устранения перегиба в коэффициенте отражения пучка ТГц излучения, освещающего границу между областями. Наши результаты показывают, что метод ТГц микроскопии ППР применим для исследования планарных поверхностей полупроводников при условии, что частота зондирующего излучения близка в плазмонной частоте.

Ключевые слова: поверхностный плазмонный резонанс, поверхностные плазмон-поляритоны, терагерцовая микроскопия, полупроводники, графеновые пленки.

Введение

В настоящее время интенсивно осваивается терагерцевый (ТГц) диапазон частот, находящийся на границе микроволнового и оптического диапазонов. ТГц микроскопия является перспективным инструментом для различных областей исследований [1], включая материаловедение, биологию [2], медицину и неразрушающий контроль. ТГц микроскопия имеет преимущества перед традиционной оптической микроскопией, поскольку излучение может проникать в материалы, непрозрачные для видимого света, при этом оно является неионизирующим и низкоэнергетическим, а значит, безопасным для хрупких образцов, таких как произведения искусства. Кроме того, ТГц излучение взаимодействует с химическими связями и функциональными группами, позволяя визуализировать химические и структурные изменения в таких веществах, как полимеры и биомолекулы [3,4].

Одним из широко используемых материалов в ТГц оптике является антимонид индия (InSb), чья плазменная частота ω_p находится в ТГц диапазоне [5] и зависит от степени легирования, температуры и освещённости поверхности. Ранее было показано [6], что существует возможность генерации на поверхности образца InSb поверхностных плазмон поляритонов (ППП) — разновидности поверхностных электромагнитных волн – методом НПВО (схема Отто). При помощи формализма матриц рассеяния установлены условия наибольшей эффективности возбуждения ППП. В случае применения для этого ТГц излучения с частотой ω немного меньше ω_p , длина распространения таких ПП и глубина проникновения их поля в окружающую среду (воздух) сравнимы с длиной волны (λ) излучения; при этом возможно достижение поверхностного плазмонного резонанса (ППР) и его проявление в виде резонансного уменьшения интенсивности отражённого от основания призмы НПВО монохроматического излучения при изменении угла падения и величины

воздушного зазора. Явление поверхностного плазмонного резонанса (ППР) позволяет концентрировать энергию электромагнитного поля на субволновых расстояниях ($\delta \ll \lambda$) вблизи проводящей поверхности, что существенно повышает эффективность взаимодействия света с веществом.

Для изучения тонких объектов на плоских поверхностях, особенно в микроскопии, перспективными оказались методы, использующие поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ)[7,8], среди них микроскопия ППР [9]. ППР микроскопия сочетает в себе преимущества оптической микроскопии, такие как измерения в атмосферных условиях, доступность оборудования и возможность изучения малоконтрастных тонкослойных объектов, с высоким вертикальным разрешением микроскопии на границе раздела и ее переходных слоях.

1. Эксперимент

Для демонстрации возможностей широкополосной ППР микроскопии в геометрии Отто была собрана экспериментальная установка по схеме, представленной на рис. 1. В качестве источника ТГц излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ). Коллимированное линейно поляризованное квазимонохроматическое излучение с центральной длиной волны $\lambda \approx 197$ мкм и средней мощностью около 1 Вт падало на тонкопленочный полипропиленовый делитель луча; отраженный луч регистрировался лазерным измерителем мощности ИМО-4С (для контроля мощности ЛСЭ), а прошедший луч падал на прямоугольную призму из полимера Zeonex ($n \approx 1.5$), прозрачного в ТГц и видимом диапазонах. В призме ТГц-излучение падало на ее основание под углом θ , превышающим критический угол θ_{cr} . Распределение интенсивности в пучке, выходящем из призмы, регистрировалось пироэлектрической фокальной плоскостной решеткой Pyrocam-IV (Pyroelectric FPA) с площадью приема 25×25 мм² (320×320 пикселей).

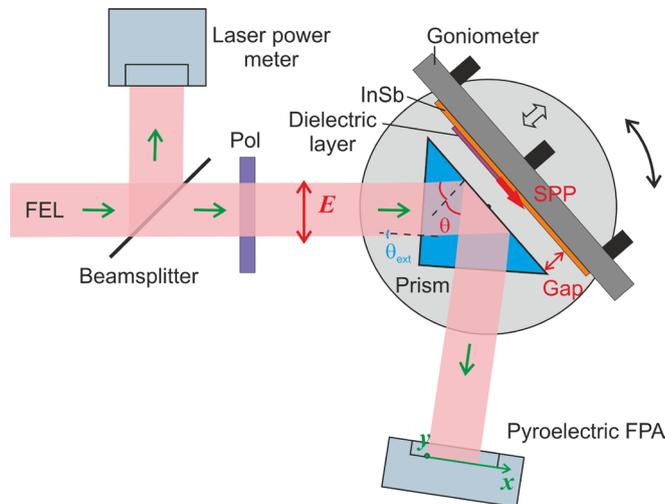


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Для демонстрации возможностей ППР микроскопии в ТГц диапазоне мы провели серию экспериментов с тремя образцами: подложка из чистого InSb (в качестве контрольного образца); подложка InSb, покрытая полипропиленовой пленкой толщиной 20 мкм, прозрачной для ТГц излучения; подложка InSb с несколькими слоями графена. На рис. 2 представлен пример полученных экспериментальных изображений, демонстрирующих ППР.

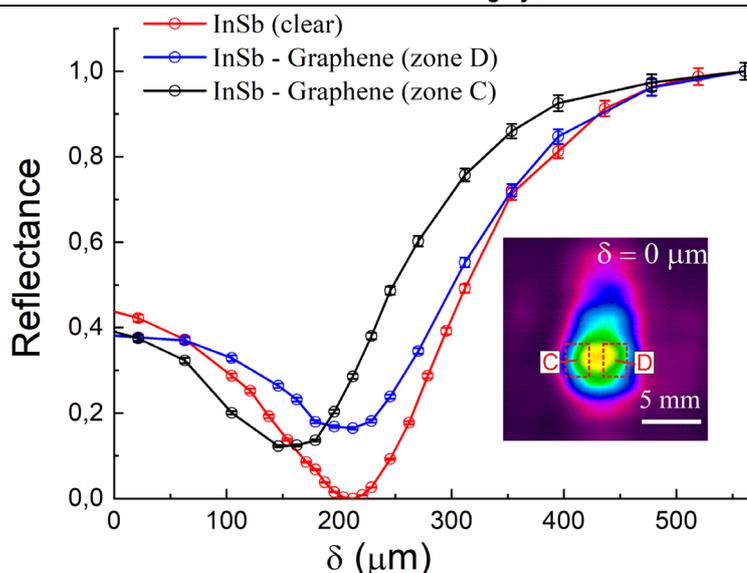


Рис. 2. Зависимость отражательная способность от величины воздушного зазора, измеренный для пластины InSb: красная линия — в случае когда освещена только образец поверхность InSb без дополнительных покрытий; синяя линия — сигнал, суммированный по зоне D (без пленки); черная линия — сигнал, суммированный по зоне D (с графеновой пленкой).

Выводы

Метод поверхностной плазмонной (ПП) микроскопии был успешно продемонстрирован в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот. Было установлено, что этот метод микроскопии может быть использован для исследования тонких диэлектрических слоев на плоских поверхностях полупроводников при условии, что плазменная частота полупроводника немного отличается от частоты зондирующего излучения. Это условие гарантирует, что длина распространения поверхностных плазмонных поляритонов (ППП) будет сопоставима с длиной волны излучения. Используя когерентное излучение Новосибирского лазера на свободных электронах (с длиной волны около 197 мкм) и конфигурацию Отто для возбуждения ППП, мы получили изображения полипропиленового покрытия толщиной 20 мкм и графенового покрытия толщиной 35 нм на плоской подложке из антимонида индия (InSb), изменяя воздушный зазор между призмой ослабленного полного отражения и исследуемой поверхностью. Мы определили, что наиболее эффективным подходом для локализации границы между областями с покрытием и без покрытия является определение точки перегиба коэффициента отражения в пучке зондирующего излучения, который освещает границу при оптимальных условиях генерации СПП на области без покрытия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2022-0009.

Список литературы

1. Герасимов В.В., Жижин Г.Н., Князев Б.А., Котельников И.А., Митина Н.А., Никитин А.К. Диагностический комплекс для исследования терагерцевых поверхностных плазмон-поляритонов на новосибирском лазере на свободных электронах // Известия РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77, № 9. С. 1333–1336.
2. Черномырдин Н.В., Кучерявенко А.С., Римская Е.Н., Долганова И.Н., Желнов В.А., Каралкин П.А., Грядунова А.А., Решетов И.В., Лаврухин Д.В., Пономарев Д.С., Карасик В.Е., Зайцев К.И. Терагерцовый микроскоп на основе эффекта твердотельной иммерсии для визуализации биологических тканей // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126, № 5.
3. Вакс В. Л., Анфертьев В. А., Балакирев В. Ю., Басов С. А., Домрачева Е. Г., Иллюк А. В., Куприянов П. В., Приползин С. И., Черняева М. Б. Спектроскопия высокого

разрешения терагерцового частотного диапазона для аналитических приложений // Успехи физических наук. 2020. Т. 190. Вып. 7. С. 765–776.

4. Назаров М. М., Шкуринов А. П., Кулешов Е. А., Тучин В. В. Терагерцовая импульсная спектроскопия биологических тканей // Квантовая Электроника. 2008. Vol. 38, № 7.

5. Chochol J. et al. Plasmonic behavior of III-V semiconductors in far-infrared and terahertz range // J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ. 2017. Vol. 13, № 1. P. 13.

6. Khasanov I.sh., Nikitin A.K., Gerasimov V.V. Reflectometric indication of polariton resonance on the InSb surface irradiated by terahertz radiation. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ,» 2023. С. 122.

7. Агранович В.М., Миллс Д.Л. Поверхностные поляритоны: электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред. Москва: Наука, 1985. 525 с.

8. Князев Б.А. Поверхностные Электромагнитные Волны: от видимого диапазона до микроволн // Вестник Новосибирского Государственного Университета. Серия: Физика. 2007. Т. 2, № 1. С. 108–122.

9. Барсуков В. П., Верхогляд А. Г., Герасимов В. В., Глебус И. С., Завьялова М. А., Князев Б. А., Макаров С. Н., Ступак М. Ф., Овчар В. К., Родионов Д. Г., Чопорова Ю. Ю., Штатнов В. Ю. Разработка и изготовление ближнепольного терагерцового сканирующего оптического микроскопа с блоком нарушенного полного внутреннего отражения // Приборы и техника эксперимента. 2014. Т. 2014, № 5. С. 68–76.

Wide-field amplitude surface plasmon resonance microscopy in the terahertz range

Senior Researcher, Ph.D., Khasanov I.Sh.¹ (SPIN: 6049-6419),
Leading Researcher, Doctor of Engineering degree, Nikitin A.K.¹
Leading Researcher, Ph.D., Gerasimov V.V.²

¹Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

²Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk
khasanov@ntcup.ru

Abstract: The report presents the results of wide-field amplitude microscopy experiments of surface plasmon resonance (SPR) in the terahertz (THz) range, demonstrated for the first time.

An Otto geometry with a Zeonex polymer prism and an indium antimonide (InSb) semiconductor substrate was chosen to observe the SPR. A Novosibirsk free-electron laser generating quasimonochromatic radiation with a wavelength of about 197 μm was used as a source. Varying the air gap between the prism and the surface under study, we obtained images of polypropylene coating of 20 μm thickness and graphene coating of 35 nm thickness. The boundary between the coated and uncoated areas can be precisely localized by eliminating the kink in the reflection coefficient of the THz radiation beam illuminating the boundary between the areas. Our results show that the method of THz SPR microscopy is applicable to the study of planar surfaces of semiconductors, provided that the probing radiation frequency is close to the plasmonic frequency.

Keywords: surface plasmon resonance, surface plasmon polaritons, terahertz microscopy, semiconductors, graphene films.

Обзор методов дистанционного обнаружения метана с пространственным разрешением на местности

аспирант Кудрявцев С.А.

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

Аннотация: В докладе рассматриваются различные методы обнаружения утечек метана, достоинства и недостатки каждой из них, определяются свойства и параметры, необходимые для существенного увеличения качества работ по поиску утечек на линейной части магистральных газопроводов. В целях определения оптимальных параметров при разработке данных систем проводится сравнительный анализ оборудования от ведущих мировых компаний и научно-исследовательских институтов.

Ключевые слова: абсорбционная спектроскопия, дистанционный детектор метана

Введение

Начиная с XXI века человечеству стала очевидна угроза глобального изменения климата. Одним из главных параметров повышения температуры является активно прогрессирующий рост уровня концентраций парниковых газов в атмосфере Земли (рис.1).

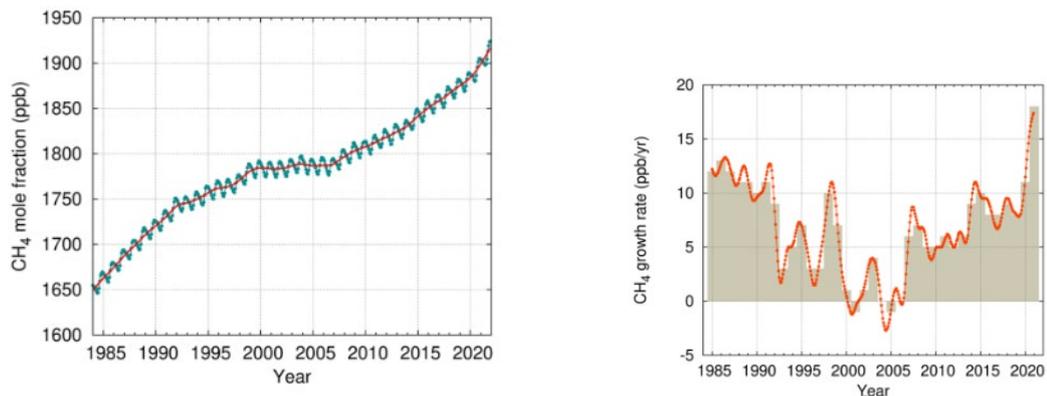


Рис. 1. Рост концентрации метана в атмосфере с 1985 года по наше время и динамика его ежегодного прироста в процентах, World meteorological organization, 2022.

Следуя информации Бюллетеня Всемирной метеорологической организации по парниковым газам [1], в 2020 году концентрация диоксида углерода (CO₂) составляла 149 %, метана (CH₄) – 262 % от эпохи доиндустриализации. Увеличение объемов парниковых газов вызывают ряд климатических (экстремальные погодные явления, таяние льдов и т.д.) и социально-экономических последствий [2-3].

В сфере энергетического сектора наиболее существенный вклад в объем выбросов метана вносит нефтегазовая отрасль [4]. В Российской Федерации на нефтегазовую отрасль приходится до 60 % выбросов метана. Так как РФ – один из наиболее крупных производителей и экспортеров нефти и газа, то проблема выбросов метана является очень актуальной и важной.

Наибольшая эмиссия метана происходит при транспортировке газа – около 500 млн.т. в год. Эмиссия метана при хранении в подземных хранилищах природного газа составляет 25 млн. т в год [5].

Утечки газа на линейной части магистральных газопроводов возникают чаще всего из-за механических повреждений трубопровода или его коррозии. Раннее обнаружение утечек является актуальной задачей. Возникает острая необходимость в разработке систем, способствующей скорейшему обнаружению и устранению утечек газа.

Так как общая протяженность газопроводов в России составляет 178,2 тысячи километров, а обследования должны производиться не менее двух раз в год в весеннее и осеннее время согласно СТО Газпром 2-2.3-095-2007, необходимо выбирать методы, которые позволят наиболее быстро и оперативно обеспечивать контроль состояния газопроводов и локализовать точки утечек природного газа.

Для достижения таких результатов необходимо использовать дистанционные системы мониторинга и неразрушающего контроля. Рассмотрим возможные методы для дистанционного контроля утечек.

Дистанционные метода обследования

Существуют следующие дистанционные методы обследования:

1. Визуальный контроль и аэрофотосъемка
2. Термографический
3. Метод комбинационного рассеяния
4. Абсорбционная спектроскопия
5. Пассивная инфракрасная оптическая газовая визуализация

Рассмотрим данные методы подробнее.

Визуальный метод

Наиболее простой и общедоступный вид контроля, главной особенностью которого является активная роль человека в проведении и получении результатов. Визуальный способ проверки основан на фиксации внешних проявлений таких как локальная пожухлость травы летом, наличие измороси, либо бурого снега зимой (Рис.2).



Рис. 2. Внешний вид проявления дефектов подземного трубопровода на поверхности в видимом диапазоне [6].

К недостаткам данного метода относятся: влияние окружающих условий и поверхности земельного покрова, человеческий фактор, очень низкая чувствительность – обнаружить возможно только большие утечки, действующие в течение продолжительного времени.

Термографический метод

Термографический метод основан на анализе тепловых изображений земной поверхности в районе залегания трубопроводов при помощи тепловизионных камер. Основными признаками утечек газа являются изменения температуры почвы в местах средних и сильных утечек, наблюдаемые в ИК диапазоне излучения, и изменения в растительном покрове, наблюдаемые в видимом диапазоне излучения. Локальное понижение температуры наблюдается в области выхода газа при его дросселировании к поверхности земли, так как при адиабатическом понижении давления газ охлаждает почву в зоне утечки (эффект Джоуля Томсона). Величина температурной аномалии определяется состоянием газа при фильтрации через почву и внешними условиями, влияющими на обмен теплом между поверхностью земли и атмосферой.

Трещины в трубах приводят к возникновению на поверхности грунта тепловых аномалий, которые позволяют локализовать место утечки метана (рис. 3). При адиабатическом понижении давления газ охлаждает почву и саму трубу. Разница температуры

пропорциональна разнице давлений. При большом давлении внутри трубы (до 50 атм) дроссельный эффект дает охлаждение более 10 градусов в точке утечки [6].



Рис. 3. Внешний вид проявления дефектов подземного трубопровода на поверхности в инфракрасном диапазоне [6].

Однако так как трубопровод находится под землей – до появления внешних признаков необходимо охладить большой объем грунта. Следовательно, данный метод применим только для утечек с высоким расходом газа на трубах с высоким рабочим давлением. Так же на данный метод влияет растительность, которая намного меньше охлаждается при утечках, солнечное освещение, неравномерно прогревающее участки свет/тень, погодные условия.

Пассивная инфракрасная оптическая газовая визуализация

Пассивная инфракрасная оптическая газовая визуализация (IOGI) чувствительна к токсичным или парниковым газам, предлагает не инвазивное дистанционное зондирование и обеспечивает возможность измерений с пространственным разрешением. Он широко применяется для обнаружения, локализации и визуализации выбросов; однако количественная оценка выбросов является давней проблемой для пассивных IOGI. Этот вид измерения дает только возможность определения геометрических характеристик рассеивания загрязняющих веществ. Использование ИК-камер для количественной оценки выбросов признано сложной задачей. В 2023 году Агентство по охране окружающей среды ЕРА заявило, что «основным недостатком тепловизионной ИК-камеры является ее неспособность измерить количество или концентрацию газа, присутствующего в газовом шлейфе». Фокс и др. заявил, что «большинство современных OGI представляют только качественную (визуальную) оценку потока».

Достоверность данных об утечки метана методом пассивной инфракрасной оптической газовой визуализации во многом зависит от таких факторов как:

- погодные условия (ветер, осадки и прочее)
- опыт проведения подобных работ у оператора
- фоновый шум

Также к недостатку данного метода является невозможность отслеживания утечки при перемещении оборудования в пространстве. Необходимо производить остановки и снимать исследуемый объект.

Метод комбинационного рассеяния

Метод основан на эффекте вторичной флуоресценции. При облучении молекул те переходят в возбужденное состояние и происходит процесс релаксации с излучением на новой длине волны, которая принимается фотоприемным устройством.

В спектроскопии комбинационного рассеяния света (англ. эквивалент Raman spectroscopy) образец облучается монохроматическим светом, которым обычно является лазер. Большая часть рассеянного образцом излучения будет иметь ту же частоту, что и падающая – процесс известен как Рэлеевское рассеяние. Тем не менее, некоторое количество излучения, рассеянного образцом, примерно один фотон из десяти миллионов (0.000001 %) – будет иметь частоту, смещенную по отношению к частоте исходного излучения лазера. Излучение, имеющее более высокую длину волны называется стоксовой компонентой

рассеяния и имеет более низкую энергию, чем излучение лазера. Колебательные состояния, исследуемые в КР спектроскопии, являются такими же, что и в ИК спектроскопии. КР и ИК спектроскопия являются по сути комплементарными, взаимно дополняющими методами. Колебания, которые сильно проявляются в ИК спектре (сильные диполи) обычно слабо проявляются в КР спектре. В тоже время, неполярные функциональные группы, дающие очень интенсивные полосы КР, как правило, дают слабые ИК сигналы. Например, колебания гидроксильных, карбонильных групп или аминок групп очень сильно проявляются в ИК спектре и очень слабы в КР спектре. Однако, двойные и тройные углерод-углерод связи и симметричные колебания ароматических групп очень сильны в КР спектре. В связи с этим КР спектроскопия используется не только как отдельный метод, но и в сочетании с ИК спектроскопией для получения наиболее полного представления о природе образца. Колебательная спектроскопия дает ключевую информацию о структуре молекул. Например, положение и интенсивность полос в спектре может использоваться для изучения молекулярной структуры или химической идентификации образца.

Плюсом данного метода является то, что никакие внешние факторы не влияют на получаемые результаты. К минусам можно отнести высокую массу оборудования, высокие необходимые мощности излучения (до 3 кВт/см²) и требования большой апертуры принимающего канала, так как интенсивность комбинационного рассеяния очень мала.

Метод абсорбционной спектроскопии

Метод основан на эффекте поглощения излучения веществом в зависимости от частоты или длины волны излучения. При работе обычно используют гелий-неоновые лазеры, излучающие на двух длинах волн 3,3922 и 3,3912 мкм, тем самым сканируя пик линии поглощения метана. Использование таких лазеров позволяет качественно и количественно определять утечки с хорошей точностью, но есть и минусы. Во-первых, излучение лазеров разнесено по времени, следовательно, при пролете меняется коэффициент отражающей поверхности вследствие неоднородности и необходимо максимально уменьшать промежутки времени между импульсами двух лазеров, что увеличивает сложность системы и её массогабаритные характеристики. Поэтому далее альтернативно предлагается использовать Nd:YAG лазеры с нелинейным кристаллом LiNbO₃ с полученным диапазоном 3,1-3,6 мкм, который можно перестраивать в диапазоне и выходить в различные спектральные полосы метана, разнося две длины волны при помощи блока нелинейного преобразователя длины волны и по времени при помощи блока временной задержки. Такие лазеры достаточно мощны, чтобы улавливать малые концентрации метана и использовать системы сканирования площадных объектов, но система является очень габаритной и дорогостоящей.

Еще одним вариантов является использование DFB диодных лазеров на второй гармонике поглощения метана на длине волны 1,65 мкм и перестройкой волны излучения при помощи элементов Пельте. Плюсом данного способа является компактность оборудования, что позволяет устанавливать приборы на более легкие летательные аппараты и беспилотные летательные средства и безопасность систем для человека (класс безопасности лазеров -1, в отличие от лазеров на 3+ мкм). Минусом таких лазеров является малый уровень поглощения на второй гармонике, что уменьшает чувствительность прибора.

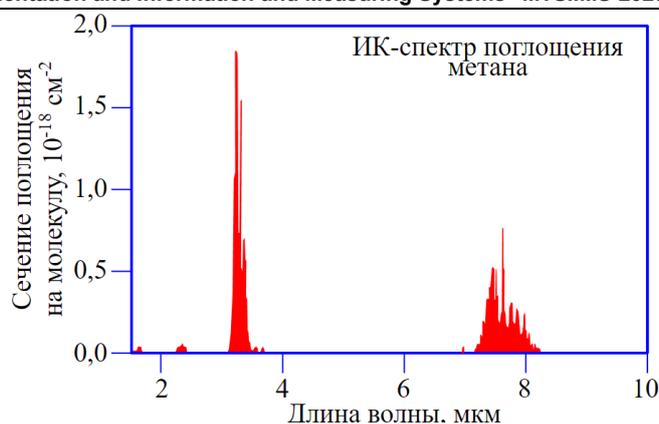


Рис. 4. Спектр поглощения метана, HITRAN

В методе используются как охлаждаемые, так и неохлаждаемые матрицы и излучения как на ближнем, так и на среднем ИК-диапазоне, что увеличивает выбор источников излучения.

Таблица 1. Сравнение методов.

Метод	производительность	чувствительность	влияние условий
ИК	низкая	низкая	высокое
МКР	средняя	высокая	низкое
АБС	высокая	высокая	низкое
АкЗ	высокая	низкая	высокое

Проведя сравнительный анализ, можно сделать вывод о том, что детектирование утечек метана методом абсорбционной спектроскопии является наиболее приоритетным направлением в развитии и использовании.

Обзор существующих решений

Далее представлены современные отечественные и зарубежные патентные разработки в области обнаружения утечек метана на нефте- и газопроводах. В ходе их анализа представлены лучшие изобретения данной направленности, выявлены их возможности и определены недостатки. Проведен анализ систем обнаружения утечек как отечественного, так и зарубежного исполнения, которые широко применяются на современных трубопроводных системах.

Система CHARM

Это инфракрасный бортовой лидар, устанавливаемый на вертолете. Немецкий прибор был совместно разработан компаниями DLR, Adlares GmbH и E.ON Ruhrgas AG. E.ON Ruhrgas — ведущая газовая компания Германии и крупнейший импортер природного газа в Европе. Она эксплуатирует систему транспортировки газа высокого давления общей протяженностью около 11 200 км газопровода.

CHARM проводит инспекцию газопроводов путем мониторинга метана с вертолета M D 500E со скоростью 70-150 км/ч с высоты от 80 до 150 метров и способен выявлять утечки с расходом от 0,05 до 10 м³/ч (9). CHARM основан на принципе DIAL (дифференциальный лидар поглощения), признанном методе активного дистанционного зондирования для обнаружения различных газов в атмосфере. Прибор передает импульсы света на Землю, а затем принимает излучение, которое отражается обратно от поверхности Земли, опять же в форме импульса. Всякий раз, когда один из этих импульсов сталкивается с метаном, мощность его сигнала ослабевает, что означает наличие следов метана на пути лазера. CHARM может точно нацеливаться на трубопровод благодаря автоматической системе слежения, которая объединяет соответствующую информацию о движении полета с

данными о местоположении трубопровода. Система распределяет лазерные пятна в регулируемом коридоре с помощью наклонного внеосевого вращающегося зеркала. В качестве передатчика используется оптический параметрический генератор с одной продольной модой. В качестве нелинейного кристалла используется КТР. В качестве накачки используется ND:YAG лазер с диодной накачкой с частотой повторения 100 Гц и средней мощностью 3 Вт. Опция двойного импульса позволяет излучать два близко разнесенных импульса (~ 200 мкс) с почти одинаковой энергией в 1мДж в диапазоне 3,3 мкм.

Система CHARМ выполнена в виде моностатической конфигурации с использованием 150-мм ньютоновского телескопа. Сканирование луча на земле осуществляется с помощью специально разработанного вращающегося наклонно-зеркального сканера, угол наклона которого можно плавно регулировать. Обычно покрывается полоса шириной 18 м с точками измерения, достаточно равномерно распределенными по ширине коридора трубопровода.

Лидарная система встроена в контейнер, размер которого составляет 2,3 x 1,1 x 0,5 м и предназначена для крепления к грузовому крюку вертолета М D500Е (рисунок 9). Общий вес системы составляет менее 300 кг. Потребляемая электрическая мощность составляет $\sim 1,5$ кВт.



Рис. 5. Система CHARМ прикреплена к грузовому крюку под фюзеляжем вертолета М D500Е [7]

Для того чтобы тщательно изучить потенциал CHARМ, разработчиками системы была проведена серия тестовых измерений как в полете, так и на земле. В серии газовых выбросов было установлено, что небольшие потоки газа в $0,05 \text{ м}^3/\text{ч}$ могут быть обнаружены с высоты полета 100 м как над естественными, так и над искусственными поверхностями. На рисунке 10 показан шум фонового сигнала, зарегистрированного с высоты полета 100 м над брусчаткой. Из этого измерения получен среднеквадратичный шум 1,8 %, что соответствует чувствительности обнаружения $3,1 \text{ ppm} \cdot \text{м}$ метана при предположении, что фоновый уровень $1,7 \text{ ppm}$ [7].

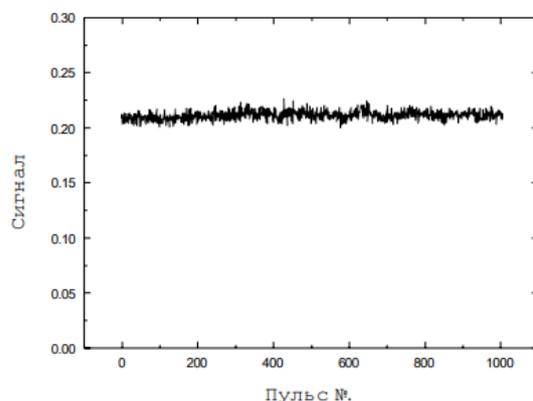


Рис. 6. Фоновый сигнал с высоты 100 м над брусчаткой [7].

Система Gas Mapping LiDAR

В технологии используется спектроскопия с модуляцией длины волны на длине волны 1651 нм для измерения интегрированных по траектории концентраций метана между самолетом и землей, который действует как топографический обратный рассеиватель. Измерения в прямом и обратном направлении во время полета самолета дают информацию об обнаруженной высоте шлейфа, как правило, с точностью до 2 м. На типичных высотах цели от 168 до 230 м над уровнем земли (AGL) поле зрения датчика 31° обеспечивает полосу измерения шириной примерно 94–130 м на земле и разрешает шлейфы с пространственным разрешением $\sim 1\text{--}2$ м. Интенсивности выбросов источника оцениваются по запатентованному методу, который объединяет информацию о пространственной концентрации метана в обнаруженном шлейфе, высоте шлейфа над уровнем земли, горизонтальной скорости ветра в момент обнаружения [8].

Система LeakSurveyor

Прибор компании Kairos Aerospace представляет собой устанавливаемую на самолете систему визуализации метана, которая сочетает в себе инфракрасный спектрометр, систему глобального позиционирования (GPS) и блок инерциального мониторинга, а также оптическую камеру для обнаружения шлейфов метана (Berman et al., 2021; Branson et al., 2021); Швитцке и др., 2019). Концентрации метана, интегрированные по траектории, измеряются по поглощению отраженного от земли солнечного света в областях спектра, где нет помех от других распространенных углеводородов (Berman et al., 2021). Для заданной высоты полета 900 м над уровнем моря каждая полоса измерения имеет ширину примерно 800 м с пространственным разрешением ~ 3 м (Шервин и др., 2021 г.). Как резюмировано в Berman et al. (2021) и Шервин и др. (2021), количественная оценка осуществляется с помощью запатентованного алгоритма, который вычисляет плотность столба метана на уровне пикселей между самолетом и землей, суммирует эти оценки в области основного шлейфа с различным усилением метана по сравнению с фоном, делит на длину этой области основного шлейфа, и умножается на предполагаемую скорость ветра [8].

Система AVIRIS-NG

Представляет собой визуализирующий спектрометр со спектральным разрешением примерно 5 нм в видимом и ближнем инфракрасном спектрах (от 380 до 2510 нм). Исследования по обнаружению точечных источников метана проводились с помощью прибора AVIRIS-NG на разных высотах: от 430 до 3800 м над уровнем и от 3000 до 8000 м над уровнем моря. Для поля зрения приблизительно 34° ширина полосы обзора и пространственное разрешение составляют порядка 1800 м и 3 м при типичной/обычной высоте полета 3000 м над уровнем моря и примерно 3300 м и 8 м на высоте полета 8000 м над уровнем моря. Колонки с метаном можно извлечь с помощью дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии или методов согласованной фильтрации, что позволяет проводить последующую обработку для выявления шлейфов метана [8].

Система ALMA

Система аэрофотосъемки газопроводов и газохранилищ. Принцип работы детектора основан на диодно-лазерной спектроскопии, обеспечивающей высокую надежность, точность и селективность. Прибор полностью автоматизирован и может непрерывно работать без оператора, сохраняя результаты в памяти компьютера. Детектор включает в себя систему GPS, которая определяет координаты маршрута полета и места утечки. При обнаружении утечки оператор получает световой и звуковой сигнал, а на монитор выводится фото и гугл-карта места утечки. Данный прибор разработан специально для применения на летательных аппаратах малой авиации, которые гораздо экономичнее при обследовании газопроводов по сравнению с вертолетами. Его габариты и масса

значительно меньше по сравнению с предыдущими моделями детекторов метана. Габаритные размеры оптического блока: 300x280x340 мм, вес – 5 кг, а вес блока электроники с компьютером – 8 кг. В данной модели детектора применён новый тип диодного лазера с волоконным выходом и дополнительно – полупроводниковый одномодовый усилитель мощности излучения лазера. Это позволило получить выходную мощность лазерного луча более 70 мВт. Несмотря на относительно большую выходную мощность, данное излучение по-прежнему относится к классу 1 (безопасно для глаз) на расстояниях более 2 метров от прибора.

Так как оборудование сильно отличается по параметрам чувствительности, массогабаритных характеристик и зон сканирования необходимо определить ключевые параметры при поиске утечек на линейных частях магистральных газопроводов.

В табл. 2 представлено сравнение технологий с пределами обнаружения

Таблица 2. Сравнение технологий.

	Наземный	БПЛА	Вертолетный	Самолетный	Спутниковый
Предел обнаружения, г/ч	6-2124	39.6	15	2000-4x10 ⁴	2.5x10 ⁵
Погрешность оценки потока, %	5	25-55	1-24	1-24	Нет оценок
Расстояние по вертикали от источника, м	-	2-60	60-200	80-1000	5.12x10 ⁵
Время на куст скважин, мин	5-60	10-30	5-15	5-30	0.01

Линейная часть характеризуется огромной протяженностью с большим количеством отводов. Зона минимальных расстояний составляет от 10 до 50 метров. Следовательно, необходимо решение, которое позволит сканировать полосу шириной 50 метров устанавливаемое на воздушный носитель, способный маневрировать, проверяя не только центральную магистраль, но и отводы, кусты скважин, участки открытых крановых узлов и сооружений. Для данных работ подходит вертолет либо БПЛА вертолетного типа. Отрицательным качеством БПЛА является зависимость от линии связи для управления – дальность работы данных систем не превышает 20 км. Оборудование должно иметь возможность устанавливаться на различные вертолеты.

Для дистанционного контроля утечек метана методом абсорбционной спектроскопии на линейной части магистральных газопроводов существует несколько технологий, которые можно сравнить по следующим параметрам:

1. Чувствительность. Чем выше чувствительность технологии, тем точнее и быстрее можно обнаружить утечку метана.
2. Стоимость. Стоимость технологии должна быть доступной для широкого использования.
3. Надежность. Технология должна быть надежной и не давать ложных срабатываний.
4. Скорость обнаружения. Чем быстрее технология обнаруживает утечку метана, тем быстрее можно принять меры по ее устранению.
5. Удобство использования. Технология должна быть удобной в использовании и не требовать специальных навыков.

Сравнительный анализ технологий для дистанционного контроля утечек метана методом абсорбционной спектроскопии на линейной части магистральных газопроводов показывает, что наиболее эффективными являются технологии, основанные на использовании инфракрасной спектроскопии в ближнем ИК-диапазоне. Они обладают высокой

чувствительностью, надежностью и скоростью обнаружения утечек метана. Кроме того, они удобны в использовании и имеют доступную стоимость. Одним из примеров такой технологии является система ALMA, которая использует перестраиваемый полупроводниковый лазер для обнаружения утечек метана на магистральных газопроводах.

Выводы

Таким образом, показана актуальность разработки отечественного прибора для поиска утечек газа с пространственным разрешением на местности. Существующие традиционные технологии мониторинга состояния протяженных объектов РФ не позволяют осуществлять мониторинг объекта по всей длине и не дают требуемой точности обнаружения деформации, смещения трубы, определения утечек и несанкционированного доступа.

В этих целях проведен сравнительный анализ методик и сделан вывод о том, что детектирование утечек метана методом абсорбционной спектроскопии является наиболее удобным. Кроме того, данный метод наиболее универсальный, и позволяет детектировать утечки не только метана, но и других газов, путем изменения длины волны сканирующего излучения на такую, которая будет соответствовать линии поглощения этого газа.

Также, он дает возможность одновременного получения качественных и количественных данных о газовой смеси. Высокая скорость анализа, высокая чувствительность метода, возможность анализа смесей без их разделения на компоненты, возможность многократного использования пробы для повторного исследования, несомненно, являются значительными преимуществами по отношению к другим методам детектирования.

Дистанционный газоанализатор, работающий методом абсорбционной спектроскопии достаточно компактен, что делает возможным использование его на бортах беспилотных летательных аппаратов, тем самым удешевляя затраты на проведение инспекций участков газопровода.

Из рассмотренных приборов наиболее оптимальными являются решения: Gas Mapping LiDAR, ALMA.

CHARM был исключен из выборки ввиду своей массы и невозможности установки на легкие вертолеты типа Robinson, которые имеют наибольшее распространение в нефтегазовых компаниях и используются в качестве инструмента для визуальной инспекции.

Преимуществом системы ALMA является чувствительность обнаружения, которая выше на один порядок чем у системы Gas Mapping LiDAR. К недостаткам системы ALMA относится отсутствие системы сканирования, вследствие чего под анализ попадает только узкий столб с диаметром пятна 2 метра на поверхности земли.

В перспективе стоит задача по созданию системы пространственного сканирования на базе системы (взяв за основу принцип работы) ALMA для отечественной разработки с целью увеличения полосы контроля. Решаемые задачи планируемым аппаратным комплексом: распределенный мониторинг утечек в трубопроводах на объектах МГ и ЖКХ; определение возникновения и места возгорания в протяженных объектах; распределенный мониторинг площадок захоронения или утилизации токсичных отходов; определение участков смещения грунта, приводящие, например, к напряженно-деформированному состоянию трубы.

Список литературы

1. БЮЛЛЕТЕНЬ ВМО ПО ПАРНИКОВЫМ ГАЗАМ № 17 | 25 октября 2021 г. Состояние парниковых газов в атмосфере по данным глобальных наблюдений до 2020 г. [Электронный ресурс]. – URL: <https://library.wmo.int> (доступ к данным 04.10.2022).
2. Д.К. Робертс, В. Массон-Дельмотт, П. Зай, М. Тигнор, Э. Полочанска, К. Минтенбек, М. Николаи, А. Окем, Дж. Петцольд, Б. Рама, Н. Вейер Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата ,2019 г.

3. Берк М., С.М. Сян и Э. Мигель,: Глобальное нелинейное влияние температуры на экономическое производство. *Nature*, 527 (7577), 235–239, doi: 10.1038/nature15725.
4. Громов А.И. Стратегия ЕС по сокращению границ метана: новые вызовы для российского газа *Энергетическая политика*, 2021. – № 5 (159). – С. 26 – 39.
5. Плотникова И.Н., Володин С.А., Кочнева Ю.Ю., Салыхова А.Р. Актуальные вопросы декарбонизации. Часть 1 Под научной редакцией М.Х. Салахова и М.С. Тагирова – Казань: Изд-во «ФЭН» Академии наук РТ, 2021. – 56 с.
6. Коннов В.В. Оборудование и технология дистанционного видеотепловизионного диагностирования газопроводов/ журнал "Технологии техносферной безопасности" (<http://ipb.mos.ru/ttb>) Выпуск № 1 (47), 2013 г.
7. Фикс А.; Эрет, Г.; Хоффштадт, А.; Клингенберг, НН; Леммерц, К.; Манке, П.; Ульбрихт, М.; Вирт, М.; Виттиг, Р.; Zirnig, W.: CHARM - Вертолетная лидарная система для мониторинга трубопроводов. Материалы 22-й Международной конференции по лазерным радарам (ESA SP-561), 2004 г.
8. Брэдли М. Конрад, Дэвид Р. Тайнер: Надежные вероятности обнаружения и неопределенность количественного определения 2 для обнаружения метана в воздухе: примеры для трех бортовых технологий, 2017 г.

Review of methane remote detection methods with spatial resolution on the terrain

Kudryavtsev S.A.

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

Abstract: In the expected cases of various cases of leak detection, evaluation and implementation of each of them, specific properties and parameters that are essential for a significant improvement in the quality of work on finding leaks on the linear part of the main gas pipelines. Research to develop the parameters of optimal data systems uses a comparative analysis of equipment owned by European companies and research institutes.

Keywords: absorption spectroscopy, remote methane detector

Исследование угловых характеристик акустооптического фильтра в азимутальной плоскости

инженер-исследователь, Кананыхин О.А. (SPIN: 4780-0414)
заведующий отделом, д.ф.-м.н., Пожар В.Э. (SPIN: 2624-6698)

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
kananykhin.oa@ntcup.ru

Аннотация: Обоснована задача получения трёхмерного изображения в произвольно задаваемых спектральных диапазонах. Для стереоспектрометра на неколлинеарном акустооптическом фильтре исследована зависимость от угла параметров качества регистрируемого изображения. Получено, что величины контраста изображения и пространственного разрешения сохраняют приемлемые для практического использования значения в используемом диапазоне.

Ключевые слова: стереоскопия, видеоспектрометрия, акустооптические фильтры.

Введение

В работе исследованы угловые характеристики акустооптического фильтра при разведении пучков в азимутальной плоскости. Разведение пучков в азимутальной плоскости имеет большой потенциал использования в системах для построения стереоизображений, т.к. в данном случае геометрия широкоапертурной дифракции для обоих пучков лучей будет одинаковой [1].

Анализ контраста изображения штриховой миры

Был проведен анализ контраста изображений штриховой миры, снятых с использованием экспериментального стенда.

На рис. 1 приведена зависимость контраста для длины волны 600 нм.

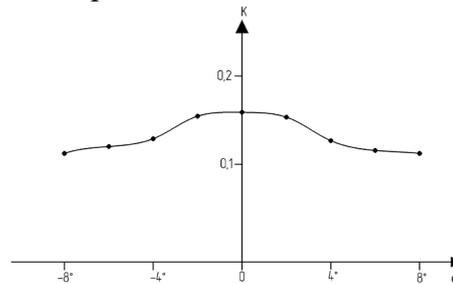


Рис. 1. Зависимость контраста от угла поворота акустооптического фильтра.

Из графика видно, что при небольших углах изменение контраста не значительно.

Анализ разрешающей способности с использованием радиальной миры показал аналогичную тенденцию изменения, что и у контраста.

Выводы

Проведенное исследование демонстрирует возможность эффективного использования акустооптических фильтров в приборах для одновременного анализа трехмерных пространственных, спектральных и поляризационных свойств объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 19-19-00606.

Список литературы

1. Пожар В.Э., Мачихин А.С. Спектрально-поляризационные системы трёхмерного технического зрения на основе акустооптической фильтрации // Светотехника. 2022. № 5. С. 32-35.

Investigation of angular characteristics of an acousto-optic filter in the azimuthal plane

Research engineer, Kananykhin O.A. (SPIN: 4780-0414)

Head of the Department, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Pozhar V.A. (SPIN: 2624-6698)

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

kananykhin.oa@ntcup.ru

Abstract: The problem of obtaining a three-dimensional image in arbitrarily specified spectral ranges is explained. For a stereo spectrometer on a non-collinear acousto-optic filter, the correlation between the angle and the quality parameters of the recorded image is investigated. It is found that the values of image contrast and spatial resolution retain acceptable values for practical use in the range used.

Keywords: stereoscopy, video spectrometry, acousto-optic filters.

Применение модуляционной методики для повышения разрешения по спектру акустооптических спектрометров

аспирант Иванов С.И.¹,
д.ф.-м.н., проф. Боритко С.В.² (SPIN-код: 5456-4348)

¹АО «РКС», Москва

²НТЦ УП РАН, Москва

ivanov.si797@gmail.com, boritko@mail.ru

Аннотация: Одной из актуальных проблем современной акустооптики является повышение разрешения по спектру акустооптических устройств. Встречается ситуация, когда две близко расположенные спектральные составляющие пересекаются, их энергия суммируется и спектрометр, какое-бы высокое спектральное разрешение он не имел, будет фиксировать только одну спектральную линию, но их там две. Чтобы показать действительно существующую ситуацию достаточно взять 2-ю производную зарегистрированной спектральной характеристики. В НТЦ УП РАН на базе квазилинейной акустооптической ячейки был создан макет спектрометра, позволяющего регистрировать производные оптических спектров. Были проведены эксперименты по влиянию величины сдвига фазы на амплитуду второй производной, снято 25 графиков для различных значений фазы. Оказалось, что максимальную величину вторая производная достигает при изменении фазы на 180° , при этом первая производная практически равна 0. Это можно объяснить тем фактом, что вся энергия сигнала первой производной «перекачивается» во вторую.

Ключевые слова: повышение разрешения по спектру, регистрация производных оптических сигналов, акустооптическая ячейка.

Введение

Развитие методов анализа оптических спектров, безусловно, представляет значительный интерес для широкого круга исследователей в области молекулярной спектроскопии, аналитической химии, биофизики и биохимии. Одной из актуальных проблем современной спектроскопии является повышение разрешения по спектру акустооптических устройств. Было показано, что простое управление в виде резкого переключения фазы звуковых волн позволяет разработать спектрометр, чувствительный к дифференциальным характеристикам спектра излучения, что в свою очередь, приводит к повышению разрешения по спектру.

1. Мотивация

Одним из способов выявления тонкой структуры оптических спектров является метод производной спектроскопии, основанный на непосредственном измерении частотной зависимости оптической плотности многокомпонентных образцов, обладающих сильным затуханием (так называемых "мутных жидкостей") с последующим математическим сглаживанием и дифференцированием. Однако, искажения в производных спектров, вносимые различными процедурами их вычисления, могут приводить к неверной интерпретации результатов, а учет этого обстоятельства весьма усложняет процедуру вычислений и снижает достоверность получаемых результатов. В работах [1, 2] применяется другой путь, основанный на методе модуляционной акустооптической спектроскопии, который базируется на применении не вычислительных методов, а методов, связанных с непосредственным измерением производных спектра. В этом случае отпадает вопрос о возможном искажении (или потере) спектральной информации при предварительном «сглаживании» перед процедурой дифференцирования.

2. Постановка задачи

Встречается ситуация, когда две близко расположенные спектральные составляющие пересекаются. Когда спектры сближаются и пересекаются таким образом, как показано на рис. 1, их энергия суммируется и спектрометр, какое-бы высокое спектральное разрешение он не имел, будет фиксировать только одну спектральную линию, но их там две. Чтобы показать действительно существующую ситуацию достаточно взять 2-ю производную зарегистрированной спектральной характеристики.

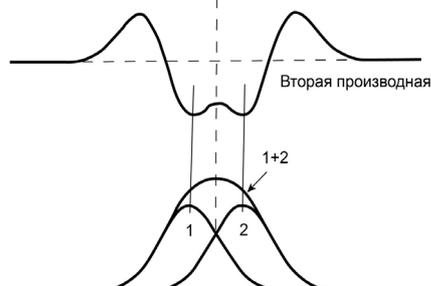
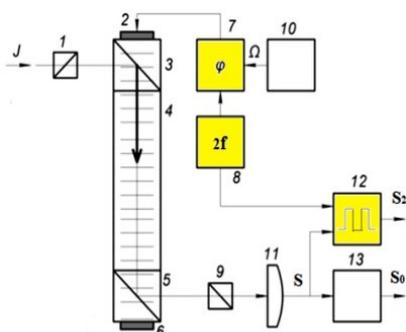


Рис. 1. Суммирование спектров.

3. Макет акустооптического спектрометра

В НТЦ УП РАН на базе квазиколлинеарной акустооптической ячейки был создан макет спектрометра, позволяющего регистрировать производные оптических спектров. Его принципиальная схема и приборное исполнение приведены на рис. 2.



а)

б)

Рис. 2. Принципиальная схема макета (а) и его фотография (б)

(1 – поляризатор; 2 – пьезопреобразователь; 3, 5 – светоделительные призмы, имеющие отражательную плоскость; 4 – акустооптический кристалл; 6 – звукопоглотитель; 7 – высокочастотный фазовращатель; 8 – генератор частотной модуляции; 9 – анализатор; 10 – высокочастотный генератор; 11 – фотоприемник; 12 – синхронный детектор; 13 – интегратор).

Макет состоит из акустооптического спектрометра с резкой модуляцией фазы управляющего сигнала и компьютера, который с помощью специализированной программы, обеспечивает управление параметрами и режимом работы спектрометра, контроль его состояния, а также графическое отображение, обработку и сохранение данных. Спектрометр включает в себя оптический модуль, модуль обработки сигнала, модуль выработки управляющего сигнала и модуль управления спектрометром. При этом модуль обработки сигнала содержит фазочувствительное устройство, позволяющее выделять различные гармоники фототока ФЭУ, а также его предварительную обработку и оцифровку. Модуль синхронизован с модулем выработки управляющего сигнала и представляет собой одноплатный компьютер на программируемой микросхеме.

4. Исследование зависимости 2-ой производной от изменения сдвига фазы

В качестве тестового эксперимента была произведена регистрация излучения неоновой лампы, имеющей, как известно, линейчатый спектр. На рис. 3 показан участок зарегистрированного спектра, а также его 1-ая и 2-ая производная. Из графика видно, что созданный макет модуляционного акустооптического спектрометра довольно эффективно регистрирует как спектр оптического сигнала, так и его производные.

В ходе проведения работ было проведено более детальное исследование работы созданного макета: программно менялась величина фазового сдвига от 0 до 360°. На рис. 3 представлены два наиболее интересных случая: первый (рис. 3а) – оптимальное значение для регистрации 1-ой производной и второй (рис. 3б) – для регистрации 2-ой производной оптического сигнала. Видно, что на рис. 3а существует как 1-ая, так и 2-ая производная, а на рис. 3б 1-ая производная фактически отсутствует. Это можно объяснить тем фактом, что вся энергия сигнала первой производной «перекачивается» во вторую.

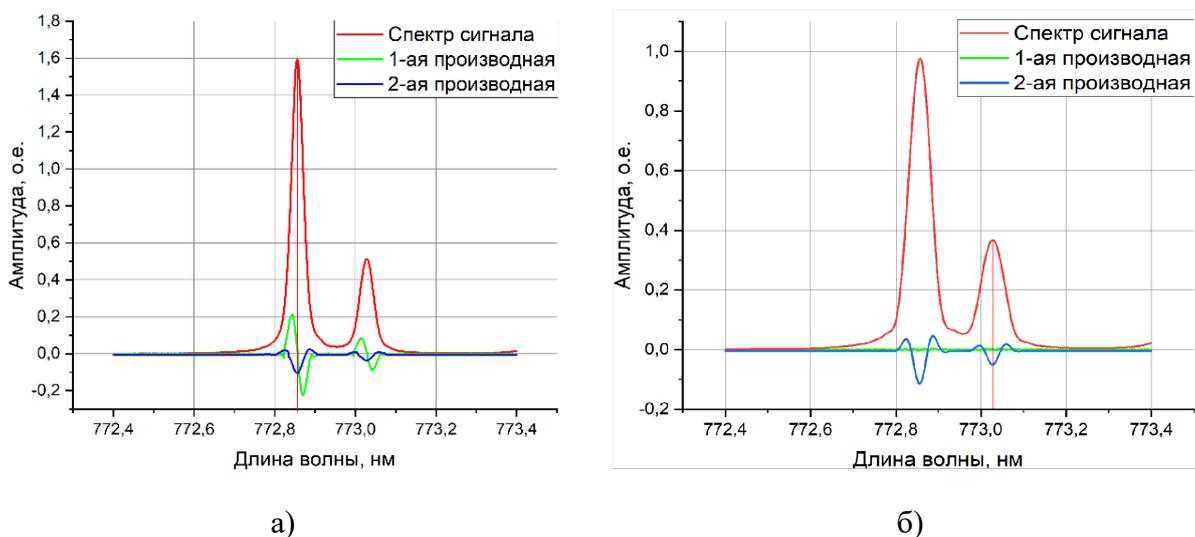


Рис. 3. Спектр сигнала и его производные (а – сдвиг фазы 90° и б – сдвиг фазы 180°).

Выводы

Таким образом, на базе квазиколлинеарной акустооптической ячейки был создан макет спектрометра, позволяющего регистрировать как спектр оптического сигнала, так и его производные. В ходе проведения работ было проведено детальное исследование работы созданного макета: программно менялась величина фазового сдвига от 0 до 360°. В качестве источника излучения использовалась неоновая лампа (все приведенные в статье результаты получены для одного и того же диапазона излучения, содержащего 2 спектральные линии). Показано, что для решения поставленной задачи повышения разрешения по спектру акустооптического спектрометра достаточно реализовать регистрацию второй производной оптического спектра при резком переключении управляющего напряжения в созданном макете на 180°.

Список литературы

1. Боритко С.В., Иванов С.И., Карандин А.В. Использование модуляционной акустооптической спектрометрии для определения местоположения спектральных особенностей в перекрывающихся спектрах. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №11. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.11.6
2. S. Boritko, A. Karandin, Y. Boritko "The possibility of direct registration of the optical spectrum derivatives using the acousto-optic spectroscopy methods" // Journal of Physics: Conference Series, 2020, Vol. 1636, 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1636/1/012032/

Application of a modulation technique to increase the resolution of the spectrum of acousto-optic spectrometers

postgraduate student Ivanov S.I.¹,
Doctor of Ph.D., Professor. Boritko S.V.² (SPIN-код: 5456-4348)

¹JSC "RSS"
²STC UI RAS
ivanov.si797@gmail.com
boritko@mail.ru

Abstract: One of the urgent problems of modern acousto-optics is to increase the resolution of the spectrum of acousto-optic devices. There is a situation when two closely spaced spectral components intersect, their energy is summed up and the spectrometer, no matter how high the spectral resolution it has, will fix only one spectral line, but there are two of them. To show a really existing situation, it is enough to take the 2nd derivative of the registered spectral characteristic. At the Scientific Research Center of the UP RAS, a model of a spectrometer was created on the basis of a quasi-collinear acousto-optic cell, which allows recording derivatives of optical spectra. Experiments were carried out on the effect of the magnitude of the phase shift on the amplitude of the second derivative, 25 graphs were taken for different phase values. It turned out that the maximum value of the second derivative reaches when the phase changes by 180 °, while the first derivative is almost equal to 0. This can be explained by the fact that the entire energy of the signal per.

Keywords: spectrum resolution enhancement, registration of derived optical signals, acousto-optic cell.

Разработка спектрометрического метода исследования поверхностного загрязнения в районах расположения нефтедобывающих платформ (мотивация тематики)

аспирант 1-го года обучения, Гречухин А.Н.

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
angrechukhin@mail.ru

Аннотация: Показано, что совершенствование системы экологического мониторинга на основе метода «отпечатков пальцев» (сравнение образцов обнаруженных загрязнителей с заранее полученными аналитическими характеристиками нефтепродуктов, которые потенциально могут быть загрязнителями в данной акватории) позволяет накопить и систематизировать информацию о причинах изменений состояния (источниках и факторах загрязнения) и о допустимых нагрузках на среду в целом.

Ключевые слова: экомониторинг, спектроскопический метод, нефтепродукты.

Для эффективного функционирования нефтяной отрасли помимо обеспечения безопасности транспортировки нефти на большие расстояния, необходим экологический мониторинг в процессе добычи, переработки и транспортировки углеводородов. При этом, основной задачей является идентификация источников загрязнения. Как правило обнаруженные нефтепродукты представляют собой смесь товарных нефтепродуктов (бензин и дизтопливо), загрязненных при фильтрации через породы зоны аэрации «остаточной» нефтью [1]. Одним из основных недостатков использования аналитического параметра, под

которым понимается суммарное содержание углеводов вне зависимости от их происхождения, при идентификации источников загрязнения является отсутствие критериев разделения природных и техногенных углеводородных соединений.

В перечне методик для анализа морских вод рекомендовано использовать ИК-спектроскопию, хромато-массспектрометрию и УФ-спектрофотометрию. Для определения соотношения разных гомологических рядов, алканов, алкенов, ароматических соединений с разным числом колец рекомендуется применять несколько методов одновременно. При этом все существующие системы идентификации источников загрязнения требуют сравнения аналитических характеристик образца загрязнителей и образца из предполагаемого источника. Наличие второго образца является проблематичным, например, из-за интенсивного судоходства или погодных условий. Другим недостатком является необходимость учета времени от момента утечки до анализа образцов, в течение которого нефть и нефтепродукты претерпевают существенные изменения. Поэтому в международной морской практике все чаще применяется не прямая идентификация, а метод сравнения типа «отпечатков пальцев», т.е. сравнение образцов обнаруженных загрязнителей с заранее полученными аналитическими характеристиками нефтепродуктов, которые потенциально могут быть загрязнителями в данной акватории.

Следовательно, вследствие высокой мобильности нефтепродуктов в различных средах идентификация источников загрязнения морских вод является актуальной экоаналитической задачей, которая требует совершенствование применяемых методик. Этот вопрос особенно важен в связи с участвовавшими случаями разливов нефти при авариях, а также сбросов нефтесодержащих вод предприятиями [2].

Список литературы

1. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия / В.М.Гольдберг, В.П.Зверев, А.И.Арбузов и др. – М.: Наука, 2001. – 125 с.
2. Экомониторинг нефти и нефтепродуктов в объектах окружающей среды [Текст]: монография / Ж.Ю. Кочетова. – Воронеж: ВУНЦВВС «ВВА», 2016. – 204 с.

Разработка эндоскопической камеры для медицинского применения

инженер-исследователь, аспирант, Веселов А.С.¹
научный сотрудник, к.т.н., Гавлина А.Е.¹
старший научный сотрудник, к.т.н., Батшев В.И.^{1,2}

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва
gavlina.ae@ntcup.ru

Аннотация: Представлена эндоскопическая камера, разрабатываемая для визуализации хирургических и диагностических процедур, с возможностью записи, обработки и хранения изображений. Представленная эндоскопическая камера позволяет выполнять капилляроскопию, а также работать в режиме NBI (Narrowband Imaging). Сформулированы направления дальнейшего развития эндоскопической камеры, а также пути ее модернизации.

Ключевые слова: эндоскопическая камера, капилляроскопия, эндоскопические исследования, медицина.

Введение

В настоящее время современные тенденции интервенционной медицины, в частности хирургии, направлены на уменьшение травматизации органов и тканей как непосредственно при осуществлении операционного доступа, так и при последующих манипуляциях. Уменьшение травматизации позволяет снизить число послеоперационных осложнений, что способствует более раннему восстановлению функций организма пациента, облегчает реабилитацию, сокращая расходы и время нахождения пациента в стационаре. Исследование пациента с помощью эндоскопической камеры позволяет неинвазивно визуализировать зону интереса для постановки врачом верного диагноза.

1. Разработка эндоскопической камеры

С целью импортозамещения в институте НТЦ УП РАН сконструирована эндоскопическая камера (рис. 1), которая совместно с программным обеспечением образует программно-аппаратный комплекс, являющийся функционально законченным видеозломом, совместимым с эндоскопами ведущих мировых производителей, таких как Karl Storz, Olympus, Stryker, которыми оснащены большинство Российских клиник.



Рис. 1. Разработанная эндоскопическая камера.

В качестве приемника излучения в разрабатываемой эндоскопической камере выбран сенсор Sony CMOS IMX462LQR, который формирует изображение с высоким отношением сигнал/шум (более 46 дБ). Высокая чувствительность выбранного приёмника позволяет работать в режиме NBI, используя узкополосные фильтры, а также применять источники света небольшой мощности (менее 10 Вт в видимом диапазоне) по сравнению со стандартными эндоскопами, требующими наличие источника света не менее 50 Вт. Высокая частота кадров (140 FPS) при разрешении камеры 1920x1080 пикселей дает возможность выполнять капилляроскопию. Возможность управления затвором камеры позволяет выполнять исследования, связанные с флуоресценцией. В настоящий момент идет апробация разрабатываемой эндоскопической камеры, на рис. 2 представлена фотография флуоресцентного эндоскопического исследования, полученного при помощи представленной камеры. Планируется расширение функциональных возможностей эндоскопической камеры в виде дооснащения фильтрами NBI, а также внестационарного использования в составе мобильных медицинских комплексов, военно-полевой медицине, медицине катастроф и других специальных применений, где требуется энергонезависимое электропитание, малый вес и габариты, невысокая стоимость.



Рис. 2. Флуоресцентная эндоскопия, фото с разрабатываемой камеры.

Выводы

Представлена эндоскопическая камера, разрабатываемая для визуализации хирургических и диагностических процедур, с возможностью записи, обработки и хранения изображений. Эндоскопическая камера позволяет проводить исследования в области капилляроскопии, флуоресцентной эндоскопии, а также работать в режиме NBI. В данный момент идет апробация представленной камеры.

Список литературы

1. Lukes P. Narrow Band Imaging (NBI) — Endoscopic Method for Detection of Head and Neck Cancer. *Endoscopy*, 2012.
2. Dippold D. Narrow Band Imaging: A Tool for Endoscopic Examination of Patients With Laryngeal Papillomatosis // *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*. 2015. P. 1-7.
3. Wang Y. Cable-free brain imaging for multiple free-moving animals with miniature wireless microscopes // *Journal of Biomedical Optic*. Vol. 28(2). 2023. P. 026503-1-026503-11.
3. Zhou X. Multimodal fluorescence lifetime imaging and optical coherence tomography for longitudinal monitoring of tissue-engineered cartilage maturation in a preclinical implantation model // *Journal of Biomedical Optic*. Vol. 28(2). 2023. P. 026003-1- 026003-15.

Development of Medical Endoscope Camera

Senior Researcher, graduate student, Veselov A.S.¹

Senior Researcher, Ph.D, Gavlina A.E.¹

Senior Researcher, Ph.D, Batshev V.I.^{1,2}

¹Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow

gavlina.ae@ntcup.ru

Abstract: An endoscopic camera designed for visualization of surgical and diagnostic procedures with the ability to record, process and store images is presented. The presented endoscopic camera allows you to perform capillaroscopy, as well as work in the NBI (Narrowband Imaging) mode. Directions for further development of the endoscopic camera, as well as ways for its modernization are formulated. The presented endoscopic camera performs studies in the field of capillaroscopy, as well as operate in NBI (Narrowband Imaging) mode. Directions for further development of the endoscopic camera, as well as ways for its modernization are formulated.

Keywords: endoscopic camera, capillaroscopy, endoscopic examinations, medicine

Влияние взаимного расположения пьезопреобразователей в широкодиапазонном акустооптическом фильтре на качество изображения

младший научный сотрудник, аспирант, Шарикова М.О. (SPIN: 5269-2077)

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
sharikova.mo@ntcup.ru

Аннотация: Акустооптические (АО) фильтры получили широкое распространение при создании гиперспектральных приборов различного назначения. Одним из их основных недостатков, ограничивающих их применение, является относительно небольшой спектральный диапазон перестройки, который можно увеличить за счет использования нескольких пьезопреобразователей, согласованных на различные диапазоны частот. В данной работе рассмотрен АО фильтр для диапазона 0,45-1,7 мкм, содержащий два пьезопреобразователя, согласованных на поддиапазоны 0,45-0,9 мкм и 0,9-1,7 мкм. Проанализировано влияние взаимного расположения пьезопреобразователей в таком широкодиапазонном АО фильтре на качество изображения.

Ключевые слова: акустооптика, акустооптическая ячейка, акустооптический фильтр пьезопреобразователь.

Введение

Акустооптический фильтр – это электронно-управляемое устройство, используемое для спектральной фильтрации оптического излучения. Его принцип действия основан на брэгговской дифракции света на динамической звуковой решетке [1,2]. Перестраивая частоту и мощность ультразвука, можно управлять положением и интенсивность выделяемой в спектре линии. Такие фильтры выгодно отличает высокое быстродействие, высокое пространственное и спектральное разрешение, малые масса и габариты. Одним из основных недостатков АО фильтров принято считать относительно небольшой спектральный диапазон перестройки. Он, как правило, не превышает одну октаву, например, 450...900, 900...1800 нм и др. [3], и ограничен диапазоном согласования пьезопреобразователя, используемого для возбуждения ультразвука с управляющим генератором [1]. Расширить спектральный диапазон АО фильтра на основе одиночной АО ячейки можно за счет увеличения размера кристалла и применения двух пьезопреобразователей, согласованных на различные поддиапазоны [4].

Для достижения уширения рабочего спектрального диапазона, например, до 450-1700 нм, что соответствует диапазону спектральной чувствительности некоторых современных матричных приемников излучения, необходимо на АО ячейке расположить два пьезопреобразователя в такой последовательности, которая будет давать наилучший результат, с точки зрения. Для этого в Zemax была смоделирована оптическая система из идеальных оптических компонентов, чтобы сравнить два возможных варианта расположения пьезопреобразователей на двойной АО ячейке. На рис. 1 представлены диаграммы пятен рассеяния для точки на оси для данных двух конфигураций. Видно, что взаимное расположение пьезопреобразователей существенного влияния на качество изображения не оказывает.

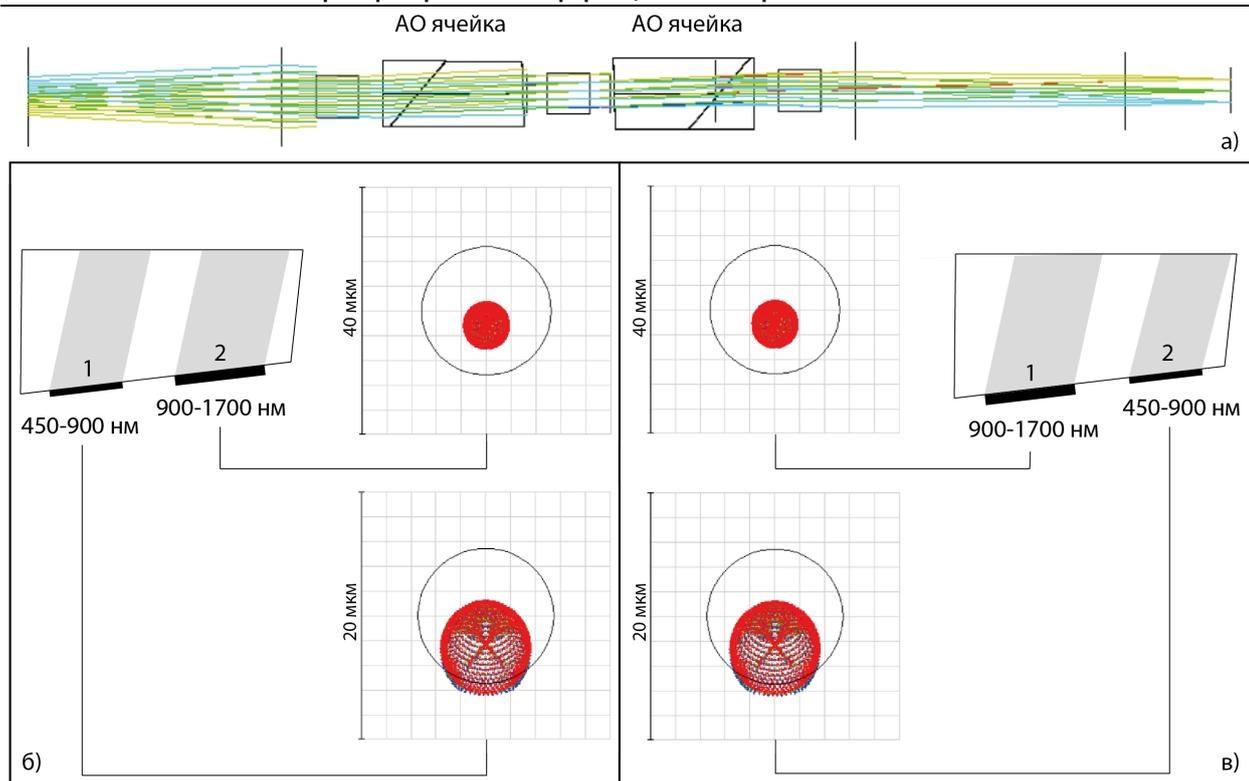


Рис. 1. Результаты анализа влияние взаимного расположения двух

пьезопреобразователей в широкодиапазонном АО фильтре на качество изображения: а) оптическая схема с двумя АО ячейками, смоделированная в Zemax; б) первый вариант расположения пьезопреобразователей на АО ячейке и диаграммы пятен рассеяния для точки на оси для обоих спектральных диапазонов; в) второй вариант расположения пьезопреобразователей на АО ячейке и диаграммы пятен рассеяния для точки на оси для обоих спектральных диапазонов. Черная окружность – это дифракционный кружок Эйри.

Выводы

Проанализировано влияние взаимного расположения двух пьезопреобразователей в широкодиапазонном АО фильтре на качество изображения. В результате моделирования в Zemax показано, что, с точки зрения влияния дисперсии материала на качество изображения, взаимное расположение пьезопреобразователей существенного влияния на качество изображения не оказывает.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010).

Список литературы

1. Goutzoulis A., Pape D.R., Kulakov S. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices. USA: Boca Raton, FL: CRC Press, 1994. 520 p.
2. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И. и др. Теория и практика современной акустооптики. М.: МИСиС, 2015. 458 с.
3. Батшев В.И., Мачихин А.С., Козлов А.Б., Боритко С.В., Шарикова М.О., Карандин А.В., Пожар В.Э., Ломонов В.А. Перестраиваемый акустооптический фильтр для спектральных диапазонов 450–900 нм и 900–1700 нм // Радиотехника и электроника. Т. 65, № 7. 2020. С. 667–673.
4. Gupta N., Voloshinov V.B. Development and characterization of two-transducer imaging acousto-optic tunable filters with extended tuning range // Appl. Opt. № 46. 2007. P. 1081-1088.

Influence of the arrangement of piezotransducers in a wide-range acousto-optical filter on image quality

Junior Researcher, postgraduate student, Sharikova M.O. (SPIN: 5269-2077)

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
sharikova.mo@ntcup.ru

Acousto-optical (AO) filters are widely used in the creation of hyperspectral devices for various purposes. One of their main drawbacks, which limits their application, is a relatively small spectral tuning range, which can be increased by using several piezoelectric transducers matched to different frequency ranges. In this paper, we consider an AO filter for the range of 0.45-1.7 μm , containing two piezoelectric transducers matched to the subranges of 0.45-0.9 μm and 0.9-1.7 μm . The influence of the mutual arrangement of piezoelectric transducers in such a wide-range AO filter on the image quality is analyzed.

Keywords: acousto-optics, acousto-optical cell, acousto-optical filter, piezoelectric transducer.

Калибровка мультиспектральных оптических систем с использованием акустооптического фильтра

научный сотрудник, к.т.н., Булатов К.М.
ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н., Зинин П.В.
аспирант Малыхина И.В.

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
malixina.ira2013@yandex.ru

Аннотация: В работе описан новый метод калибровки матричных фотоприемников мультиспектральной камеры с использованием акустооптического видео-фильтра. Такая калибровка фотоприемников необходима для проведения точности спектральных измерений, включая дистанционные измерения распределения температуры. Метод калибровки пространственной спектральной чувствительности мультиспектральной камеры был опробован на восьмицветной камере, у которой в одном пикселе содержится восемь цветовых каналов. Данный метод применим также для камер с большим количеством фотоприемников в одном пикселе.

Ключевые слова: мультиспектральная камера, калибровка, распределение температуры.

Введение

Недавно было показано, что использование акустооптической гиперспектральной фильтрация оказалось плодотворным для исследования взаимодействия лазера с веществом при высоких давлениях и температурах [1]. Было продемонстрировано, что для измерения распределения температуры вольфрамовой нити накала, нагреваемой постоянным током от стабилизированного источника тока, может быть использован двойной акустооптический (АО) фильтр изображений [2]. Интенсивность каждой точки спектрального изображения пропорциональна интенсивности излучения соответствующей точки нагретого тела. Набор спектральных изображений, полученных в диапазоне 650-750 нм, позволяет вычислить зависимость интенсивности излучения каждой точки нагретого объекта от длины волны. Распределение температуры и излучательной способности поверхности нагретого тела получается путем подгонки экспериментальной спектральной зависимости интенсивности

излучения в каждой точке нагретого объекта к распределению Планка с использованием метода наименьших квадратов [1, 3]. Большой набор изображений на различных длинах волн и следовательно большое количество экспериментальных точек на кривой Планка приводит к высокой точности определения температуры [4]. К сожалению, скорость измерения распределения температур, получаемых методом АОТФ (0,1-1 с) недостаточна для исследования многих физических процессов, таких как фазовые превращения или плавление под действием высоких температур [5].

В настоящее время разработаны методы быстрого дистанционного измерения распределения температуры с использованием мультиспектральных видео камер [5]. Одной из важных характеристик этого метода является пространственная спектральная чувствительность мультиспектрального фотоприёмника излучения. Практика показывает, что два фотоприемника, изготовленные для выполнения одной и той же задачи, могут давать разные результаты в одинаковых условиях. Также пространственный мультиспектральный фотоприемники могут со временем деградировать. Поэтому требуется разработка лабораторного метода калибровки мультиспектральных камер [6].

Метод

Обычно, в литературе можно встретить, что для калибровки используют формулу

$$U(\lambda) = K(\lambda) I_{ИСТ}(\lambda), \quad (1)$$

где U – сигнал на камере, K – пропускная способность оптической системы от длины волны, $I_{ИСТ}$ – мощность излучения калиброванного теплового источника, λ – длина волны. АОТФ число фотоэлектронов N за время накопления сигнала Δt имеет вид

$$N(w_n) = [K(w_n) I_{ИСТ}(w_n) \Delta t] / (h w_n) = K_{АОФ} Q_{САМ} K_{СИСТ} I_{ИСТ}(w_n) \Delta t, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка, $Q_{САМ}$ – квантовая эффективность камеры, w_n частота излучения, $K_{СИСТ}$, $K_{АОФ}$ – коэффициенты пропускания АОТФ и оптической системы.

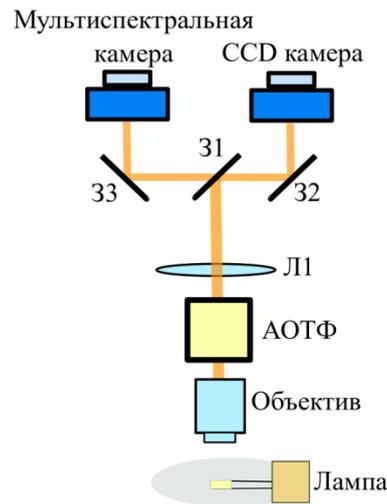


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Для проведения калибровки мультиспектральной камеры была разработана схема и собран макет. Схема представлена на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из широкополосного источника света LAMP (СИ 6-100); объектива с большим рабочим отрезком OBJ (10X Mitutoyo Plan Apo Infinity Corrected Long WD Objective NA:0.42); линзы Л1 (АС 254-400-А) с фокусным расстоянием 400 мм; ТАОФ (двойной акустооптический

фильтр производства НТЦ УП РАН) [7]; OBJ и L1 могут быть с разными фокусными расстояниями в зависимости от увеличения оптической системы. В установке используется увеличение $\times 20$. M1 поворотное зеркало, позволяющее переключать ход оптических лучей между камерами. Зеркала M2 и M3 используются для юстировки. АОФ работает в малых углах, меньших 2° , поэтому не наблюдается зависимость смещения частоты по полю изображения [2].

В схеме использовался источник теплового излучения с известной спектральной плотностью. Таким источником является широкополосная температурная лампа (ТРШ 2850-3000), излучающая площадка которой изготовлена из шлифованного вольфрама. Излучение лампы $I_{ИСТ}(w_n)$ попадает на объектив с коэффициентом пропускания $K_{SYS}(w)$ и проходит через АОФ-фильтр с изменяющимся коэффициентом пропускания $K_{АОФ}(w)$. Далее излучения попадает на линзу с коэффициентом пропускания и по средствам зеркал M1 и M2 происходит фокусировка на CCD CAM2. После чего поворотным зеркалом M1 переводим оптическую систему на CAM1 получая гиперспектральное изображение. Параметры системы остается неизменным, за исключением коэффициента чувствительности камер.

$$K_{АОФ} Q_{CAM}(x,y) K_{SYS} = N(w_n) / [I_{ИСТ}(w_n) \Delta t], \quad (3)$$

АОФ спектрометр предварительно откалиброван производителем, поэтому $K_{АОФ}$ известен. Поворотом зеркала M1 производится переход на плечо с камерой с известной средней квантовой эффективностью Q_{CAL}

$$K_{АОФ} Q_{CAL} K_{SYS} = N'(w_n, x, y) / [I_{ИСТ}(w_n) \Delta t] \quad (4)$$

$$K_{SYS} = N'(w_n, x, y) / [K_{АОФ} Q_{CAL} I_{ИСТ}(w_n) \Delta t] \quad (5)$$

Тогда

$$Q_{CAM}(w, x, y) = [K_{АОФ} Q_{CAL} I_{ИСТ}(w_n) \Delta t] / [N'(w_n, x, y) I_{ИСТ}(w_n) \Delta t] \quad (6)$$

На основе эксперимента измерений была получена серия мультиспектральных изображений для разных частот ($3,5 \cdot 10^{14}$ $5 \cdot 10^{14}$) или преобразуя для удобства в длины волн (590-850 нм) пропускания АОФ.

Результаты

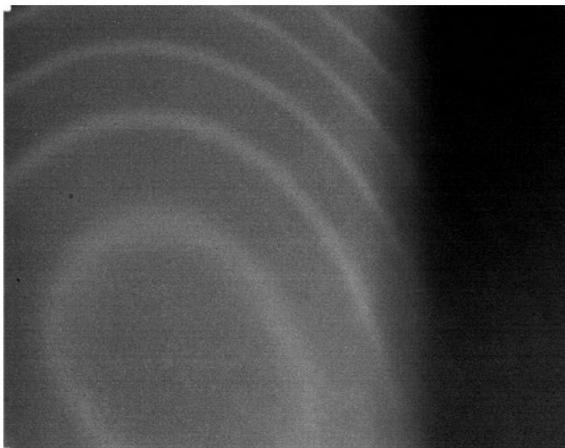


Рис. 2. Изображение получено на 3-ем канале матрицы камеры, когда длина волны пропускания АОФ 655 нм.

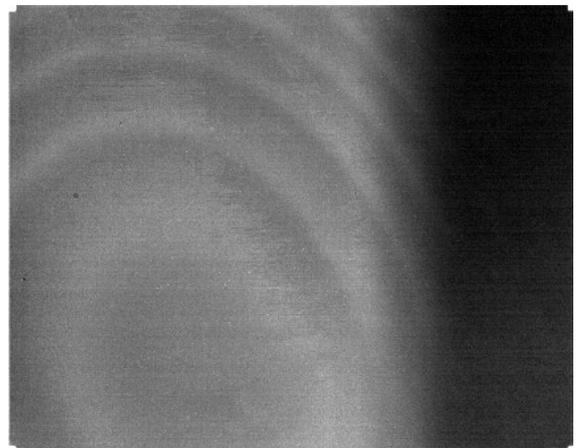


Рис. 3. Изображение получено на 3-ем канале матрицы камеры, когда длина волны пропускания АОФ 690 нм.

На рисунках видны интерференционные полосы, которые могут привести к неправильному определению квантовой эффективности камеры, если не проводить пространственную калибровку. Но производители матричных фотоприемников указывают среднюю квантовую эффективность, поэтому для проведения сравнения мы также нашли среднюю квантовую эффективность для каждого канала от разных длин волн рис. 4.

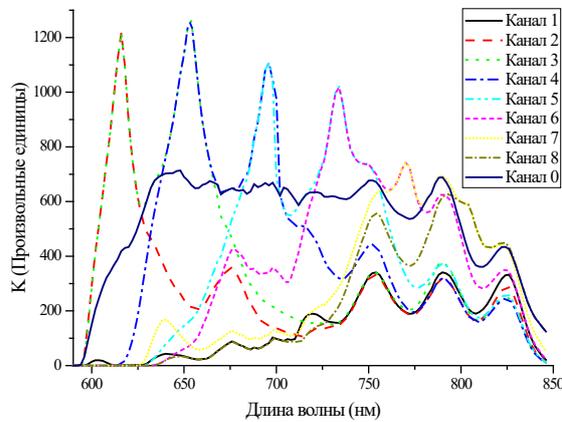


Рис. 4. Усредненная квантовая эффективность камеры $K(\lambda)$ от длины волны.

Аналогичная зависимость, заявленная производителем представлена на рис. 5.

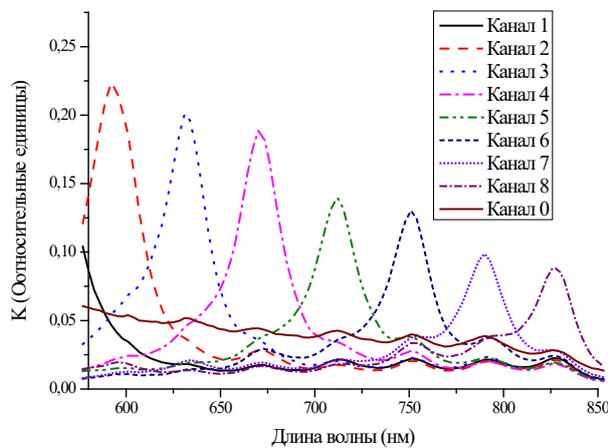


Рис. 5. Квантовая эффективность камеры $K(\lambda)$ от длины волны.

Выводы

Рассмотрены существующие способы калибровки спектральной чувствительности матрицы. В качестве калибровки мультиспектральной камеры был собран макет и проведен эксперимент. Данный метод позволяет определять пространственную спектральную чувствительность ПЗС-матрицы. Метод сравнительного анализа показал, что спектральная чувствительность камеры, заявленная производителем отлична от экспериментальной, что вызвано смещением частот фильтров.

Исследование проведено в рамках работ по Государственному заданию Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН «Разработка новых методов и средств для изучения поведения вещества в условиях высоких давлений и температур»

(FFNS-2022–0008). Спектральные исследования были выполнены на уникальной научной установке «Лазерный нагрев в ячейках высокого давления» [<http://ckp-rf.ru/usu/507563/>].

Список литературы

- [1] *Зинин, П.В., Булатов, К.М. Быков, А.А., Мантрова, Ю., Кутуза, И.Б.*, Дистанционное измерение распределения температуры на поверхности твёрдых тел при воздействии мощного лазера в ячейках высокого давления // *Успехи физических наук*. 2022. Т. 192. № 8. С. 72-82. DOI: 10.3367/UFNr.2021.05.038996
- [2] *Machikhin, A.S., P.V. Zinin, A.V. Shurygin, D.D. Khokhlov*, Imaging system based on a tandem acousto-optical tunable filter for in situ measurements of the high temperature distribution // *Optics Letters*. 2016. Vol. 41. № 5. P. 901. DOI: 10.1364/OL.41.000901
- [3] *Булатов, К.М., А.А. Быков, М.И. Гапонов, П.В. Зинин, И.Б. Кутуза, et al.*, Разработка методов изучения поведения вещества в экстремальных условиях: высокие давления и температуры // *Физические основы приборостроения*. 2017. Т. 6. № 3. С. 72-82. DOI: 10.25210/jfop-1703–072082
- [4] *К. М. Bulatov, et al.* Multi-spectral image processing for the measurement of spatial temperature distribution on the surface of the laser heated microscopic object // *Comput. Opt.* 2017. Vol. 41. № 6. P. 864. doi: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-864-868
- [5] *Булатов, К. М., Зинин, П. В., Мачихин, А.С., Кутуза И. Б.*, Мультиспектральная камера для динамических измерений распределения высоких температур // *Светотехника*. 2022. №5, С. 67-70. DOI: 10.33383/2022-081
- [6] *B. Mataghani, C. Salvaggio*. Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing // *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 20. P. 4453. DOI: 10.3390/s19204453
- [7] *Zinin, P. V., Bykov, A. A., Machikhin, A. S., Troyan, I.A., Bulatov, K.M., et al.* Measurement of the temperature distribution on the surface of the laser heated specimen in a diamond anvil cell system by the tandem imaging acousto-optical filter // *High Pressure Research*. 2019. Vol. 39. № 1. P. 131-149. DOI: 10.1080/08957959.2018.1564748

Calibration of multispectral optical systems using an acousto-optic filter

Research associate, Ph.D. of Engineering degree, Bulatov K.M.,
Leading researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Zinin P.V.,
PhD student Malykhina I.V.

¹Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

Abstract: The paper describes a new method of calibration of matrix photodetectors of a multispectral camera using an acousto-optic video filter. Such calibration of photodetectors is necessary for the accuracy of spectral measurements, including remote measurements of temperature distribution. The method of calibration of the spatial spectral sensitivity of a multispectral camera was tested on an eight-color camera, which contains eight color channels in one pixel. This method is also applicable for cameras with a large number of photodetectors in one pixel.

Keywords: multispectral camera, calibration, temperature distribution

Применение метода R-функции в численном моделировании процессов электромагнито-упругости тонких пластин со сложной конфигурацией в плане

профессор, доктор технических наук, доцент Нуралиев Ф.М.¹ (SPIN-код: 8518-9757)
доцент, кандидат технических наук, доцент Айтмуратов Б.Ш.² (SPIN-код: 8260-5764)
доцент, доктор технических наук Сафаров Ш.Ш.¹
доцент, доктор технических наук Артикбаев М.А.²

¹Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

²Нукусский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий
nuraliev2001@mail.ru

Аннотация: Данная работа посвящена разработке математической модели процессов геометрически нелинейной деформации магнитоупругих тонких пластин сложной формы с учетом силы электромагнитного поля на основе теорий нелинейной упругости и вариационного принципа Гамильтона-Остроградского. На основе вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, применяя соотношения Коши, закон Гука и тензор электромагнитного поля Максвелла к состоянию геометрически нелинейной деформации тонкой магнитоупругой пластины сложной конфигурацией, рассматривается воздействие электромагнитного поля. Результатом является математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений с частными производными с начальными и краевыми условиями. Для численного решения вышеуказанной задачи разработан вычислительный алгоритм с совместным использованием метода R-функций (RFM), вариационного метода Бубнова-Галеркина, метода Ньюмарка и ряда других численных методов. При этом процесс решения задач состоит из следующих этапов: применение метода линеаризации при решении систем нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными; построение последовательности координатных функций (структур решений), соответствующих заданным краевым условиям, с использованием R-функции В.Л.Рвачева; дискретизация относительно пространственных переменных, т.е. построение дискретных уравнений, с использованием вариационного метода Бубнова-Галеркина и метода Ньюмарка; решение дискретных уравнений и нахождение неизвестных компонентов структур решений; идентификация неизвестных функций. Разработан программный комплекс для автоматизации процесса решения геометрических нелинейных задач магнитоупругости тонких анизотропных пластин сложной формы.

Ключевые слова: электромагнитоупругость, математическая модель, принцип Гамильтона-Остроградского, гипотеза Кирхгофа-Лява, соотношения Коши, закон Гука, силы Лоренца, тензора напряжений Максвелла, магнитоупругие гибкие пластины.

Введение

На сегодняшний день тонкие пластины широко используются в различных областях электро техники в качестве конструктивных элементов различных конструкций. Материал пластины может быть изотропным, трансверсально-изотропным, ортотропным или анизотропным. Требования современной инженерной практики требуют учета различных анизотропных свойств пластин.

1. Математическое моделирование

На основе вариационного принципа Гамильтона-Остроградского разработана следующая математическая модель (1)-(3) тонкой анизотропной пластины, находящейся в электромагнитном поле, с использованием соотношения Коши, закона Гука и электромагнитного тензора Максвелла [1-3]:

$$\left\{ \begin{aligned} -\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial N_{12}}{\partial y} + N_x + R_x + q_x + T_{zx} &= 0, \\ -\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial N_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_{22}}{\partial y} + N_y + R_y + q_y + T_{zy} &= 0, \\ -\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_{11} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial x} + N_{22} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial^2 M_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{22}}{\partial y^2} + N_z + R_z + q_z + T_{zz} &= 0. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Начальное условие:

$$\rho h \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_t = 0, \rho h \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_t = 0, \rho h \frac{\partial w}{\partial t} \Big|_t = 0, \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \delta w \Big|_{x|_t} = 0, \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial y} \delta w \Big|_{y|_t} = 0. \quad (2)$$

Краевое условие:

$$\left\{ \begin{aligned} N_{11} \delta u \Big|_x = 0, \frac{1}{2} N_{12} \delta v \Big|_x = 0, -M_{11} \delta \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_x = 0, -\frac{1}{2} M_{12} \delta \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_x = 0, \\ \left[N_{11} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial M_{11}}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial y} \right] \delta w \Big|_x = 0, \\ \left[(N_{Px} + N_{Txx}) \delta u + (N_{Py} + N_{Txy}) \delta v + (N_{Pz} + N_{Tzx}) \delta w \right] \Big|_x = 0, \\ N_{22} \delta v \Big|_y = 0, \frac{1}{2} N_{12} \delta u \Big|_y = 0, -M_{22} \delta \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_y = 0, -\frac{1}{2} M_{12} \delta \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_y = 0, \\ \left[N_{22} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial M_{22}}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial x} \right] \delta w \Big|_y = 0, \\ \left[(N_{Fy} + N_{Tyy}) \delta u + (N_{Fx} + N_{Txy}) \delta v + (N_{Fz} + N_{Tyz}) \delta w \right] \Big|_y = 0. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где u, v, w – изгибы пластины; h – толщина пластины; M_{11}, M_{22}, M_{12} – изгибающие и огибающие моменты; N_{11}, N_{22}, N_{12} – нормальные и касательные напряжения; $R_x, R_y, R_z, N_x, N_y, N_z$ – электромагнитное поле и объемные силы; $T_{zx}, T_{zy}, T_{zz}, q_x, q_y, q_z$ – компоненты внешних сил; $N_{Px}, N_{Py}, N_{Pz}, N_{Fx}, N_{Fy}, N_{Fz}, N_{Txx}, N_{Txy}, N_{Txz}, N_{Tyx}, N_{Tyy}, N_{Tyz}$ – компоненты контурных сил. Эта задача решалась при соответствующих граничных условиях (жестко-защемленном граничной условию) исследуемой тонкой анизотропной пластины сложной формы [3, 4].

2. Вычислительный эксперимент

В качестве примера для реализации вычислительных экспериментов была взята тонкая анизотропная пластина сложной формы, которая используется при изготовлении трансформатора (рис. 1).

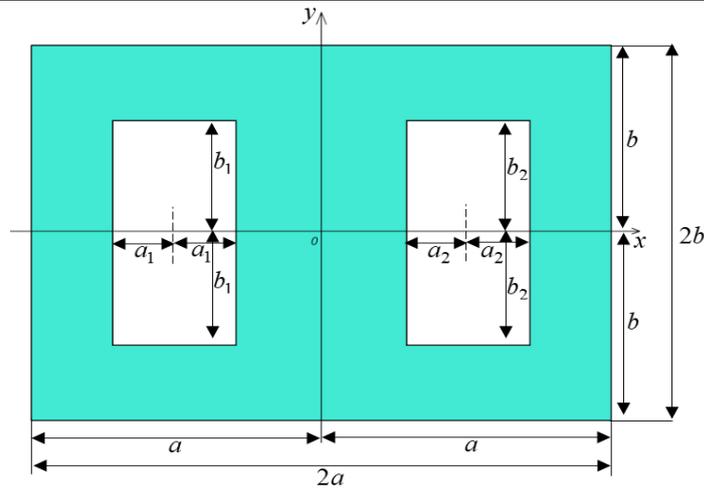


Рис. 1. Пластина со сложной формой.

Вначале, используя метод R-функции В.Л.Рвачева, разработано краевое уравнение комплексной сферы (4).

$$\Omega = f_{12} \wedge f_{34} \wedge f_{56}. \quad (4)$$

где:

$$f_1 = (a^2 - x^2) \geq 0, \quad f_2 = (b^2 - y^2) \geq 0,$$

$$f_{12} = f_1 \wedge f_2 = a^2 - x^2 + b^2 - y^2 - \sqrt{(a^2 - x^2)^2 + (b^2 - y^2)^2} \geq 0;$$

$$f_3 = \left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 - a_1^2 \right) \geq 0, \quad f_4 = (y^2 - b_1^2) \geq 0,$$

$$f_{34} = f_3 \wedge f_4 = \left(x - \frac{a}{2} \right)^2 - a_1^2 + y^2 - b_1^2 - \sqrt{\left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 - a_1^2 \right)^2 + (y^2 - b_1^2)^2} \geq 0;$$

$$f_5 = \left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 - a_2^2 \right) \geq 0, \quad f_6 = (y^2 - b_2^2) \geq 0,$$

$$f_{56} = f_5 \wedge f_6 = \left(x + \frac{a}{2} \right)^2 - a_2^2 + y^2 - b_2^2 - \sqrt{\left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 - a_2^2 \right)^2 + (y^2 - b_2^2)^2} \geq 0.$$

С помощью проведенных вычислительных экспериментов был исследован процесс геометрически нелинейной деформации магнитоупругих пластин тонкой сложной формы. В этих вычислительных экспериментах рассматривались пластина, изготовленная из меди, в изотропном состоянии, а и пластина, изготовленная из анизотропной меди, в анизотропном состоянии. Вычислительные эксперименты были проведены при следующих геометрических и механических параметрах:

$$a = 2, b = 1, a_1 = 0.5, a_2 = 0.5, b_1 = 0.7, b_2 = 0.7, t = 1c, H_x = H_y = H_z = 10кЭ,$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = 10, E = 128ГПа, \nu = 0.3, E_1 = 322.09ГПа, E_2 = 357.73ГПа,$$

$$\nu_1 = 0.2386, \nu_2 = 0.2762.$$

где a, a_1, a_2, b, b_1, b_2 – геометрические параметры; $t = 1c, H_x, H_y, H_z, Q_1, Q_2, Q_3$ – механические параметры; E, ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона для меди; E_1, E_2, ν_1, ν_2 – модуль Юнга и коэффициент Пуассона для анизотропной меди.

Вычислительный эксперимент 1. В данной работе рассматривалось изменение состояний деформации под воздействием электромагнитного поля, когда края зафиксированы изотропной (медной) или анизотропной (анизотропно-медной) пластиной, т.е. результаты

функции сдвига $w(x, y, t)$ были получены при значениях $x \in [-2; 2], y = 0, t = 1$ вдоль оси Oz (рис. 2).

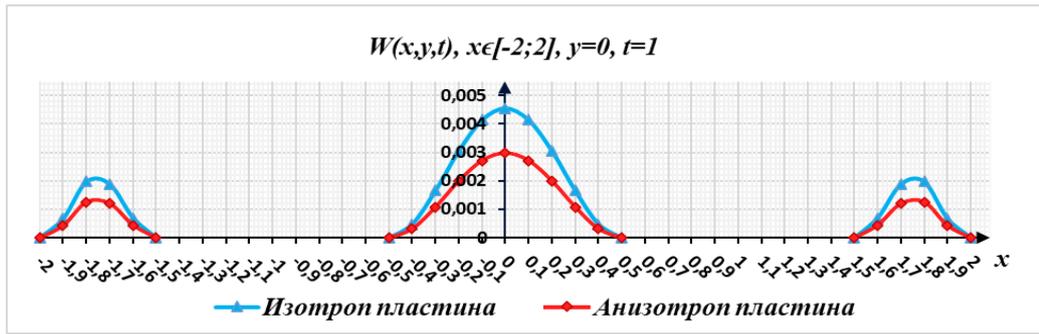


Рис. 2. Графический анализ случаев электромагнитной упругости изотропных и анизотропных пластин.

Результаты исследования показывают, что при анизотропности пластины, расхождения в изгибах относительно изотропной пластины составляет 34%.

Вычислительный эксперимент 3. Изменение геометрических параметров тонкой анизотропной пластины сложной формы.

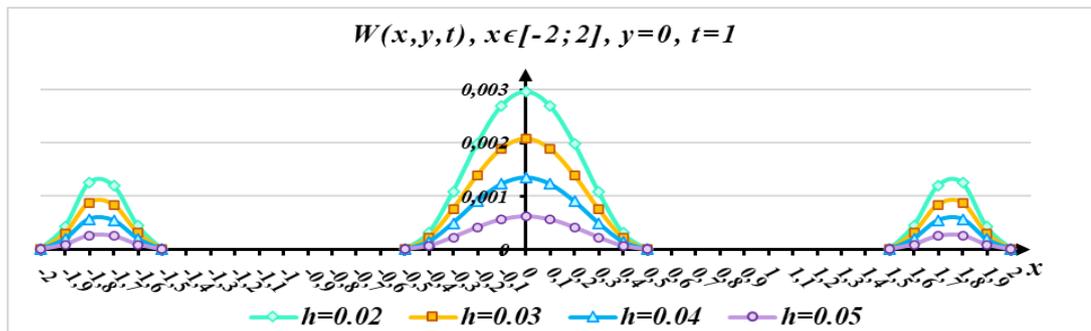


Рис. 3. Графоанализ изменения толщины пластины.

Получены следующие результаты, когда толщина тонкой анизотропной пластины сложной формы составляла $h=0,02, h=0,03, h=0,04$ и $h=0,05$ (рис. 3). Из полученных результатов стало известно, что с уменьшением толщины пластины соответственно увеличивается ее изгиб.

Выводы

Были проведены вычислительные эксперименты по изучению влияния сил электромагнитного поля на процесс геометрического нелинейного деформирования анизотропных пластин сложной формы тонкой формы и проведен анализ полученных результатов [4, 5]. Результаты исследований показывают, что силы электромагнитного поля мало влияют на процесс деформирования тонких магнитоупругих анизотропных пластин.

Список литературы

1. Кабулов В.К. Алгоритмизация в теории упругости и деформационной теории пластичности Ташкент Фан 1966. 392 с.
2. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. - М.: Наука. 1987.— 360 с.
3. Artikbayev M.A., Nuraliev F.M., Aytmuratov B.Sh. Mathematical model and computational algorithm for calculating vibrations of electromagnetic anisotropic thin plates of complex form // Science and Education in Karakalpakstan. – Nukus, 2022. – № 1/2(23). – Pp. 31-40.
4. Артикбаев М.А. Юпқа мураккаб шаклдаги анизотроп пластиналарнинг электромагнитэластиклик геометрик ночизикли деформациялиниш масаласини ечиш натижалари // Муҳаммад Ал-Хоразмий Авлодлари. – 2022. - №3(21)/2022. – С. 237-241.

5. Nuraliev F.M., Aytmuratov B.Sh., Safarov Sh.Sh., Artikbayev M.A. Mathematical modeling of geometric nonlinear processes of electromagnetic elastic thin plates of complex configuration // Scientific journal «Problems of Computational and Applied Mathematics». № 1(38), 2022. pp 90-109.

Application of the R-function Method in Numerical Simulation of Electromagneto-elasticity of Thin Plates with a Complex Configuration in Plane

Professor, Doctor of Technical Sciences, Docent Nuraliev F.M. (SPIN code: 8518-9757)

Candidate of Technical Sciences, Docent Aitmuratov B.Sh. (SPIN-код: 8260-5764)

Docent, PhD in Technical Sciences Safarov Sh.Sh.

Docent, PhD in Technical Sciences Artikbaev M.A.

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorezmi

nuraliev2001@mail.ru

Abstract: This work is devoted to the development of a mathematical model of the processes of geometrically nonlinear deformation of magnetoelastic thin plates of complex shape, taking into account the strength of the electromagnetic field, based on the theories of nonlinear elasticity and the Hamilton-Ostrogradsky variational principle. On the basis of the Hamilton-Ostrogradsky variational principle, applying the Cauchy relations, Hooke's law and Maxwell's electromagnetic field tensor to the state of geometrically nonlinear deformation of a thin magnetoelastic plate of complex configuration, the effect of an electromagnetic field is considered. The result is a mathematical model in the form of a system of partial differential equations with initial and boundary conditions. For the numerical solution of the above problem, a computational algorithm has been developed using the R-function method (RFM), the Bubnov-Galerkin variational method, the Newmark method and a several of other numerical methods. At the that time, the process of solving problems consists of the following stages: the application of the linearization method in solving systems of nonlinear partial differential equations; construction of a sequence of coordinate functions (solution structures) corresponding to given boundary conditions using V.L.Rvachev's R-function; discretization with respect to spatial variables, i.e. construction of discrete equations, using the Bubnov-Galerkin variational method and Newmark method; solution of discrete equations and finding unknown components of solution structures; identification of unknown functions. A software package has been developed to automatization the process of solving geometric nonlinear problems of magnetoelasticity of thin anisotropic plates of complex shape.

Keywords: electromagnetoelasticity, mathematical model, Hamilton-Ostrogradsky principle, Kirchhoff-Love hypothesis, Cauchy relations, Hooke's law, Lorentz forces, Maxwell stress tensor, magnetoelastic flexible plates.

Метрики для оценки качества распознавания эмоционального состояния человека – оператора

аспирант, Фатхутдинов Т.М. (SPIN: 1391-7708)

МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия
Fatkhutdinovtm@gmail.com

Аннотация: В работе рассматриваются проблемы детектирования эмоционального состояния человека-оператора. Основное внимание уделено в определении метрик для оценки качества распознавания эмоционального состояния человека. Даны рекомендации по применению метрик, позволяющих учитывать не только точность определения объектов, но и их полноту, а также варьирующийся порог вероятности появления объекта на изображении.

Ключевые слова: распознавание изображений, метрики, детектирование эмоций.

Введение

Увеличение сложности автоматизированных систем управления повлекло за собой увеличение нагрузки и зоны ответственности на каждого следящего за системой человека-оператора. Человек является наиболее ненадежным элементом этой системы, так как человеческое восприятие зависит от эмоционального состояния, поэтому важно знать эмоциональное состояние индивидуума, чтобы понимать его возможность адекватно реагировать на получаемые данные от системы. Учет эмоционального состояния важно не только в технике, но и при общении с животными, при спортивных тренировках и т.п. [1-3]. Для технических систем также важно контролировать эмоциональное состояние оператора [3]. Основная цель данной работы заключается в определении метрик для оценки качества распознавания эмоционального состояния человека.

Обоснование выбора конкретных метрик позволит учитывать не только точность определения объектов, но и их полноту, а также варьирующийся порог вероятности появления объекта на изображении.

Анализ метрик для оценки качества распознавания эмоционального состояния

Наиболее простыми и используемыми метриками являются AP (средняя точность) и PR (отклик) Однако эти метрики по отдельности не могут оценить качество модели [4]. Например, когда модель имеет высокий отклик, но низкую точность, модель правильно классифицирует большинство положительных образцов, но имеет много ложных срабатываний (т. е. классифицирует многие отрицательные образцы как положительные), или же, когда модель имеет высокую точность, но низкий отклик, то модель является точной, когда она классифицирует образ как положительный, но она может классифицировать только некоторые из положительных образцов. Одна из наиболее часто используемых метрик качества ранжирования (Mean-Average-Precision (MAP)) рассчитывается путем вычисления точности для каждого класса объектов исходя из порога вероятности, при котором объект считается обнаруженным. Затем средняя точность вычисляется путем усреднения всех значений precision для каждого класса объектов [5 - 7]. Таким образом, MAP задает среднее значение точности алгоритма на различных порогах вероятности детектирования.

В общем случае для получения первичных признаков эмоционального состояния человека-оператора следует использовать комбинацию двух методов, а именно если изображение лица имеет наклон менее 30 градусов, то будет использоваться метод Виолы-Джонса, в других случаях применять нейронную сеть Хопфилда. При этом следует учитывать возможность проявления когнитивных искажений на фоне детектирования эмоций [5].

Задача распознавания эмоций находит широкий спектр приложений от непосредственно отслеживания эмоционального состояния человека на транспорте, в системах безопасности, до автоматизации исследований в медицине, социологии и психологии и т.п.

Выводы

Можно констатировать, что MAP является одной из наиболее распространенных метрик для задач обнаружения объектов на изображении. Она позволяет учитывать не только точность определения объектов, но и их полноту, а также варьирующийся порог вероятности появления объекта на изображении. Все описанные достоинства данной метрики делают ее наиболее предпочтительной для оценки качества распознавания эмоционального состояния человека – оператора.

Список литературы

1. Василова Е.В., Власов А.И., Евдокимов Г.М. Невербальные коммуникации животного мира: системный анализ жестовых языков // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 5-3(59). С. 14-23.
2. Василова Е.В., Власов А.И., Евдокимов Г.М. Невербальные коммуникации животного мира: картирование элементов жестовых языков // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 6-3(60). С. 102-110.
3. Власов А.И., Конькова А.Ф. Медико-диагностические экспертные системы для оценки адекватности адаптивной реакции организма на воздействие экстремальных факторов // Конверсия. 1995. № 9-10. С. 18-21.
4. Власов А.И., Ларионов И.Т., Орехов А.Н., Тетик Л.В. Система автоматического распознавания эмоционального состояния человека // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. №5. С. 33-50.
5. Кожаринов А.С., Кириченко Ю.А., Афанасьев И.В., Власов А.И., Лабуз Н.П. Методы анализа когнитивных искажений и концепция автоматизированной интеллектуальной системы их детектирования // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2022. Т. 24. № 4. С. 38-74.
6. Абдулаев А.Б., Власов А.И., Фатхутдинов Т.М. Автоматизированная нейросетевая система анализа эмоционального состояния человека-оператора // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2023. Т. 25. № 2. С. 41-57.
7. Адамова А.А., Зайкин В.А., Гордеев Д.В. Методы и технологии машинного обучения и нейросетевых технологий в задачах компьютерного зрения // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 4. С. 25-39.

Metrics for assessing the quality of recognition of the emotional state of a person - operator

postgraduate student, Fatkhutdinov T.M.¹ (SPIN: 1391-7708),

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
Fatkhutdinovtm@gmail.com

Abstract: The paper deals with the problems of detecting the emotional state of a human operator. The main attention is paid to the definition of metrics for assessing the quality of recognition of a person's emotional state. Recommendations are given on the use of metrics that allow taking into account not only the accuracy of object definition, but also their completeness, as well as a varying threshold for the probability of an object appearing in an image.

Keywords: image recognition, metrics, emotion detection.

Монте-Карло моделирование регистрации тепловых нейтронов сцинтилляционными счетчиками на базе $ZnS(Ag):^6LiF$

стажер-исследователь, аспирант, Бучный Д.А.^{1,2},
научный сотрудник, к.ф.-м.н., Литвин В.С.¹,
младший научный сотрудник, Трунов Д.Н.¹,
научный сотрудник, Марин В.Н.¹,
младший научный сотрудник, Аксенов С.Н.¹,
ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н., Садыков Р.А.¹

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва
dbuchnyy@yandex.ru

Аннотация: При помощи численного моделирования на основе методов Монте-Карло проведен анализ эффективности разработанных в ИЯИ РАН многослойных сцинтилляционных детекторов (счетчиков) нейтронов на основе $ZnS(Ag):^6LiF$. Поставлен ряд численных экспериментов для модели времяпролетного порошкового дифрактометра с регистрирующими кольцами, составленными из разработанных счетчиков с целью оценки разрешения возможной экспериментальной установки.

Ключевые слова: Монте-Карло- моделирование, сцинтиллятор, детектор нейтронов, импульсный источник нейтронов, нейтронная дифракция

Введение

В настоящее время методы Монте-Карло- моделирования широко используются при проектировании детекторов и экспериментальных установок в нейтронографии. Разработано программное обеспечение, специально предназначенное для симуляции нейтронооптических устройств. Работа с цифровым двойником позволяет сократить время разработки и подобрать подходящие характеристики детектирующей системы в соответствии с возложенными на нее задачами, а также упрощает интерпретацию результатов, полученных в ходе тестовых измерений.

В ИЯИ РАН ведется разработка блока кольцевых детекторов, предназначенного для порошкового времяпролетного нейтронного дифрактометра. Блок детекторов составлен из линейных счетчиков на основе $ZnS(Ag):^6LiF$ и твердотельных фотоумножителей [1]. Сочетание компактности и эффективности данных приборов позволяет детектирующей системе одновременно регистрировать множество дифрактограмм в широком диапазоне переданных импульсов нейтронов. В представленной работе был осуществлен численный анализ эффективности и оценка разрешающей способности различных конфигураций линейных нейтронных счетчиков.

1. Блок кольцевых детекторов

Проектируемый блок нейтронных детекторов представляет из себя набор регистрирующих колец, окружающих исследуемый образец и центрированных на оси подаваемого пучка нейтронов. Каждое кольцо составлено из линейных сцинтилляционных счетчиков нейтронов (рис. 1). В ходе моделирования рассматривался линейный счетчик, включающий в себя три слоя материала сцинтиллятора на основе 6Li толщиной 0.5 мм, разделенные двумя слоями световода из органического стекла (ПММА) толщиной 1.75 мм каждый [2]. При этом важно учитывать, что 8% массы ПММА-световода составляет водород, обладающий высоким показателем сечения некогерентного рассеяния нейтронов, что приводит к искажению нейтронных траекторий внутри счетчика

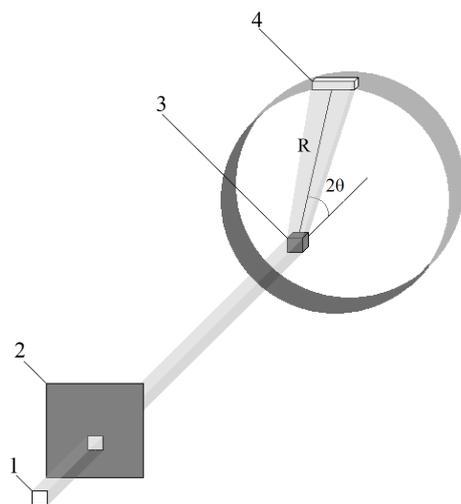


Рис. 1. Конфигурация кольцевого модуля блока детекторов:
1 - поверхность замедлителя нейтронов, 2 - коллимирующая щель, 3 - порошковый образец, 4 - рассматриваемый в ходе моделирования линейный счетчик.

2. Основные результаты моделирования

При моделировании был воспроизведен как процесс прохождения слоистой структуры отдельного сцинтилляционного счетчика потоком нейтронов, так и полноценный эксперимент по нейтронной дифракции на образце кубического поликристаллического алмаза (карбонадо) с участием счетчика в качестве составляющей блока детекторов. На рис. 2 приведена полученная в ходе симуляции эффективность регистрации рассеянных на условном образце нейтронов счетчиком в зависимости от его ориентации относительно подаваемого на образец пучка и угла рассеяния.

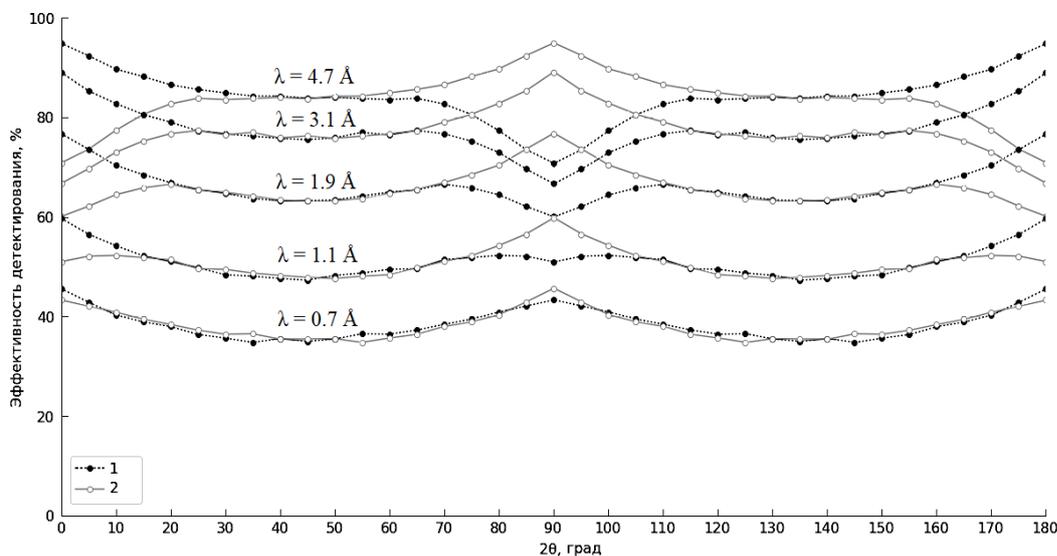


Рис. 2. Зависимость от угла дифракции 2θ эффективности регистрации нейтронов счетчиками с перпендикулярной (1) и параллельной (2) оси пучка ориентацией плоскостей сцинтиллятора для нейтронов с различной длиной волны (λ).

Для анализа разрешающей способности проектируемой экспериментальной установки в процессе численного эксперимента по рассеянию тепловых нейтронов от импульсного источника на образце карбонадо были получены времяпролетные спектры. Оценка разрешения дифрактометра производилась за счет измерения ширины на полувысоте брэгговских пиков, при этом разрешающая способность варьировалась в пределах 2.0-7.6% в зависимости от угла дифракции регистрируемых нейтронов.

Выводы

В результате серии численных экспериментов по порошковой времяпролетной дифракции нейтронов от импульсного источника на образце поликристаллического алмаза получена оценка разрешения и эффективности линейных сцинтилляционных счетчиков нейтронов на основе $\text{ZnS}(\text{Ag}):^6\text{LiF}$ как элементов блока кольцевых детекторов при углах рассеяния нейтронов от 30° до 150° градусов. Полученные данные позволяют формулировать рекомендации при проектировании порошкового дифрактометра и предоставляют дополнительные возможности для интерпретации получаемых в дальнейшем экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

Список литературы

1. Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Литвин В.С., Аксенов С.Н., Столяров А.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, №18. С. 96.
2. Бучный Д.А., Литвин В.С., Трунов Д.Н., Марин В.Н., Аксенов С.Н., Садыков Р.А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. №12. С. 38-47.

Monte Carlo simulation of neutron detection by scintillation counters based on $\text{ZnS}(\text{Ag}):^6\text{Li}$

Trainee Researcher, Buchnyy D.A.^{1,2},
Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences., Litvin V.S.¹,
Junior Researcher, Trunov D.N.¹,
Researcher, Marin V.N.¹,
Junior Researcher, Axenov S.N.¹,
Leading Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Sadykov R.A.¹

¹Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow
dbuchnyy@yandex.ru

By the means of Monte Carlo simulation we analyzed the efficiency of multilayer neutron scintillation detectors (counters) based on $\text{ZnS}(\text{Ag}):^6\text{LiF}$ developed at INR RAS. A number of numerical experiments were carried out for a model of a time-of-flight powder diffractometer with detecting rings composed of the developed counters in order to assess the resolution of a possible experimental setup.

Keywords: Monte Carlo simulation, scintillator, neutron detector, pulsed neutron source, neutron diffraction.

Машинное обучение в первичной обработке данных отечественного секвенатора

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Бородинов А.Г. (ORCID: 0000-0001-8952-1715)
заведующий лабораторией, д.т.н., Маноилов В.В. (SPIN: 8414-5867)
старший научный сотрудник, к.т.н., Заруцкий И.В. (SPIN: 2835-0552)
ведущий электроник, к.т.н., Петров А.И. (ORCID: 0000-0002-1339-0429)
руководитель научного направления ИАП РАН, д.т.н., Курочкин В.Е. (SPIN: 1868-9326)
инженер 1 категории, аспирант, Сараев А.С.

Институт аналитического приборостроения, Санкт-Петербург
alex.niispb@yandex.ru

Аннотация: В Институте аналитического приборостроения РАН разрабатывается аппаратно-программный комплекс (АПК) для расшифровки последовательности нуклеиновых кислот методом массового параллельного секвенирования (Нанофор СПС). Алгоритмы обработки изображений, входящие в состав АПК, играют существенную роль в решении задач расшифровки генома. Финальной частью такого предварительного анализа сырых данных является процесс base-calling. Рассмотрены возможные подходы машинного обучения для создания и оценки моделей, реализующих этап обработки base-calling. В работе показана возможность применения различных алгоритмов машинного обучения на основе платформы Scikit-learn. Отдельной важной задачей является оптимальное выделение признаков в обнаруженных кластерах. На ряде данных секвенирования для приборов MiSeq Illumina и Нанофор СПС показана перспективность метода машинного обучения для решения задачи base-calling.

Ключевые слова: секвенирование нового поколения, base-calling, биоинформатика, машинное обучение.

Введение

В последние годы силами Института аналитического приборостроения и ООО «Синтол» создана линейка отечественных приборов для молекулярно-генетического анализа, обеспечивающая проведение всех этапов исследования секвенирования ДНК [1]. В частности, разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) для расшифровки последовательности нуклеиновых кислот (НК) методом массового параллельного секвенирования «Нанофор СПС». Алгоритмы обработки информации, получающейся в ходе секвенирования АПК, играют существенную роль в решении задач расшифровки генома [2].

Целью настоящей работы является анализ возможностей алгоритмов машинного обучения для решения задачи получения буквенной последовательности нуклеотидов из изображений, формируемых в процессе работы секвенатора, а также оценка достоверности получаемых последовательностей нуклеотидов.

1. Постановка задачи

Основания нуклеотидов флуоресцентно помечены в процессе высокопроизводительного секвенирования (NGS), и для каждого из четырех оснований А, С, G и Т в различных каналах флуоресценции создаются отдельные изображения [2]. Каналы флуоресценции различаются длинами волн возбуждающего сигнала. Изображения для каждого канала далее обрабатываются для идентификации т.н. кластеров и их характеристик [3].

Base-calling — это процесс определения нуклеотидного основания, которое генерирует соответствующее значение интенсивности в каналах А, С, G и Т. Существует неопределенность при проведении процедуры base-calling, поэтому соответствующая оценка качества присваивается каждому выбранному основанию. К настоящему времени сложилось множество методов решения задач base-calling. Их детальный обзор приведен в

работе [4]. Там же приведена обобщённая модель base-calling, предполагающая вариативность реализаций для непосредственной реализации в составе секвенатора. В начале 2010-х годов были попытки применения машинного обучения для этой задачи [5]. Однако, дело ограничивалось применением SVM классификатора, метод требовал огромного количества данных для обучения и не показывал преимущества перед методами с формально определенными моделями эффектов cross-talk и phasing/pre-phasing.

С этих пор прошло достаточное время для усовершенствования самой методики эксперимента. Вследствие этого, с одной стороны, возросло качество обработки первичных изображений, с другой стороны, значительно подросла производительность вычислительных ресурсов, зрелость и юзабилити реализаций методов машинного обучения. Часть применений методов машинного обучения приобрела закрытый корпоративный характер и доступна для ознакомления только в виде патентов [6]. Большая часть применений машинного обучения сосредоточена в сфере решений биоинформационных задач вторичного этапа анализа данных [7]. Поэтому разработка адекватных реализаций методов машинного обучения в задачах первичного анализа в составе отечественного секвенатора кажется особенно актуальным.

2. Отбор признаков для обучения

Считаем, что в ходе первичного анализа пройден этап идентификации кластеров [2]. Положения и оценённые радиусы обнаруженного кластера используются для извлечения ряда характеристик каждого кластера и его непосредственно окружающего фона. Эти характеристики затем используются в качестве атрибутов, то есть служат входными данными для алгоритмов машинного обучения. Вычисляются восемь статистических показателей: четыре для фона (background, BG) и четыре для сердцевины кластера (foreground, FG). Этот процесс показан на рис. 1.

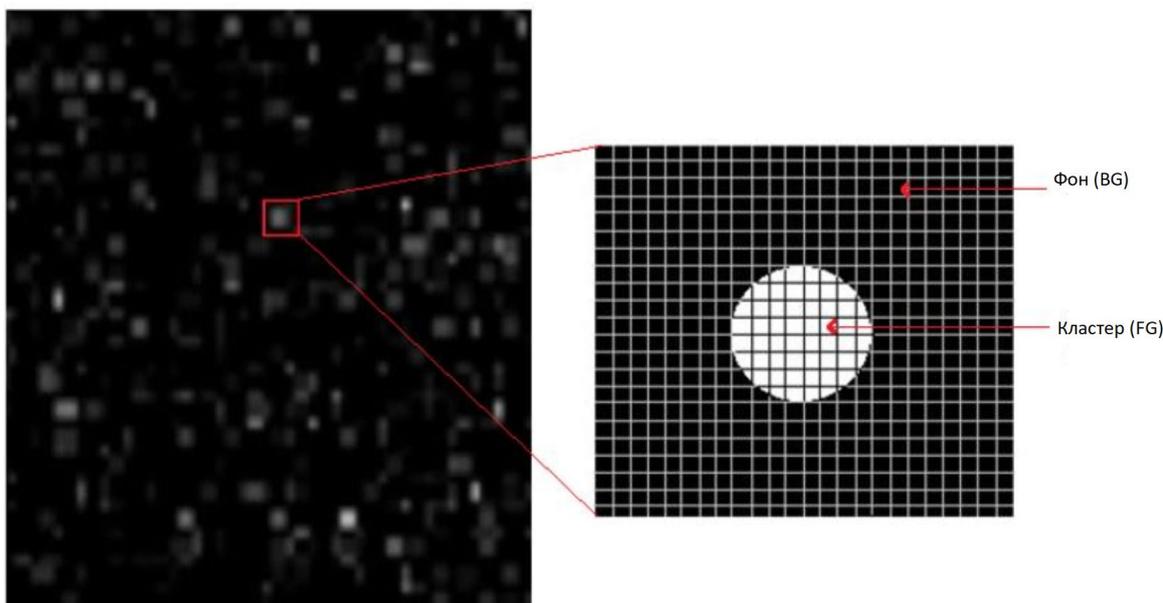


Рис. 1. Отбор признаков из “сырых” данных секвенирования NGS.

Извлекаются следующие статистические показатели: для фона (background) - max, mean, median и mode, для центральной зоны кластера (foreground) - max, mean, pct90 и pct99, где max - максимальное значение интенсивности, mean — среднее арифметическое значение, mode — наиболее часто встречающееся значение, pct90 и pct99 — 90-й и 99-й процентиля, соответственно. Каждый набор изображений, используемых для процесса base-calling одного цикла, состоит из четырех изображений, по одному для каждого канала флуоресценции. В итоге, для каждого кластера имеется в общей сложности тридцать два

статистических показателя, которые используются в качестве атрибутов в алгоритмах машинного обучения.

3. Машинное обучение в задаче base-calling

Для применения различных алгоритмов машинного обучения используется платформа Scikit-learn [6], тесно интегрированная с языком Python. Основным объектом является estimator, который реализует метод fit, отвечающий за подгонку модели на обучающей выборке. Классы модели, принадлежащие классу методов обучения с учителем, также реализуют метод predict, обеспечивающий прогноз по обучающей выборке. Некоторые наследники класса estimator имеют метод transform, который позволяет менять входные данные модели. Класс estimator в общем случае реализует метод score, обеспечивающий оценку метрики качества. Полезным классом Scikit-learn является cross-validation iterator, предоставляющий разнообразные методы скользящего контроля.

Различные методы машинного обучения были апробированы на разных наборах данных секвенирования, таких как, набор индексов, небольшие ампликоны, данные секвенирования эталонного референсного генома Phix174. Обработываемые данные были получены на приборе MiSeq фирмы Illumina (США) и на опытном образце отечественного прибора «Нанофор СПС». Для машинного обучения на данных секвенирования использовались следующие методы:

- логистическая регрессия (logit model) с различными видами регуляризации;
- метод опорных векторов (support vector machine);
- деревья принятия решений (decision tree);
- случайные леса (random forest).

Типичный отчет со сравнением точности прогноза правильной буквы в нуклеотидной последовательности представлен на рис.2 (где box-plot диаграмма в удобной форме показывает медиану, среднее, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки и выбросы). Подобные диаграммы дают наглядное представление о совокупности распределения интенсивностей кластеров и шумовой составляющей в их окрестности по всем каналам флуоресценции и позволяют отобрать набор признаков, отвечающих за разделение интенсивностей в кластерах по каналам.

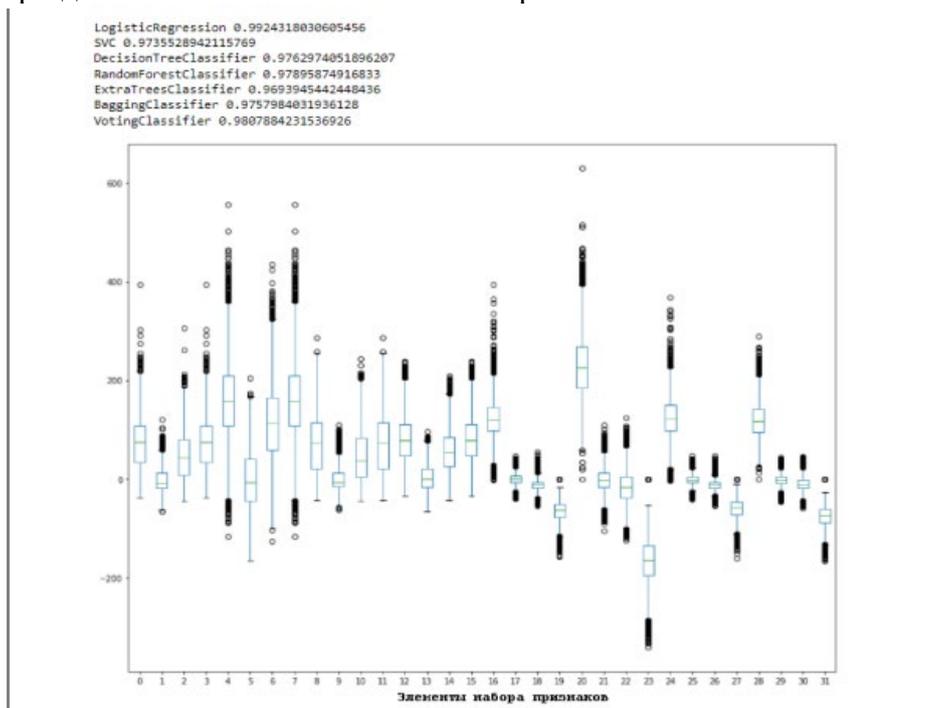


Рис. 2. Отчет сравнения точности предсказания методами машинного обучения с соответствующей box-plot диаграммой.

Точность правильных предсказаний в процессе base-calling, полученных на приборе MiSeq фирмы Illumina (США) и на опытном образце отечественного прибора «Нанофор СПС», оказалась практически идентичной. Наибольшую вероятность правильного предсказания показал метод логистической регрессий. Для логистической регрессии для повышения точности предсказания на тестовом наборе была использована L1-регуляризация (lasso regularization). Прогноз, полученный методом Decision Tree, позволяет путем анализа узлов дерева решений выделить наиболее значащие для прогнозирования признаки и снизить количество обрабатываемой информации.

Выводы

Методы машинного обучения для обработки информации при построении последовательностей нуклеотидов в задаче base-calling показали несомненную перспективность. Для выделения особо значимых признаков перспективны методы на основе деревьев решений (Decision Tree), методы с регуляризацией L1. Приведенные результаты применения разнообразных моделей машинного обучения к решению задачи base-calling показали на тестовой выборке точность 97...99.5% в сравнении с последовательностями нуклеотидов в референсных геномах.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, номер гос. регистрации 122032300337-4 от 23.03.22.

Список литературы

1. Курочкин В.Е., Алексеев Я.И., Петров Д.Г., Евстапов А.А. Отечественные приборы для молекулярно-генетического анализа: разработки ИАП РАН и ООО «Синтол» // Известия Российской Военно-медицинской академии. Том 40 №3. 2021. С. 69-74.
2. Манойлов В.В., Бородин А.Г., Сараев А.С., Петров А.И., Заруцкий И.В., Курочкин В.В. Алгоритмы обработки изображений в секвенаторе ДНК Нанофор СПС // Журнал технической физики. Том 92 №7. 2022. С. 985-992.
3. Manoilov V.V., Borodinov A.G., Petrov A.I., Zarutsky I.V., Kurochkin V.E. Algorithms of processing fluorescence signals for mass parallel sequencing of nucleic acids // Trudy SPIIRAN - SPIIRAS Proceedings. vol. 18. no. 4. 2019. pp. 1010–1036.
4. Borodinov A. G., Manoilov V. V., Zarutsky I. V., Petrov A. I., Kurochkin V. E., Saraev A. S. Machine learning in base-calling for next-generation sequencing methods // Informatics and Automation. vol. 21. no. 3. 2022. pp. 572-603.
5. Kircher M., Stenzel U., Kelso J. Improved base calling for the Illumina Genome Analyzer using machine learning strategies // Genome biology. vol. 21. no. 10. 2009. pp. 1-9.
6. Jaganathan Kishore, John Randall Gobbel, K. I. A. Amirali. Artificial Intelligence-Based Base Calling. U.S. Patent Application No. 16/826,126.
7. Schmidt B., Hildebrandt A. Deep learning in next-generation sequencing // Drug discovery today. vol. 26. no. 1. 2021. pp. 173-180.

Machine learning in the primary data processing of the domestic sequencer

Senior Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Borodinov A.G.

Head of laboratory, Doctor of Engineering degree, Manoilov V.V. (SPIN: 8414-5867)

Senior Researcher, Ph.D. in Technology, Zarutsky I.V. (SPIN: 2835-0552)

Leading Researcher, Ph.D. in Technology, Petrov A.I.

Head of scientific department of the IAI RAS, D.Eng, Kurochkin V.E. (SPIN: 1868-9326)

Engineer of the 1 category, post-graduate student, Saraev A.S.

The Institute for Analytical Instrumentation of the of RAS, St. Petersburg
alex.niispb@yandex.ru

Abstract: The Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences is developing a hardware-software complex for deciphering nucleic acid sequences by the method of mass parallel sequencing (Nanofor SPS). Image processing algorithms play an essential role in solving the problems of genome deciphering. The final part of this preliminary analysis of raw data is the base-calling process. Possible machine learning (ML) approaches for creating and evaluating models that implement the base-calling processing stage are considered. The paper shows the possibility of using various machine learning algorithms based on the Scikit-learn platform. A separate important task is the optimal selection of features identified in the detected clusters on a flow cell for machine learning. Finally, a number of sequencing data for the MiSeq Illumina and Nanofor SPS devices show the promise of the machine learning method for solving the base-calling problem.

Keywords: next-generation sequencing, base-calling, bioinformatics, machine learning.

Обработка многомерных данных и их оптимизации для задач оптической визуализации

аспирант 2 года обучения, Грачев М.В. (SPIN: 6829-1289),
старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. Чуриков Д.В. (SPIN: 2236-5778)

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
maxgra98@yandex.com
cdv@ntcup.ru

Аннотация: В докладе проводится обзор различных методов оптимизации обработки многомерных данных для оптической визуализации с помощью машинного обучения. Особое внимание уделяется изучению применения базисных методов машинного обучения (обучение с учителем, без учителя, полу-обучение) для оптимизации данных и повышения эффективности способов их обработки. В частности, предлагаются алгоритмы Structure from Motion (SfM) и Stereo Vision, которые могут быть применены для улучшения процесса обработки многомерных данных. Также, рассматривается использование параллельных вычислений, алгоритмов сжатия данных, оптимизации алгоритмов цифровой обработки данных и графических процессоров (GPU). Проведено сравнение эффективности различных подходов к оптимизации обработки данных в различных приложениях оптической визуализации. Это поможет выбрать наиболее подходящий метод для конкретной задачи. В заключении подведены итоги и предложены возможные направления дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: фотограмметрия, многомерные данные, машинное обучение, алгоритмы обработки данных, методы оптимизации

Список литературы

1. Ni, X. et al. Three-dimensional photogrammetry with deep learning instance segmentation to extract berry fruit harvest ability traits // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2021. Vol. 171. P. 297-309.
2. Zhong, W., Dong, X. Camera calibration method of binocular stereo vision based on OpenCV // AOPC 2015: Image Processing and Analysis. SPIE. 2015. Vol. 9675. P. 571-576.
3. Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // Geomorphology. 2012. Vol. 179. P. 300-314.

Методика оценки засоренности семенного материала с помощью нейросетевой обработки гиперспектральных данных

инженер, Нестеров Г.В.^{1,2}
инженер-исследователь, Золотухина А.А.^{2,3} (SPIN: 5955-1186)
научный сотрудник, к.т.н., Гурылева А.В.^{2,3} (SPIN: 2873-8095)
заведующий лабораторией прецизионных технологий в сельском
хозяйстве, к.с.-х.н., Фомин Д.С.⁴ (SPIN: 2550-4918)

¹Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

³Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

⁴Пермский НИСХ филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН
goshanesteroff@gmail.com

Аннотация: Качество посевного материала определяется его засоренностью сорными и зерновыми примесями, для оценки процентного содержания которых наиболее распространены методы визуальной оценки, электрофореза и ПЦР-анализа. Более производительным методом оценки засоренности зерна может стать гиперспектральная визуализация на основе обработки данных нейросетевыми технологиями. Настоящая работа посвящена разработке методики автоматизированного выявления зерновых примесей с помощью нейросетевой обработки данных, полученных акустооптическим гиперспектрометром. Предусмотренное методикой выделение наиболее информативных спектральных каналов обеспечивает высокую скорость обработки. В результате апробации на семенном материале с известным процентом засоренности обученная модель на выделенных спектральных признаках показала точность классификации 92,6%.

Ключевые слова: засоренность, зерновые примеси, гиперспектральные данные, машинное обучение.

Введение

Пшеница – самая распространённая зерновая культура, которая богата углеводами, белками и растительными жирами. Её посевы занимают около 30% от объема производства зерновых культур и снабжают продовольствием более половины населения [1]. При посеве в семенной материал могут попасть зерна других культур или сорные примеси, что снижает количество урожая, пищевую ценность выходного продукта и потенциальную вместимость зернохранилища.

В настоящее время оценка засоренности семенного материала происходит визуальным методом, что в большей степени зависит от опыта оператора. Электрофорез и ПЦР-анализ белков являются более современными методами, однако требуют высококвалифицированного персонала и специального лабораторного оборудования. С развитием доступности технологий гиперспектральные камеры начали активно применять в решении задач агропромышленного комплекса, в частности, для дифференциации зерновых культур [2], однако предложенные методы были ориентированы на разработку конвейера с отдельными кюветами под каждое зерно, что является малопродуктивным.

Данное исследование посвящено разработке более эффективного метода определения засоренности зерна по гиперспектральным данным на основе модели машинного обучения.

Материалы и методы

В исследовании были использованы семена разных сортов яровой пшеницы и ячменя, выращенные на территории землепользования Пермского НИИСХ филиала ПФИЦ УрО

РАН. Регистрация спектральных изображений проводилась акустооптическим видеоспектрометром (АОВС), разработанным в НТЦ УП РАН [3], с временем экспозиции 70 мс в диапазоне 460 – 820 нм с шагом 2 нм. В качестве источника освещения использовалась галогенная лампа (Dedolight DLH4, 150 Вт). Захват спектральных данных двух кювет, наполненных зернами пшеницы и ячменя, был проведен в пятикратной повторности. Дополнительная съемка была проведена для проверки прогностической способности обученной модели в близких к практике условиях анализа вороха семян. В чашку Петри были помещены сто семян пшеницы, постепенная замена которых ячменем позволила смоделировать 1-3 % засоренности вороха.

Предварительная обработка полученных кадров включала устранение шумов и артефактов на изображениях путем медианной фильтрацией и фильтром Гаусса. Устранение виньетирования и неравномерности освещенности проводилось путем дополнительной съемки в тех же условиях белой однородной диффузной пластины, после чего полученное изображение использовалось как референс, попиксельное деление на который устраняет вышеупомянутые неоднородности изображения. Обучающий и тестовый набор спектров был получен путем выделения зерен бинарной маской и последующего получения спектра в каждом выделенном пикселе.

Для анализа полученных спектров была использована архитектура нейронной сети долгой краткосрочной памяти [4]. Данная архитектура основана на выделении важных признаков последовательностей с прогнозированием последующего значения, что дает возможность определения принадлежности спектра к тому или иному классу. Использование полного спектра сильно увеличивает время накопления данных и не несёт в себе большую информативность, из-за большой коллинеарности спектральных признаков. Вклад в межклассовую дисперсию соседних длин волн мал, поэтому было проведено выделение информативных длин волн методом CARS [5].

Результаты

В исследованиях использовали два сорта пшеницы, Награда и Тима, и два сорта ячменя, 120-17 и Родник Прикамья, имеющих одинаковое время посева, и, как следствие, возможность попадания семян одной культуры в массу семян другой, а также схожие морфологические признаки. В процессе обработки были выделены 12 информативных длин волн, по которым была обучена нейросеть. В результате были получены карты классификации (рис. 1), выделение связных объектов на которых позволяет определить процент засоренности. Статистический анализ результатов показал точность классификации модели 92,6 %.

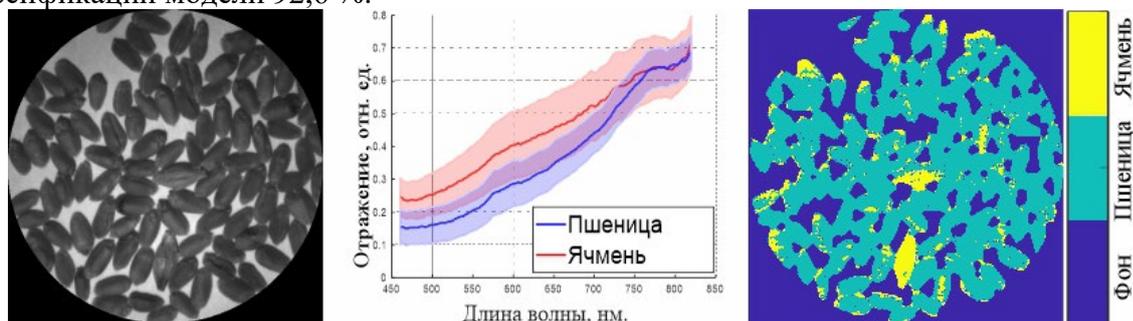


Рис. 1. Спектральное изображение семенного материала на длине волны 700 нм (слева), усредненные спектры двух видов культурных семян (посередине) и результат классификации (справа).

Выводы

Данное исследование посвящено разработке метода для определения степени засоренности семенного материала злаковых культур с использованием гиперспектральной съемки и методов машинного обучения. В рамках работы был

разработан протокол регистрации спектральных данных и алгоритм их обработки. Кроме того, в рамках предложенной методики производится выделение наиболее информативных спектральных каналов, что позволяет сократить объем данных, время регистрации изображений и требования к вычислительным мощностям для их обработки. Модель, обученная на спектральных снимках семян с использованием определенных информативных длин волн, определяет зерновую примесь с точностью 92,6%.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010). Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования НТЦ УП РАН.

Список литературы

1. Тимошенкова Т.А., Самуилов Ф.Д. Адаптивность разных экологических групп сортов ячменя и пшеницы мировой коллекции вир в степи оренбургского предуралья // Вестник Казанского государственного аграрного университета. Вып. 26. 2012. С. 120–125.
2. Serranti S., Cesare D., Bonifazi G. Hyperspectral-imaging-based techniques applied to wheat kernels characterization // Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety IV. Вып. 8369. 2012. С. 83690Т.
3. Pozhar V.E. et al. AOTF based hyperspectrometer for UAV // Light & Engineering. Вып. 4. 2018. С. 47–50.
4. Greff K. et al. LSTM: A Search Space Odyssey // IEEE Trans Neural Netw Learn Syst. Вып. 10. 2017. С. 2222–2232.
5. Li H. et al. Key wavelengths screening using competitive adaptive reweighted sampling method for multivariate calibration // Anal. Chim. Acta. Вып. 1. 2009. С. 77–84.

Grains impurity assessment using neural network processing of hyperspectral data

Engineer, Nesterov G.V.^{1,2}

Research Engineer, Zolotukhina A.A.^{2,3} (SPIN: 5955-1186)

Researcher, Ph.D. of Engineering degree, Guryleva A.V.^{2,3} (SPIN: 2873-8095)

Head of the Precision Technologies in Agriculture Laboratory, Ph.D. of Agricultural Sciences, Fomin D.S.⁴ (SPIN: 2550-4918)

¹Moscow Power Engineering Institute, Moscow

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow

³Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

⁴Perm Research Institute of Agriculture, Perm Krai, Perm Region
goshanesteroff@gmail.com

Abstract: The quality of seed material is determined by its contamination with weeds and grain impurities, and the most common methods for assessing the percentage content of these impurities are visual assessment, electrophoresis, and PCR analysis. Hyperspectral visualization based on data processing using neural network technologies can become a more efficient method for assessing grains impurity. In this paper, we propose an automated method for detecting grain impurities using a neural network and a hyperspectrometer based on an acousto-optic tunable filter. The method includes the extraction of the most informative spectral channels, which ensures high processing speed. As a result of testing on seed material with a known percentage of impurity, the trained model demonstrated a classification accuracy of 92,6% on the selected wavelengths.

Keywords: grains impurity, hyperspectral data, machine learning.

Разработка морфологического анализатора узбекского языка

докторант, КарГУ, Боймуродов Ф.Ф.

Каршинский государственный университет

farruxboymurodov96@gmail.com

Аннотация: Алгоритмы синтеза и анализа словоформ узбекского языка разработаны на основе принципов деления существительных, прилагательных и глаголов на флективные классы исходя из поставленной задачи. Поскольку узбекский язык является агглютинативным, для автоматизации морфологического анализа нецелесообразно подключать словарь словоформ. Гораздо эффективнее использовать словарь аффиксов и набор правил. В процессе написания тезис была создана и алгоритмически реализована морфологическая модель узбекского языка. В частности, словари организованы по флективным классам существительных, прилагательных и глаголов.

Ключевые слова: генерация, стемматизация, Портера, аффикс, суффикс.

Введение

Процесс информирования общественности становится требованием современности. Все сферы деятельности человека неразрывно связаны с процессами получения, обработки и усвоения информации. Сегодня компьютерные и информационные технологии становятся основой нашей повседневной жизни, поскольку они быстро обновляются, изменяются и развиваются. В то же время Узбекистан постепенно входит в систему оцифровки. В связи с этим развитие компьютерной лингвистики является актуальной задачей.

Целью тезис является введение узбекского языка в компьютерную лингвистику, разработка эффективного способа усвоения основных понятий, морфологического образования узбекского языка.

1. Морфологическая основа узбекского языка характеризуется большим разнообразием аффиксов, добавляющихся к основе слова в определенной последовательности и придающих ему самые разные характеристики, а также огромным количеством глагольных форм, позволяющих создавать до 150-200 вариантов, отличающихся по смыслу, порой, кардинально, но при этом образованных от одного глагола. Программные средства, которые автоматически находят нужные словоформы в изучаемых текстах, являются важным помощником в проведении лингвистических исследований.

Диалект - помогает людям, живущим в определенном районе, взаимодействовать друг с другом. В узбекском языке диалект отличается от литературного языка более или менее фонетически, лексически и грамматически. Есть только устная форма народных диалектов. Набор тесно связанных диалектов называется диалектом (диалект - это сочетание диалектов и диалектов). В узбекском языке три диалекта:

1. Карлукский диалект (юго-восточная группа).
2. Кипчакский диалект (юго-западная группа).
3. Огузский диалект (северо-западная группа).

Узбекский - тюркский язык карлукской группы, который относится к категории синтетических агглютинативных языков и имеет богатую и сложную морфологию. Как и в других тюркских языках, слово состоит из основы, к которой прикреплены суффиксы, обозначающие различные грамматические особенности.

Карлукский диалект в основном включает городские диалекты (Ташкентский, Андижанский, Ферганский, Бухарский). Важными фонетическими и морфологическими особенностями этих диалектов являются:

- 1) Буква “к” в конце слова произносится как “у” : *elak - elay, terak - teray*.
- 2) есть деление: *aka - oka, Akram - Akrom*.
- 3) в форме винительного падежей, “-ni” : *ukamni daftari* - тетрадь моего брата.

Узбекский язык включает ряд диалектов, такие диалекты с этнолингвистической точки зрения он объединен в три основных диалекта - карлукский, кипчакский и огузский. Естественно, что эти три диалекта приняли участие в формировании современного узбекского литературного языка.

При изучении языка большое значение имеет способность правильно понимать структуру слова и определять его компоненты. Слово отражает структурные особенности языка, его лексико-семантические и функционально-грамматические законы. По своей типологии и морфологической структуре узбекский язык значительно шире обычных выражений и отличается относительной регулярностью, позиционной и грамматической устойчивостью морфологической структуры различных словоформ. Слова образуются путем добавления грамматических частиц к основанию слов - аффиксов. Система проверяет в базе основ корень слова, полученного из предыдущего шага, если результат успешный, то алгоритм заканчивает свою работу. А если нет, то он сохраняет эту комбинацию аффиксов и возвращается к шагу №2. В шаге №2 он уже не будет использовать те аффиксы, то были сохранены в шаге №3. После нормализации для каждого слова осуществляется вычисление его морфологических характеристик и определяется морфологический класс основы и представляет пользователю.

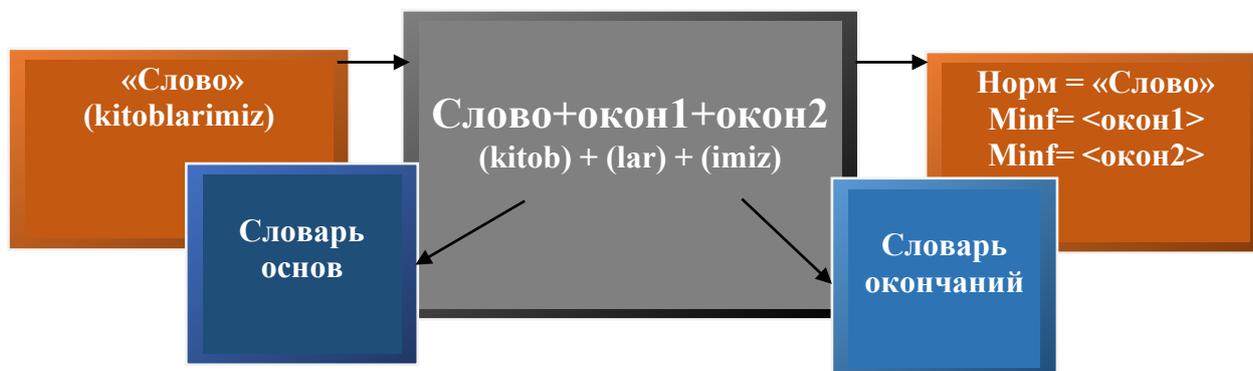


Рис. 1. Процесс определения нормальной формы слова и его морфологических параметров.

На вход подается словоформа, происходит поиск в словарях аффиксов *-lar*, *-imiz* и основы слова - *kitob*. На основе морфологического класса основы (существительное) и аффиксов вычисляем морфологическую информацию: *-lar* «множественное число», *-imiz* «притяжательное окончание».

Выводы

Результатом этой тезис является электронная система для изучения и обучения узбекскому языку, которая может работать в локальных и глобальных сетях и должна выполнять следующие задачи:

- знакомство с курсами узбекской грамматики;
- разработать системную базу данных на основе собранных данных;
- разработка интерфейса пользователя и менеджера;
- разработка пользовательских и управляющих модулей;
- организация системного управления;
- разработка системного дизайна;

Когда мы говорим, что программа для создания слов на узбекском языке является научной новинкой, мы имеем в виду, что она была создана с использованием новых технологий, а также имеет следующие преимущества при использовании морфологических систем. Система обладает следующими удобствами и преимуществами:

- любой пользователь системы может пользоваться системой через Интернет;
- не требует программного обеспечения от пользователя, использующего систему;
- удобный интерфейс, позволяющий пользователям без специальной подготовки;

- предоставить любому пользователю хотя бы некоторые навыки узбекской грамматики;

Вид приложения показан на рисунке ниже. На разделе нашего меню посвящен созданию словоформ имена существительные (Генератор существ-ных). Пользователи должны ввести слово при использовании приложения. Наша программа предлагает все формы слова, в зависимости от значения слова. В основе нашей программы - суффиксы, составляющие целую словосочетание узбекского языка. Это наиболее распространенные случаи на узбекском языке. На узбекском языке большинство имен существительных создаются в основном с использованием определенных суффиксов.

Список литературы

1. Барахнин В.Б., Федотов А.М., Бакиева А.М., Бакиев М.Н. Тажибаева С.Ж., Батура Т.В., Кожемякина О.Ю., Тусупов Д.А., Самбетбаева М.А., Лукпанова Л.Х. Алгоритмы генерации и стемматизации словоформ казахского языка // Cloud of Science. – 2017. – Т. 4. – № 3. – С. 434-449. <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-generatsii-i-stemmatizatsii-slovoform-kazahskogo-yazyka/viewer>
2. Барахнин В.Б., Федотов А.М., Бакиева А.М., Бакиев М.Н., Тажибаева С.Ж., Батура Т.В., Кожемякина О.Ю., Тусупов Д.А., Самбетбаева М.А., Лукпанова Л.Х. Алгоритмы генерации и стемматизации словоформ казахского языка // Cloud of Science. - 2017. - Т.4. - № 3. - С.434-449. - EISSN 2409-031X. - https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_15_434.pdf
3. Эшкараева Н.Г, Боймуродов Ф.Ф Разработка и реализация алгоритма стемматизации и генерации словоформ для глаголов узбекского языка. http://qarshidu.uz/source/JURNAL/Aniq_fanlar_5-son_2022.pdf
4. Боймуродов.Ф., Algorithm development and implementation stemmatization and generation of word forms of uzbek language for automatic processing systems texts,

Разработка метода изучения вязкоупругих свойств биологических объектов в акустических и электромагнитных полях в рамках оболочечной модели

аспирант Орлов С.А.

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
sorloff0@gmail.com

Аннотация: В настоящее время активно изучается воздействие ультразвукового излучения на клетки: в частности, изучается возможность уничтожения раковых клеток. В тоже время наблюдается недостаток теоретического описания взаимодействия ультразвуковых волн и клетки, не проведен систематический анализ влияния пондермоторных сил на клетки и биологические объекты, который бы учитывал вязкоупругие свойства клеток, включая клеточную оболочку. Разработанный метод можно будет использовать для более полного теоретического описания процесса сонопорации, направленного транспорта лекарств через гематоэнцефалический барьер и воздействия ультразвука на деление клеток.

Ключевые слова: вязкоупругие свойства, пондермоторные силы, оболочечная модель.

Аналитическая модель, впервые представленная в статье [3], учитывает физические свойства клетки. Авторы отметили, что анализ оболочки произвольной формы

представляет значительные математические трудности, поэтому в этой статье ограничились рассмотрением колебаний сферической оболочки. Тот факт, что раковые клетки в момент деления становятся сферическими, был известен давно, но до последнего времени на него не обращали особого внимания. В своей работе я ставлю цель рассмотреть влияние деформации и напряжения на все гармоники, т.е. на первом этапе продолжится разработка модели взаимодействия пузырька с клетками в ультразвуковом поле (пузырек рассматривается как источник сферических волн), изучение собственных колебаний клетки. Это позволит затем разработать модель взаимодействия клетки и магнитной частицы в переменном магнитном поле. Магнитная частица будет рассматриваться как колеблющийся диполь. Полученные данные позволят разработать модель воздействия фокусированного пучка на клетки, а также провести моделирование поведения клеток в акустических и оптических пинцетах. Далее планируется использовать разработанные модели и методы для изучения вязкоупругих делящихся клеток и эмбрионов рыб.

Список литературы

1. Зинин П.В. Исследование частотной зависимости взаимодействия ультразвука с клетками. М. МФТИ, 1987.
2. Zinin, P. V., et al. (2005). "Mechanical resonances of bacteria cells." *Physical Review E* 72(6): 061907.
3. Zinin, P. V. and J. S. Allen (2009). "Deformation of biological cells in the acoustic field of an oscillating bubble." *Physical Review E* 79(2): 021910.

Developing a Method for Studying Viscoelastic Properties of Biological Objects in Acoustic and Electromagnetic Fields Within a Shell Model Framework

Ph.D. student, Orlov S.A.

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
sorloff0@gmail.com

Abstract: Currently, the effects of ultrasonic radiation on cells are being actively studied, in particular, the possibility of destroying cancer cells. At the same time, there is a lack of theoretical description of the interaction between ultrasonic waves and the cell, and there is no systematic analysis of the effect of ponderomotive forces on cells and biological objects, which would take into account the viscoelastic properties of cells, including the cell membrane. The developed method could be used for a more complete theoretical description of the sonoporation process, as well as for directed drug transport across the blood-brain barrier and the effect of ultrasound on cell division.

Keywords: viscoelastic properties, ponderomotive forces, shell model.

Исследование возможностей ультразвуковых методов высокого разрешения для визуализации и оценки атеросклеротического субстрата

аспирант Титов А.С.¹
заведующая лабораторией к.ф.-м.н. Петронюк Ю.С.^{1,2}

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

² Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля, Москва

alexander.serge.titov@gmail.com

Аннотация: Атеросклероз является причиной развития ишемических заболеваний сердечно-сосудистой системы, что приводит к преждевременному старению, сокращает продолжительность жизни человека. С помощью методов импульсной акустической микроскопии на частоте 50-100 МГц выполнены эксперименты на модельных образцах, близких по акустическим свойствам к натуральным тканям – мышечные волокна и жировой слой на полимерной подложке. Импульсным эхо-методом измерены акустические импедансы и скорость звука в модельных образцах. Данные экспериментальные исследования являются предварительными и ложатся в основу дальнейшей работы с биологическими тканями *in vitro*. Разработка диагностических возможностей ультразвуковой визуализации позволяет надеяться на повышение качества диагностики и лечения ишемических заболеваний.

Ключевые слова: акустическая микроскопия, ультразвуковая визуализация, атеросклероз.

Введение

Целью данного исследования является оценка акустических свойств модельного образца жировой и мышечной ткани с тем, чтобы на основе имеющейся техники ультразвуковой микроскопии предложить метод экспертной оценки патологоанатомических образцов атеросклеротических отложений, а также получить основу для дальнейшего изучения воздействия на них высокочастотного ультразвука (50-100 МГц).

Измерение

Для апробации методики было проведено измерение свойств материала с хорошо известным импедансом, в качестве которого была выбрана вода. На рис. 1 слева показано изображение капли воды, полученное через подложку из полистирола. На изображении видна четкая граница, разделяющая области воздуха и воды. Справа показана диаграмма, которая в полутоновом формате представляет развертку эхо-сигналов вдоль горизонтальной координаты в плоскости сканирования в зависимости от их времени задержки (вертикальная ось). На диаграмме виден сигнал A_1 – отраженный от верхней поверхности подложки, и сигналы A_R , A_S – отраженные от её нижней поверхности в области контакта с воздухом и водой, соответственно.

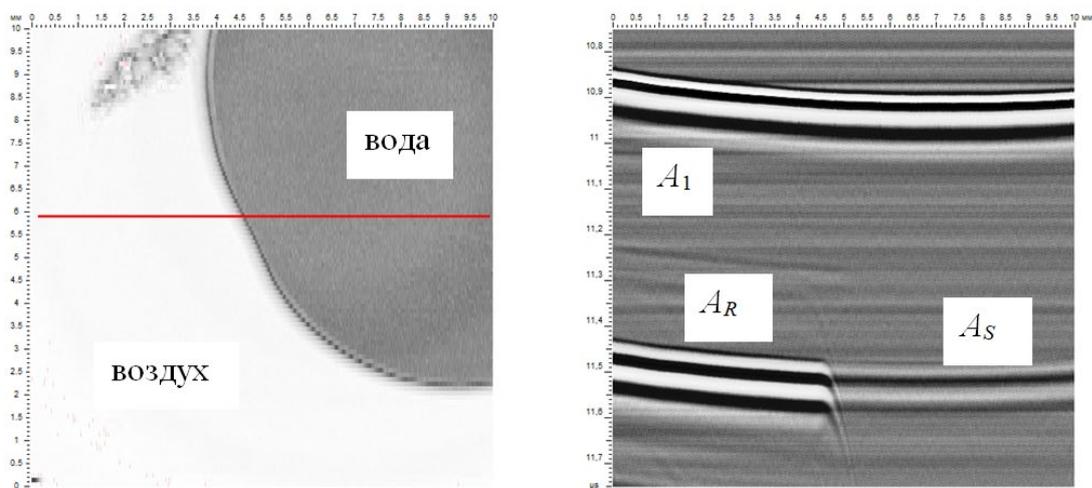


Рис. 1. Акустическое изображение капли воды через полистироловую подложку: слева – в горизонтальной плоскости сканирования, справа – развертка эхо-сигналов по

времени задержки (ось ординат) вдоль одной из горизонтальных координат (красная линия).

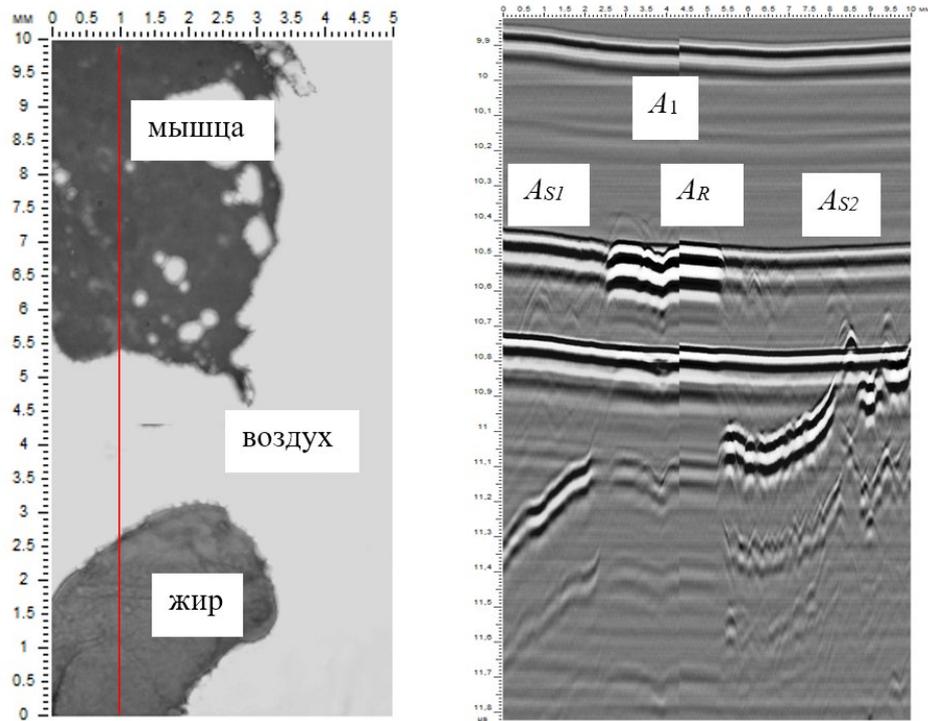


Рис. 2. Изображения жировой и мышечной ткани

На следующем этапе были проведены измерения на биологических фантомах мышечной и жировой ткани, заимствованной из свежего полуфабриката свиного окорока. Области контакта с подложкой жира и мышц отчетливо различаются по акустическому контрасту на изображении (рис. 2). На диаграмме справа сигналы от свободной подложки A_R , области жира A_{S1} и области мышечной ткани A_{S2} также различаются.

Выводы

С помощью методов импульсной акустической микроскопии на частоте 50-100 МГц были выполнены эксперименты на модельных образцах, близких по акустическим свойствам к натуральным тканям – мышечный и жировой слой на полимерной подложке. Эхо-методом были получены значения акустических импедансов и скорость звука в модельных образцах. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность предложенной ультразвуковой методики для измерения характеристик образцов биологических тканей и их фантомов *in vitro*. Результаты работы являются основой для дальнейшей разработки диагностических возможностей ультразвуковой визуализации внутрисосудистых образований с микронным разрешением.

Список литературы

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Hill C.R., Bamber J.C., Haar. G.R. Physical Principles of Medical Ultrasonics. Chichester: John Wiley and Sons, 2004. 528 p.

Evaluating of high resolution ultrasound methods for imaging and evaluation of atherosclerotic substrate

Research student Titov A.S.¹, Head of Laboratory
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Petronyuk Y.S.^{1,2}

¹Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences

²Federal State Budgetary Institution Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences

alexander.serge.titov@gmail.com

Abstract: Atherosclerosis is the main cause of ischemic diseases of the cardiovascular system, which leads to premature aging and shortens human life expectancy. The experiments were performed on model samples close in their acoustic properties to natural tissues - muscle fibers and fat layer on a polymeric substrate using the methods of pulse acoustic microscopy at a frequency of 50-100 MHz. The acoustic impedances and sound velocity in the model samples were measured by the pulse echo method. These experimental studies are preliminary and are the basis for following work with biological tissues *in vitro*. Development of diagnostic capabilities of ultrasound imaging make it possible to hope for improvement of quality of diagnostics and treatment of ischemic diseases.

Keywords: acoustic microscopy, ultrasound imaging, atherosclerosis.

Алгоритм обработки пространственно-временных сигналов в сонографических исследованиях низших позвоночных на ранних стадиях развития

аспирант Зыкова Л.А. (SPIN: 1234-5678)
старший научный сотрудник, д.т.н., Титов С.А. (SPIN: 4319-7648)

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
zykova.la@ntcup.ru

Аннотация: Рассмотрены алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов, регистрируемых при высокочастотном сонографическом исследовании *in vivo* сердечно-сосудистой системы рыб на ранних стадиях развития. Показано, что в результате обработки представляется возможным измерять скорость кровотока и наблюдать движение стенок сердца в зависимости от фаз сердечного ритма.

Ключевые слова: сонография, низшие позвоночные, ультразвуковые сигналы, цифровая обработка.

Введение

Исследование сердца рыб, находящихся на эмбриональной и личиночной стадиях развития представляется актуальной задачей, решение которой позволяет не только неинвазивно изучать особенности функционирования сердечно-сосудистой системы таких организмов, но и оценивать влияние на нее внешних факторов и заболеваний. В работе рассматриваются особенности интерпретации и обработки ультразвуковых сигналов, позволяющей воссоздавать карту скоростей крови в области работающего сердца исследуемой особи.

1. Описание алгоритма обработки

Ультразвуковые сигналы, записываются в области работающего сердца в зависимости от вертикальной и поперечной координаты и времени [1,2]. На первом этапе такие многомерные сигналы подвергаются предобработке, заключающейся в повышении отношения сигнал-шум и синхронизации к фазе сердечных сокращений. Примеры типичных сигналов представлены на рис. 1.

На полученных диаграммах наблюдаются ультразвуковые отклики, образованные отражением ультразвуковых волн от структурных неоднородностей пульсирующего объекта, положение и форма которых меняется со временем. Сигналы являются квазипериодическими, период которых T_0 примерно равен периоду биений сердца. Выделяются отклики от стенок сердца E , и движущихся потоков крови W , в поведении сигналов различаются фазы диастолы D и систолы S .

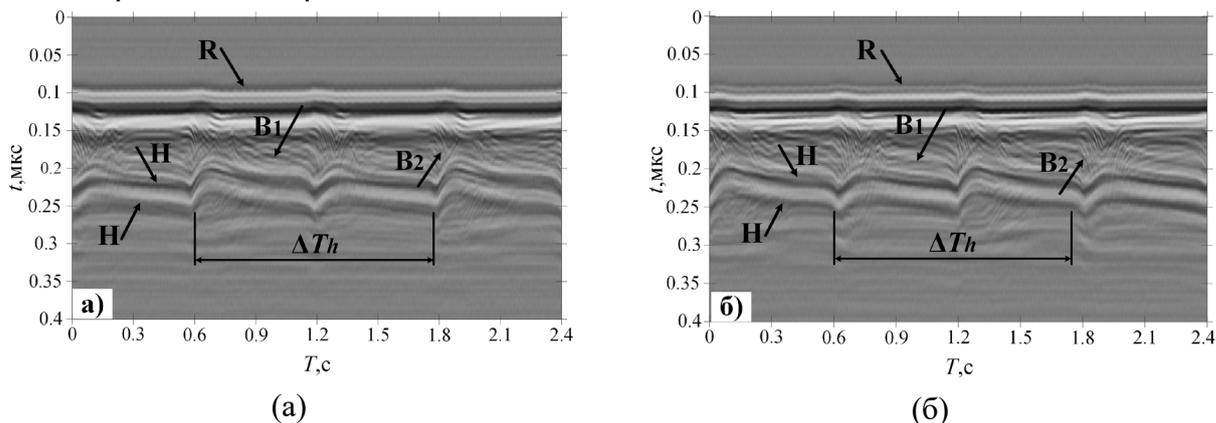


Рис. 1. Примеры ультразвуковых сигналов, записанные для сердца Данио рерио с аритмией (а) и нормально функционирующего (б).

На последующих этапах обработки производится фильтрация сигналов, позволяющая разделить отклики от неподвижных и медленно движущихся органов и быстро движущихся элементов крови. Корреляционный анализ переменных откликов позволяет оценить скорость кровотока.

2. Результаты и обсуждение

Анализ полученных пространственно-временных сигналов позволяет обнаружить особенности работы сердечно сосудистой системы. Например, на рис. 1(а) обнаруживаются отклики типов А и В, заметно отличающиеся друг от друга. Такое поведение может объясняться наличием аритмии [1].

В табл. 1 указаны экспериментальные результаты измерения скорости крови, полученные в разные моменты времени. Можно отметить, что в периоды диастолы и систолы направления движения крови противоположны, а в паузе скорость близка к 0.

Таблица 1. Скорость кровотока.

Момент времени T , с	0.85	0.9	1	1.2	1.4	1.6
Скорость крови, мм/с	1	0	-1	-0.5	0	0

Выводы

Разработанные алгоритмы обработки пространственно-временных сонографических сигналов позволяют анализировать особенности функционирования сердечно сосудистой системы низших позвоночных на ранних этапах развития и проводить измерения скорости кровотока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда грант RSF-MOST 22-49-08012.

Список литературы

1. Titov S., Zykova L, Burlakov A., Huang C. -C. and Bogachenkov A. High-Frequency Ultrasound Echocardiography of heart activity of Danio rerio Embryo // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), IEEE Xplore, 2022, pp. 1-4, IEEE Conference Record #55058.
2. Zykova, L.A., Burlakov, A.B., Titov, S.A., Bogachenkov A.N. Using a High-Frequency Ultrasound Scanner to Study the Cardiovascular System of a Danio rerio Embryo // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. Vol. 87. P. 528–531. DOI: 10.3103/S106287382270160X

Algorithm of Perception-Temporal Signals in Sonographic Manifestations of Lower Vertebrates at the Stage of Ulcer Development

Ph.D. student, Zykova L.A. (SPIN: 1234-5678),
Senior Researcher, Doctor of Engineering degree, Titov S.A. (SPIN: 2345-4567)

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
zykova.la@ntcup.ru

Abstract: Algorithms for processing spatiotemporal signals recorded during in vivo high-frequency sonographic studies of the cardiovascular system of fish at early stages of development are considered. It is shown that, as a result of processing, it is possible to measure the blood flow velocity and observe the movement of the walls of the heart depending on the phases of the heart rhythm.

Keywords: sonography, lower vertebrates, ultrasound signals, digital processing.

Регистрация ультразвуковых поперечных горизонтально поляризованных волн в иммерсионной схеме измерений

аспирант, Давыдова Е.А.
старший научный сотрудник, д.т.н., Титов С.А. (SPIN: 4319-7648)

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
zhedavydova@yandex.ru

Аннотация: Исследована возможность регистрации горизонтально поляризованных поперечных волн в иммерсионной схеме измерений. Предложено осуществлять их прием за счет преобразования поперечной волны в образце в продольную волну в иммерсионной жидкости. Показано, что шероховатость границы раздела образец – иммерсионная среда может служить фактором, обеспечивающим это преобразование. В работе возможность регистрации распределения горизонтально поляризованной поперечной волны с помощью сфокусированного иммерсионного преобразователя подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: поперечные волны, визуализация поля, иммерсионный преобразователь.

Введение

Ультразвуковой контроль является одним из наиболее часто применяемых методов при изучении структуры образцов. Ультразвуковые процессы основаны на изменяющихся во времени деформациях или вибрациях в материалах, которые могут быть отображены через различные параметры ультразвуковых волн [1,2]. Наиболее часто при

ультразвуковом контроле используются продольные и поперечные вертикально поляризованные волны. В данной работе предлагается использование горизонтально поляризованных волн и решается задача возможности их регистрации.

1. Экспериментальный стенд регистрации поперечных горизонтально поляризованных волн

В данной работе представлен экспериментальный стенд (рис. 1) для возможности регистрации поперечных горизонтально поляризованных волн. Поперечная волна генерируется в твердом образце из алюминиевого сплава в иммерсионной среде ультразвуковым преобразователем. Отраженная волна принимается в эхо-импульсном режиме.

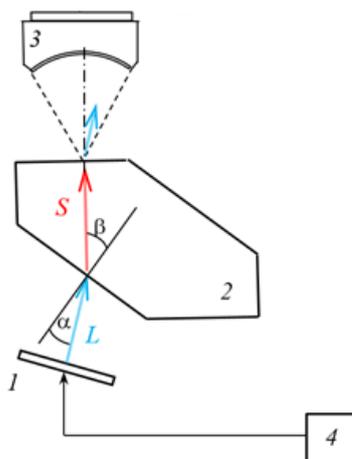


Рис. 1. Схема измерений 1 – излучающий пьезопреобразователь; 2 – призма; 3 – приемный пьезопреобразователь; 4 – генератор импульсов.

2. Результаты измерений

В эксперименте, корректность использованной модели распространения волн, используется показатель - время распространения импульса с помощью экспериментальной установки и расчетным способом. На рис. 2 показан импульс, принятый в этом режиме. Время распространения этого импульса составляет приблизительно 45,3 мкс. Расчетное значение составило 45,7 мкс. Таким образом, экспериментальная и расчетная величины сопоставимы, что свидетельствует о корректности работы модели.



Рис. 2. Сигнал, принятый в эхо-импульсном режиме.

Выводы

В работе разработан экспериментальный стенд, демонстрирующий возможность регистрации горизонтально поляризованных волн и рассмотрена возможность его дальнейшего применения. Показано, что прием поперечных горизонтально

поляризованных можно осуществлять волн за счет их трансформации в продольную волну на особенностях негладкой границы раздела твердое тело – иммерсионная жидкость.

Список литературы

1. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 303 с.
2. Информационная оптика / Н.Н. Евтихийев, О.А. Евтихьева, И.Н. Компанец и др./ под ред. Н.Н. Евтихьева. М.: Издательство МЭИ, 2000. 612 с.
3. Петров О. Ф. Диагностика жидкостных и кристаллических структур в сильнонеидеальной пылевой плазме // Автометрия. 2000. № 5. С. 74-83.

Registration of ultrasonic transverse horizontally polarized waves in the immersion measurement scheme

PhD Student, Davydova E. A.

Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Titov S.A. (SPIN: 4319-7648)

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
zhedavydova@yandex.ru

Abstract: The possibility of recording horizontally polarized transverse waves in an immersion measurement scheme is studied. It is proposed to carry out their reception by converting a transverse wave in the sample into a longitudinal wave in the immersion liquid. It is shown that the roughness of the interface between the sample and the immersion medium can serve as a factor providing this transformation. In this work, the possibility of recording the distribution of a horizontally polarized transverse wave using a focused immersion transducer was confirmed experimentally.

Keywords: transverse waves, field visualization, immersion transducer.

Исследование возможностей атомно-слоевого осаждения при формировании проводящих покрытий для кантилеверов атомно-силовой микроскопии

стажер-исследователь, аспирант, Андреев А.В.¹ (SPIN: 9887-1857)
научный сотрудник, к.т.н., Краснобородько С.Ю.¹ (SPIN: 8154-7797)
младший научный сотрудник, к.т.н., Высоких Ю.Е.¹ (SPIN: 1118-7221)
ведущий инженер, Парамонов В.В.²
начальник НИЛ РТ, д.ф.-м.н., Медведев Б.К.²
ведущий инженер, Филиппов Н.А.²

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

andreev.av@ntcup.ru

Аннотация: Предложено использование атомного слоевого осаждения для формирования проводящего покрытия АСМ кантилеверов для картирования электрофизических характеристик исследуемых объектов с высоким разрешением.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, электросиловая микроскопия, кантилевер, тонкие пленки, атомно-слоевое осаждение, электропроводность.

Введение

В настоящее время атомно-силовая микроскопия (АСМ) получила серьезное распространение для исследований широкого круга объектов, в том числе и для в области микроэлектроники [1-5]. Чувствительным элементом АСМ является специальный зонд (кантилевер), представляющий собой микромеханическое изделие – упругую кремниевую балку с острием на конце, укрепленную на полупроводниковой пластине-чипе. В промышленности такие зонды получают по стандартной полупроводниковой технологии литографии и селективного травления. Для исследования электрических характеристик образцов используются кантилеверы с проводящим функциональным покрытием [6-8]. В случае использования функциональных покрытий радиус закругления увеличивается, чем больше толщина покрытия, тем хуже разрешающая способность при измерении геометрических параметров, но при этом лучше однородность покрытия и для хорошего сигнала и контакта в случае измерения проводимости [9].

1. Метод атомно-слоевого осаждения

Как правило, для напыления проводящих покрытий используется метод магнетронного напыления, используя который сложно контролировать толщину осаждаемого покрытия, а также трудность, а иногда практическая невозможность получения однородного покрытия на структурах сложной формы. Было предложено использование технологии атомно-слоевого осаждения [10], основанную на получении сверхтонких пленок последовательным осаждением реагентов из газовой фазы в циклическом процессе.

На рис. 1 представлен принцип работы АСО, в основе процедура, согласно которой атомы или молекулы определенного типа (тип А) реагируют на поверхности объектов с атомами (молекулами) предыдущего слоя (тип В), равномерно покрывая всю поверхность изделий однородным слоем толщиной порядка несколько ангстремов. После этого избыток частиц типа А и продукты реакции удаляются из камеры. Молекулы следующего слоя (тип В) реагируют только с молекулами типа А и также адсорбируются на поверхности образуя один монослой [11]. Далее цикл повторяется многократно для достижения требуемой толщины. Таким образом, в этой технологии достигается предельная точность контроля толщины пленки (до долей монослоя), высокая воспроизводимость результата как от пластины к пластине в одном процессе, так и от процесса к процессу, а также относительно низкие температуры синтеза пленок. В качестве функционального покрытия выбран нитрид титана. Данный материал хорошо изучен и обладает хорошими химическими, физическими, механическими и электрическими свойствами: высокая твердость, химическая стабильность, высокая теплопроводность и низкое электрическое сопротивление.

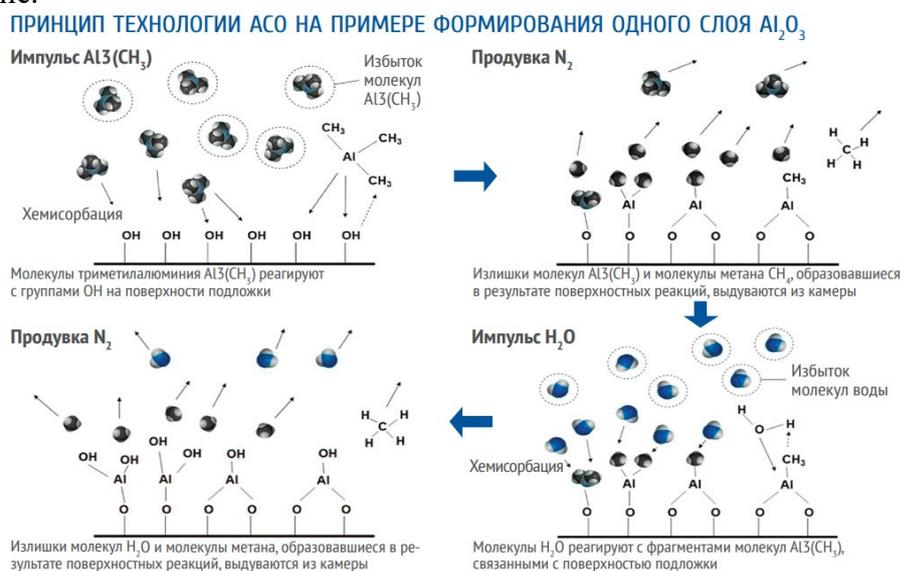


Рис. 1. Принцип технологии АСО.

2. Оценка качества острия зондов

Для оценки качества острия использовалась атомно-силовая микроскопия, проводились измерения топографии кремниевой подложки, покрытой плотноупакованным слоем наночастиц аморфного кремния. Использование зондов с покрытием ведет к ухудшению качества изображения за счет большего размера острия. При увеличении размеров зонда следует ожидать уменьшения рельефа изображения. Для количественной оценки размеров зонда используется статистический параметр среднеквадратического отклонения координаты z поверхности (rms). Кроме того, для используемого образца кремниевых наночастиц одним из признаков хорошего качества острия является достижение поверхности подложки между частицами.

В табл. 2 приведены среднеквадратичные значения шероховатости.

Таблица 2. Среднеквадратичное значение шероховатости изображений полученных с помощью разных типов зондов

Кантилевер	Среднее значение RMS, нм
Кантилевер NSG10 без покрытия	8,96
Кантилевер HQ:NSC36 без покрытия	15.3
Кантилеверы с покрытием TiN толщиной 30 нм	7.8
Кантилеверы с покрытием TiN толщиной 50 нм	6.05
Кантилеверы с покрытием TiN толщиной 70 нм	5.07

3. Оценка электрических свойств зондов

Для оценки электрических свойств зондов использовался метод получения распределения тока путем сканирования малой (1000×1000 нм) области поверхности в режиме растекания тока. Для определения пригодности зондов для измерений тока использовался качественный показатель – наличие ступеней на токовом изображении поверхности тестового образца высокоориентированного пиролиитического графита (ВОПГ).

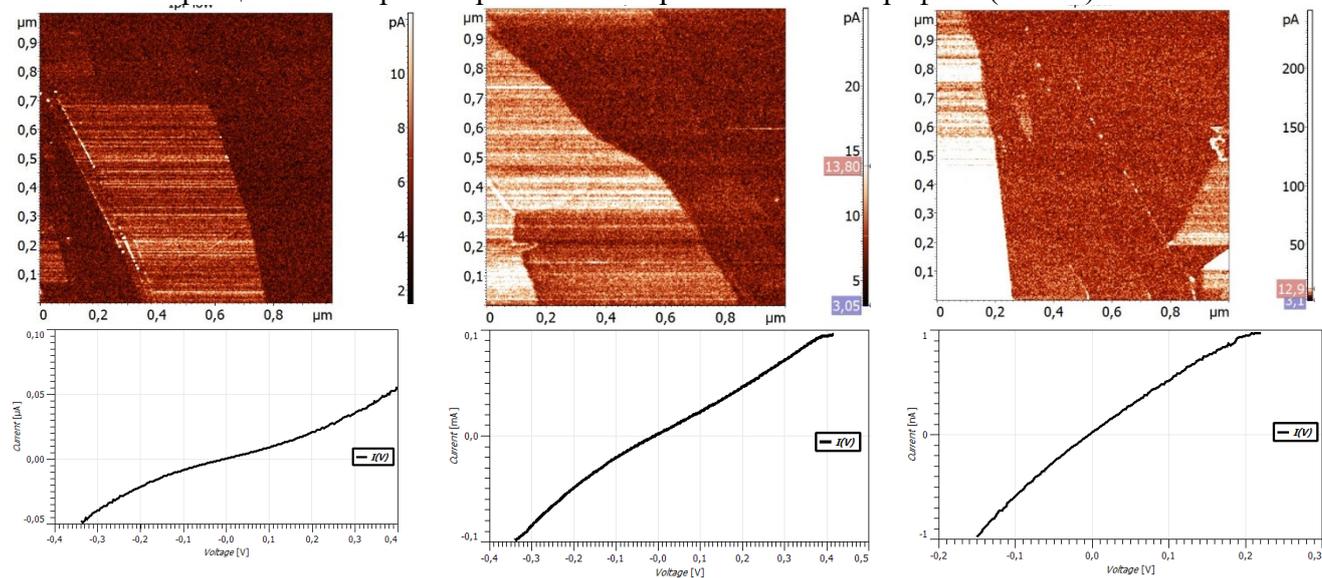


Рис. 2. Карты распределения проводимости на ВОПГ и ВАХ с использованием кантилеверов с покрытием TiN толщиной 30 нм, 50 нм, 70 нм.

Выводы

Предложено использование атомного слоевого осаждения (АСО) для формирования проводящего покрытия АСМ кантилеверов, в качестве проводящего материала выбран нитрид титана (TiN). Были проведены технологические операции по формированию и исследованию тонкопленочных проводящих покрытий толщиной от 30 нм. Изготовлены экспериментальные образцы кантилеверов с покрытием TiN толщиной 30 нм, 50 нм, 70 нм.

Проведено тестирование получение экспериментальных образцов кантилеверов с проводящим функциональным покрытие, показана их работоспособность и хорошая проводимость. Была определена толщина пленок, состав пленок, удельное и поверхностное сопротивление. Среднеквадратическое отклонение поверхности, отражающее пространственное разрешение картирования топографии поверхности, достигает наибольших значений для наименьшей толщины покрытия 30нм. С точки зрения применения зондов для электрических измерений, толщина 70 нм наиболее перспективна, так как обеспечивает хороший электрический контакт к поверхности образца.

Список литературы

1. V.L. Mironov, "Fundamentals of Scanning Probe Microscopy" Nizniy Novgorod: Inst. Fiz. Mikrostruktur, 2004.
2. M.F. Bulatov D.V. Churikov, "On the Formation of Microheterogeneities in Epitaxial Films of Nonstoichiometric", Ferrogarnets Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 13, 2, 206–209, 2019
3. Yu. E. Vysokikh, T.V. Mikhailova, S. Yu. Krasnoborodko, A.S. Kolomiytsev, O.I. Ilin, A.N. Shaposhnikov, V.N. Berzhansky, M.F. Bulatov, D.V. Churikov, V.I. Shevyakov, Carbon tip aperture cantilevers: Fabrication & features in near-field magneto-optical imaging, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 529, 2021, 167837, ISSN 0304-8853.
4. P. Arora, T. Nguyen, A. Chawla et al., "Role of sulfur in catalyzing fluorine atom fast etching of silicon with smooth surface morphology". J. Vac. Sci. Technol. A 37, 061303 (2019). .
5. S.Yu. Krasnoborodko, S.P. Antonov, S.A. Smagulova, Yu. A. Chaplygin and V.I. Shevyakov, "Modification of cantilevers for atomic-force microscopy using the method of exposure defocused ion beam," Proceedings of International Conference on Micro- and Nano-Electronics, Zvenigorod, Russia, 2014, 944000.
6. G.M. McClelland, R. Erlandsson, and S. Chiang, "Atomic force microscopy: general principles and a new implementation", Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval, Vol. 6B, 1307–1314, 1987.
7. D. Rugar. and P. Hansma, "Atomic force microscopy", Phys. Today, Vol. 43 (10), 23–30, 1990.
8. V.Yu. Fominski , R.I. Romanov, I.S. Vasil'evskii, D.A. Safonov, A.A. Soloviev a, A.A. Ivanov, P.V. Zinin, S.Yu. Krasnoborodko, Yu.E. Vysokikh, V.P. Filonenko . Pulsed laser modification of layered B-C and mixed BCx films on sapphire substrate. Diamond & Related Materials 114 (2021) 108336
9. O. Wolter., T. Bayer and J. Greschner, "Micromachined silicon sensors for scanning force microscopy", J. Vac. Sci. Technol., Vol. A 9, 1353–1357, 1991.
10. G.N. Parsons, J.W. Elam, S. Haukka, H. Jeon, W. Kessels, M. Leskela, P. Poodt, M. Ritala, S.M. Rossnagel, «History of Atomic Layer Deposition and Its Relationship with the American Vacuum Society», J. Vac. Sci. Technol., 31, 050818, 2013.
11. Parsons, G. N.; Elam, J. W.; Haukka, S.; Jeon, H.; Kessels, W. M. M.; Leskela, M.; Poodt, P.; Ritala, M.; Rossnagel, S. M. History of Atomic Layer Deposition and Its Relationship with the American Vacuum Society. J. Vac. Sci. Technol., A 2013, 31, 050818 DOI: 10.1116/1.4816548

Investigation of the Possibilities of Atomic Layer Deposition in the Formation of Conductive Coatings for Atomic Force Microscopy Cantilevers

Intern researcher, graduate student, Andreev A.V. (SPIN: 9887-1857)
Researcher, Candidate of Engineering degree, Krasnoborodko S.Yu. (SPIN: 8154-7797)
Junior Researcher, Candidate of Engineering degree, Vysokikh Yu. E.

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS Moscow, Russia
andreev.av@ntcup.ru

Abstract: The use of atomic layer deposition for the formation of a conductive coating of AFM cantilevers for high-resolution mapping of the electrophysical characteristics of the objects under study is proposed.

Keywords: atomic force microscopy, electric force microscopy, cantilever, thin films, atomic layer deposition, electrical conductivity.

Повышение чувствительности накладных вихретоковых преобразователей

главный научный сотрудник, д.т.н., Шкатов П.Н.^{1,2,3} (SPIN: 6013-5780)
магистр, Пичугин С.С.² (SPIN: 6720-5295)

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

²Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва

³МИРЭА - РТУ, Москва

petr_shkatov@mail.ru

Аннотация: Повышение чувствительности накладных вихретоковых преобразователей (ВТП) достигается за счет минимизации части магнитного потока возбуждающей обмотки, сцепленной с измерительной обмоткой, но не воздействующей на контролируемый объект. Исследования проводились на основе конечно-элементного моделирования. В результате работы даны рекомендации для выбора соотношения радиусов и осевого смещения обмоток ВТП, обеспечивающего лучшую чувствительность к контролируемым параметрам.

Ключевые слова: накладной вихретоковый преобразователь, чувствительность.

Обычно в абсолютных накладных ВТП используются возбуждающая и измерительная обмотки, размещенные в общем или близко расположенных пазах [1]. При этом часть Φ_n магнитного потока Φ возбуждающей обмотки, сцепленная с измерительной обмоткой, не воздействует на контролируемый объект (рис.1). Это приводит к уменьшению относительного вносимого объектом контроля (ОК) напряжения $U_{вн}^*$ и чувствительности S_p к измеряемому параметру p . В работе на основе компьютерного моделирования исследуется возможность увеличения чувствительности абсолютных накладных ВТП за счет уменьшения величины Φ_n путем изменения соотношения радиусов возбуждающей и измерительной обмоток, а также осевого смещения плоскостей их витков.

На рис. 2, в качестве примера, показано увеличение чувствительности к удельной электрической проводимости при уменьшении радиуса R_n измерительной обмотка и фиксированной величине радиуса $R_b = 10$ мм возбуждающей обмотки.

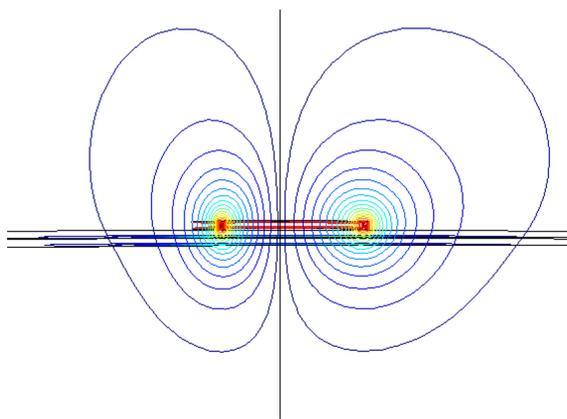


Рис. 1. Силовые линии магнитного потока возбуждающей обмотки

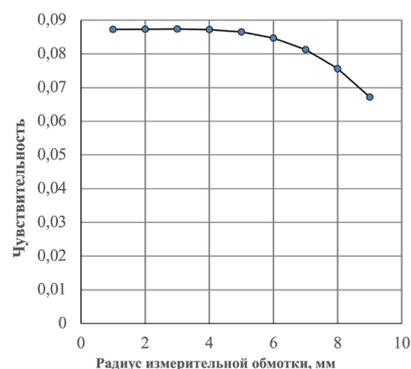


Рис. 2. Зависимость от $R_{и}$ чувствительности ВТП к удельной электрической проводимости при $R_{в} = 10$ мм и $\beta = 5$.

Список литературы

1. Федосенко Ю. К., Шкатов П. Н., Ефимов А. Г. Вихретоковый контроль. – Москва: Издательский дом "Спектр", 2014. – 224 с.

Исследование возможности создания органических светодиодов на базе графитоподобных нитридов углерода

Зинин П.В., Кутуза И.Б., Пращук А.Ю.

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, г. Москва
kutuza@mail.ru

Аннотация: Соединения, получаемые из двух элементов углерода и азота, которые являются распространенными неметаллическими элементами на нашей планете, обладают уникальной электронной структурой, впечатляющими механическими свойствами, сильной люминесценцией без использования редкоземельных элементов. Такие материалы представляют интерес возможностью их использования в устройствах фотоэлектроники, таких как излучатели света, фотокатоды, приёмники оптического излучения и т.п. Однако, систематическое изучение влияния эффектов, связанных с атомной структурой, наноструктурой и химическими связями, на оптические и упругие свойства C-N соединений не проводились.

Ключевые слова: графитовые материалы, наночастицы, нитрид углерода, C_3N_4 , флуоресценция.

Известно, что модификации нитридов углерода C_3N_4 с графитовыми связями обладают очень высокой способностью к люминесценции [1]. Особенностью бинарных соединений углерода и азота является многообразие форм, в которые они могут объединяться. Это могут быть неупорядоченные графитоподобные частицы нитрида углерода, двумерные структуры наподобие графенов, полые наночастицы сферической формы, квантовые точки и т.д. Различие форм изменяет не только механические свойства таких материалов, но и влияет на особенности их люминесценции. Исследования показали, к примеру, что квантовый выход люминесценции полых C_3N_4 наночастиц сферической формы (s- C_3N_4) на два порядка выше квантового выхода интенсивности люминесценции неупорядоченных графитоподобных частиц нитрида углерода [2,3].

Природа высокого уровня люминесценции до конца не изучена. Систематические исследования графитовых форм нитрида углерода до настоящего времени не проводилась. В работе предполагается комплексное исследование графитовых форм нитрида углерода, получаемых в НТЦ УП РАН, а также развитие аппаратных средств проведения полного цикла измерений, необходимых для получения количественных характеристик люминесцентных свойств и определения эффективности ее возбуждения.

Список литературы

1. Zinin, P.V., L.C. Ming, S.K. Sharma, V.N. Khabashesku, X.R. Liu, et al., Ultraviolet and near-infrared Raman spectroscopy of graphitic C₃N₄ phase. Chem. Phys. Lett., 2009. 472(1-3): 69.
2. Zinin, P.V., A.V. Ryabova, V.A. Davydov, V. Khabashesku, S. Boritko, et al., Anomalous fluorescence of the spherical carbon nitride nanostructures. Chemical Physics Letters, 2015. 633: 95.
3. Bogomolov, A.B., S.A. Kulakov, P.V. Zinin, V.A. Kutwitskii, M.F. Bulatov, Synthesis of Fluorescent Composite Materials Based on Graphitic Carbon Nitride. Optics and Spectroscopy, 2020. 128(7): 920.

Investigation of the possibility of creating organic LEDs based on graphite-like carbon nitrides

Zinin P.V., Kuzuza I.B., Prashchuk A. Yu.

Compounds derived from the two elements carbon and nitrogen, which are common nonmetallic elements on our planet, have a unique electronic structure, impressive mechanical properties, and strong luminescence without the use of rare-earth elements. Such materials are of interest by the possibility of their use in photoelectronic devices, such as light emitters, photocathodes, receivers of optical radiation, etc. However, no systematic study of the effects related to the atomic structure, nanostructure, and chemical bonds on the optical and elastic properties of C-N compounds has been performed.

Keywords: graphite-like materials, nanoparticles, carbon nitride, C₃N₄, fluorescence

Методы и средства защиты прецизионных систем от вибрационных воздействий

доцент, канд. техн. наук, Жалнин В.П.¹ (SPIN: 7447-6923)
магистрант, Радчук А. П.²

^{1,2} МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия
zhalnin@mail.ru, ²nastya_radchuk@mail.ru

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы реализации систем активной виброзащиты прецизионных приборных систем. Основное внимание уделено принципам реализации активных силовых элементов виброзащиты на базе "интеллектуальных" монокристаллических материалов, сочетающих в себе функции датчика и исполнительного механизма. Предлагаемое решение позволяет создавать виброзащитные системы на новых принципах генерации компенсирующих перемещений и усилий, реализующихся на уровне кристаллической решетки интеллектуального материала.

Ключевые слова: активная защита от вибраций, колебания, виброзащита.

Введение

Современное высокоточное прецизионное оборудование требует применения разнообразных средств защиты от дестабилизирующих волновых воздействий (акустических, вибрационных и т.п.). Для защиты от высокочастотных волновых воздействий применяются, как правило, пассивные средства, а для защиты от низкочастотных воздействий - активные [1, 2].

Целью данной работы является оценка применимости "интеллектуальных" монокристаллических материалов, сочетающих в себе функции датчика и исполнительного механизма, в качестве исполнительных элементов систем активной низкочастотной виброзащиты прецизионных приборных систем.

Анализ методов и средств виброзащиты прецизионных приборов и систем

Системы компенсации вибрации широко применяются для защиты элементов электронных приборов. Одним из примеров применения средств виброзащиты являются системы защиты поверхностей накопителей на жестких магнитных дисках от ударов и вибрации. Защита от тряски и ударов поверхностей жестких дисков, это лишь одна из возможных областей применения систем активной виброзащиты. В настоящее время внимание к данным технологиям все больше повышается и области их применения расширяются.

Для защиты точных измерительных приборов от внешних вибраций применяются различные подходы. При использовании пассивных виброизолирующих систем амплитуда вынужденных колебаний механической системы быстро падает при увеличении разницы между частотой возбуждающей силы и собственной резонансной частотой системы [3].

Например, защита от низкочастотной вибрации важна в сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Внешние механические воздействия на частотах, совпадающих с собственными резонансными частота ω_k , вызывают явления резонанса, что приводит к колебаниям зонда относительно образца и воспринимается как паразитный периодический шум, искажающий и размывающий СЗМ изображения поверхности образцов. Для снижения влияния вибрации измерительные головки изготавливают из массивных металлических деталей, имеющих высокие (более 100 кГц) частоты. В конструкциях СЗМ приходится идти на компромисс между величиной максимального поля обзора сканирующего элемента и его резонансной частотой (10 - 100 кГц). Для защиты от низкочастотных вибрационных воздействий используют активные виброзащитные системы, которые формируют компенсирующее противофазное поле за счет применения дополнительного источника энергии [1-4]. За счет применения "интеллектуальных" монокристаллических материалов, сочетающих в себе функции датчика и исполнительного механизма, возможно создавать пространственные активные виброзащитные поверхности, которые обеспечивают защиту от низкочастотных вибрационных полей на всем ее протяжении.

Выводы

Можно констатировать, что в последнее время все большее применение находят нейросетевые алгоритмы управления активными виброзащитными системами [4], а также применение "умных" материалов в качестве интеллектуальных сенсоров и исполнительных элементов систем виброзащиты. Кроме классических принципов построения силовых механизмов активных систем можно отметить также и ряд перспективных технологий, одной из которых является создание силовых элементов на базе "интеллектуальных" монокристаллических материалов, сочетающих в себе функции датчика и исполнительного механизма. Такой подход позволяет создавать виброзащитные средства на новых принципах организации перемещений и создания усилий, реализующихся на уровне кристаллической решетки материала.

Список литературы

1. Шахнов В.А., Власов А.И., Володин Е.А., Семенов С.Г. Электронные системы активного управления волновыми полями: история и тенденции развития // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 4. С. 3-23.
2. Власов А.И. Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей // Приборы и системы управления. 1997. № 12. С. 59-70.
3. Власов А.И. Принципы активного подавления действия вибрационных полей на электронную аппаратуру // Приборы и системы управления. 1996. № 11. С. 30-32.
4. Власов А.И. Нейросетевая реализация микропроцессорных систем активной акусто- и виброзащиты // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2000. № 1. С. 40-44.

Methods and means of protecting precision systems from vibration effects

Associate Professor, Ph.D., Zhalnin V.P.¹ (SPIN: 7447-6923)
graduate student, Radchuk A. P.²

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
zhalnin@mail.ru, ²nastya_radchuk@mail.ru

Abstract: The paper deals with the implementation of active vibration protection systems for precision instrumentation systems. The main attention is paid to the principles of implementation of active power elements of vibration protection based on "intelligent" single-crystal materials that combine the functions of a sensor and an actuator. The proposed solution allows you to create vibration protection systems based on new principles for generating compensating movements and forces that are implemented at the level of the crystal lattice of an intelligent material.

Keywords: active vibration protection, oscillations, vibration protection.

Измеритель порогового тока светодиодов

директор, д.т.н., Сергеев В.А.^{1,2} (SPIN: 5188-7405)
заместитель директора по научной работе, к.т.н., Фролов И.В.¹ (SPIN: 9046-9829)
научный сотрудник, Радаев О.А.¹ (SPIN: 8569-2323)

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
Российской академии наук, Ульяновск

²Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск
ufire@mv.ru

Аннотация: Представлены структурная схема и принцип работы измерителя порогового тока светодиодов. Принцип работы измерителя заключается в измерении мощности излучения светодиода при трех малых токах, соответствующих диапазону роста внешней квантовой эффективности, и расчете значения порогового тока путем решения системы уравнений, связывающих значения мощности излучения светодиода при трех токах с функцией, аппроксимирующей ватт-амперную характеристику светодиода. Измеритель реализован в виде электронного блока с микроконтроллерным управлением, сопряженного с компьютером. Проведена апробация работы измерителя. Показано, что результаты измерений не зависят от чувствительности фотоприемника, входящего в его

состав. Представленный измеритель может быть использован в системе контроля качества светодиодов.

Ключевые слова: светодиод, пороговый ток, измерение.

Введение

Пороговый ток светодиода – минимальный ток, при котором удастся зарегистрировать его излучение. Пороговый ток светодиодов является важным информативным параметром, характеризующим потери на безызлучательную рекомбинацию в системе дефектов, пронизывающих активную область светодиода, потери носителей заряда при туннелировании через потенциальный барьер и их утечку из активной области в барьерные слои [1]. Значения порогового тока современных гетероструктурных светодиодов составляют единицы – десятки нА. В [2] показано, что при испытаниях в режиме постоянного тока светодиоды с большими значениями порогового тока деградируют быстрее, чем светодиоды с малыми значениями порогового тока.

1. Описание способа измерения порогового тока светодиода

В [3] показано, что при отсутствии утечки носителей заряда из активной области светодиода ватт-амперная характеристика при малых токах, соответствующих диапазону роста внешней квантовой эффективности, может быть аппроксимирована функцией вида

$$P(I) = \frac{m}{2} (\sqrt{1 + 2qI} - 1)^2, \quad (1)$$

где параметры m и q определяются свойствами гетероструктуры светодиода.

Однако не все носители заряда рекомбинируют в активной области с образованием фотонов: часть носителей рекомбинирует безызлучательно на дефектах, часть туннелирует через потенциальный барьер. Поэтому существует минимальный (пороговый) ток I_{th} , при котором возникает излучение структуры. В окрестности порогового тока ватт-амперная характеристика светодиода описывается функцией

$$P(I) = \frac{m}{2} (\sqrt{1 + 2q(I - I_{th})} - 1)^2. \quad (2)$$

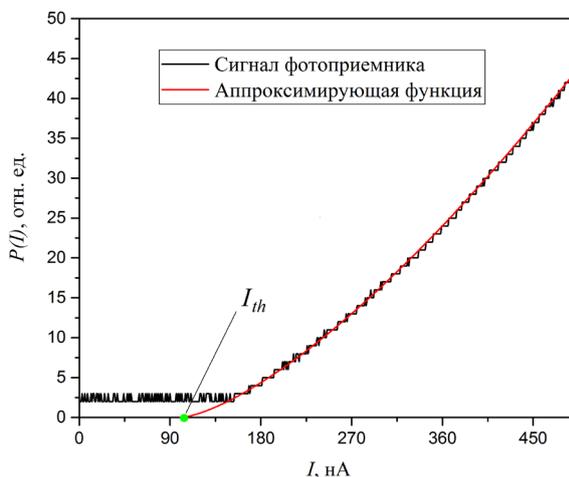


Рис. 1. Графики, поясняющие принцип определения порогового тока светодиода.

Для измерений мощности излучения светодиода используется фотоприемное устройство, сигнал на выходе которого пропорционален мощности излучения:

$$U(I) = S \times P(I), \quad (3)$$

где S – коэффициент, имеющий размерность [В/Вт] и значение которого определяется чувствительностью фотоприемника, коэффициентом усиления, диаграммами направленности светодиода и фотодиода.

Способ определения порогового тока светодиода I_{th} , представленный в [4], заключается в измерении сигналов фотоприемника U_1 , U_2 и U_3 , регистрирующего излучение светодиода, при трех малых токах I_1 , I_2 и I_3 ($I_1 < I_2 < I_3$), соответствующих диапазону роста квантовой эффективности, и решении системы уравнений вида

$$U(I_i) = \frac{m}{2S} \left(\sqrt{1 + 2q(I_i - I_{th})} - 1 \right)^2, i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

2. Описание измерителя порогового тока светодиодов

Структурная схема измерителя порогового тока светодиодов представлена на рис. 2.

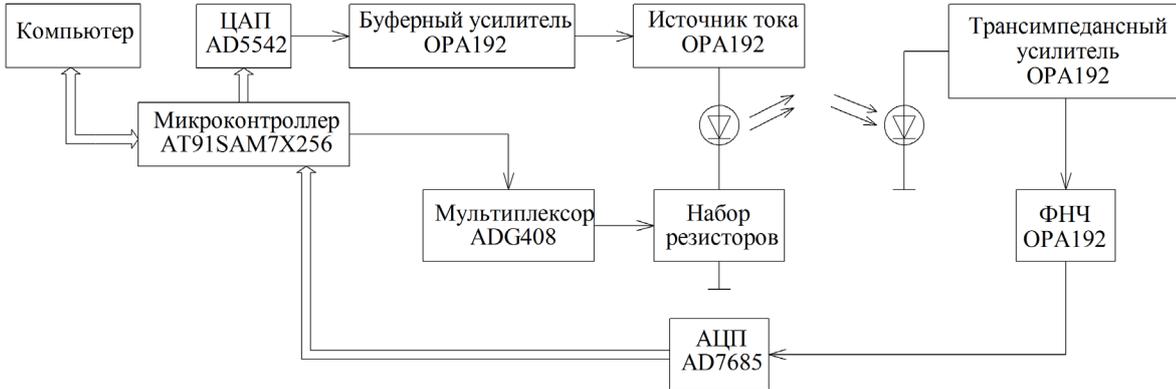


Рис. 2. Структурная схема измерителя порогового тока светодиодов.

Измеритель реализован в виде электронного блока с микроконтроллерным управлением, сопряженного с компьютером. Управление аппаратной частью осуществляется компьютером через RS232 интерфейс. При запуске цикла измерения микроконтроллер AT91SAM7X256 выдает код, в результате чего цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) AD5542 формирует опорное напряжение для источника тока на операционном усилителе (ОУ) OPA192 в диапазоне 0 – 3 В. Мультиплексор предназначен для переключения нагрузочных прецизионных резисторов, с помощью которых задается диапазон тока через исследуемый светодиод: от 0 до 60 мкА; от 0 до 300 мкА; от 0 до 3 мА. Излучение исследуемого светодиода попадает на быстродействующий фотодиод SFH203. Малошумящий трансимпедансный усилитель на ОУ OPA192 преобразует фототок фотодиода, пропорциональный мощности излучения светодиода, в электрический сигнал, который после сглаживания фильтром нижних частот (ФНЧ) преобразуется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) AD7685 в числовой код и через микроконтроллер передается в компьютер по последовательному интерфейсу RS232. Исследуемый светодиод и фотодиод фотоприемника закрепляются соосно с помощью адаптера, позволяющего направить излучение светодиода на чувствительную поверхность фотодиода и обеспечивающего защиту от внешней засветки. Минимальный шаг изменения тока определяется разрядностью ЦАП и для 16-битного AD5542 составляет 1 нА для диапазона тока 0 – 60 мкА; 5 нА для диапазона 0 – 300 мкА и 50 нА для диапазона тока 0 – 3 мА. Выбор диапазона измерений зависит от уровня мощности излучения светодиода, а также тока, при котором достигается максимум квантовой эффективности светодиода, и определяется исходя из априорной информации о характеристиках светодиодов исследуемого типа.

Принцип работы устройства состоит в измерении ватт-амперной характеристики светодиода $U(I)$, вычислении функции $f(I) = U(I)/I$, значения которой пропорциональны внешней квантовой эффективности светодиода, определении тока I_{max} , при котором достигается максимум функции $f(I)$, выборе токов I_1 , I_2 и I_3 и определении порогового тока светодиода I_{th} путем решения системы уравнений (4). Выбор токов I_1 , I_2 и I_3 обусловлен требованиями к точности измерений. Ток I_1 задается наименьшим, при котором обеспечивается заданный уровень точности измерений сигнала фотоприемного

устройства $U(I_1)$. Ток I_3 должен быть примерно в 5 раз меньше, чем ток I_{max} , при котором достигается максимум квантовой эффективности. Ток I_2 выбирается из условия $I_2 \approx 0,5I_3$. Для подтверждения того, что результаты измерений порогового тока светодиодов не зависят от чувствительности фотоприемного устройства S , было проведено измерение порогового тока одно и того же светодиода типа C503B-GAN-D0-G7-00 фотоприемными устройствами с фотодиодами различных типов: ФД256 и SFH203. Ватт-амперные характеристики, измеренные фотоприемниками с разной чувствительностью, имеют разную крутизну: $S_{ФД256} < S_{SFH203}$ (рис. 3). При определении порогового тока по полученным зависимостям предложенным способом были получены близкие значения порогового тока $I_{th\ SFH203} = 103\ \text{нА}$, $I_{th\ ФД256} = 105\ \text{нА}$, различающиеся не более чем на 2 %.

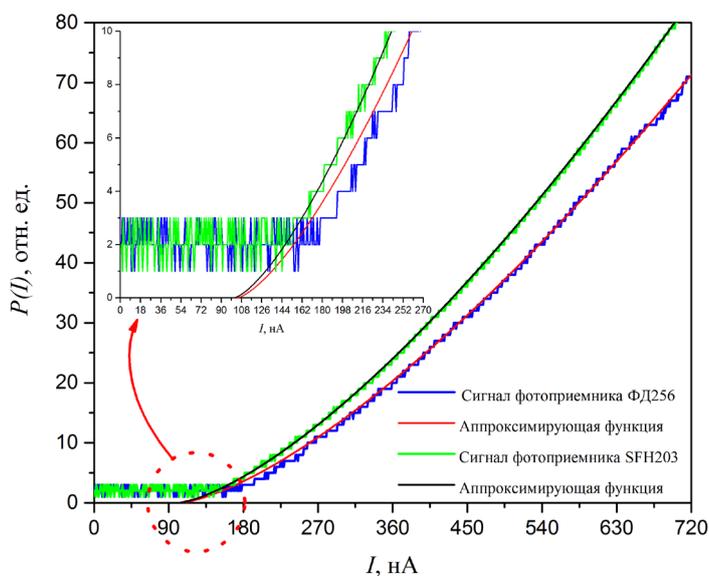


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики светодиода, измеренные фотоприемниками с разными фотодиодами.

Выводы

Представлен измеритель порогового тока светодиодов. Принцип работы измерителя заключается в измерении мощности излучения светодиода при трех малых токах, соответствующих диапазону роста внешней квантовой эффективности, и расчете значения порогового тока путем решения системы уравнений, связывающих значения мощности излучения светодиода при трех токах с функцией, аппроксимирующей ватт-амперную характеристику светодиода. Показано, что результаты измерений порогового тока не зависят от чувствительности фотоприемника, используемого в составе измерителя.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН.

Список литературы

1. Аверкиев Н.С., Левинштейн М.Е., Петров П.В., Черняков А.Е., Шабунина Е.И., Шмидт Н.М. Особенности рекомбинационных процессов в светодиодах на основе InGaN/GaN при больших плотностях инжекционного тока // Письма в ЖТФ. Вып. 19. 2009. С. 97-102.
2. Сергеев В.А. Фролов И.В., Радаев О.А. Исследование связи степени дефектности светоизлучающих наногетероструктур зеленых InGaN/GaN светодиодов с величиной порогового тока // Письма в ЖТФ. №4. 2017. С. 89-93.
3. Фролов И.В., Сергеев В.А. Диагностический контроль качества светодиодов по локальным параметрам электролюминесценции и фототока. Монография. М. СОЛОН-Пресс, 2023.
4. Заявка 2023112857 РФ. Способ измерения порогового тока светодиода / Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А. Заявитель Федеральное государственное бюджетное

учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук. Заявл. 17.05.2023.

LED threshold current meter

Director, Doctor of Engineering degree, Sergeev V.A.^{1,2} (SPIN: 5188-7405)

Deputy Director for Research, Ph.D., Frolov I.V.¹ (SPIN: 9046-9829)

Researcher, Radaev O.A.¹ (SPIN: 8569-2323)

¹ Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk

²Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk
ufire@mv.ru

Abstract: The block diagram and principle of operation of the LED threshold current meter are presented. The principle of operation of the meter is to measure the radiation power of the LED at three low currents corresponding to the range of growth of the external quantum efficiency, and calculate the threshold current value by solving a system of equations relating the values of the LED emission power at three currents with a function approximating the P - I characteristic of the LED. The meter is implemented as an electronic unit with microcontroller control, interfaced with a computer. Testing of the meter operation was carried out. It is shown that the measurement results do not depend on the sensitivity of the photodetector included in its composition. The presented meter can be used in the LED quality control system.

Keywords: LED, threshold current, measurement.

Установка фотоэлектрической диагностики биполярных транзисторных структур

директор, д.т.н., профессор, Сергеев В.А.^{1,2} (SPIN: 5188-7405)

заместитель директора по научной работе, к.т.н., Фролов И.В.¹ (SPIN: 9046-9829)

научный сотрудник, Радаев О.А.¹ (SPIN: 8569-2323)

аспирант, Казанков А.А.² (SPIN: 5696-6415)

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, Ульяновск

²Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск
sva@ulstu.ru

Аннотация: Представлена структурная схема и описан принцип работы измерительной установки для фотоэлектрической диагностики биполярных и гетеробиполярных транзисторов методом локального фотовозбуждения. Установка позволяет сканировать поверхность полупроводниковой транзисторной структуры лазерным излучением, а также строить диаграммы пространственного распределения фототока по кристаллу. Представлены результаты экспериментальных испытаний установки на нескольких типах биполярных транзисторов. Степень неоднородности фотоотклика может быть использована для оценки величины разброса в чувствительности элементов исследуемой структуры и контроля качества.

Ключевые слова: измерительная установка, фотоэлектрический отклик, биполярный транзистор, гетеробиполярный транзистор.

Введение

Мощные биполярные (БТ) и гетеробиполярные (ГБТ) ВЧ и СВЧ транзисторы играют важную роль в современной электронике. Эти приборы для обеспечения требуемых частотных и энергетических характеристик работают, как правило, в тепловых и электрических режимах, близких к предельным, и увеличивающихся плотностях тока. Распределение температуры и плотности тока в структурах таких транзисторов существенно неоднородно [1].

Современные диагностические оптоэлектронные [2] и тепловизионные методы имеют малую пространственную разрешающую способность. Метод фотоэлектрической спектроскопии используется для диагностики дефектов полупроводниковых приборов, в частности, транзисторов, солнечных элементов [3], светодиодов с множественными квантовыми ямами [4]. Метод заключается в возбуждении носителей заряда в структуре контролируемого объекта лазерным излучением и регистрации фотоотклика.

1. Установка для фотоэлектрической диагностики транзисторных полупроводниковых структур

Авторами разработана измерительная установка для диагностики БТ и ГБТ методом локального фотовозбуждения. Установка позволяет получать информацию о параметрах фотоэлектрического отклика БТ и ГБТ с возможностью автоматического сканирования по поверхности и управления параметрами интенсивности фотовозбуждения.

Измерительная установка состоит из трех основных частей: оптической системы, механической системы, а также электронного блока управления. Структурная схема измерительной установки представлена на рис. 1.

Основой механической системы измерительного комплекса является координатный столик, который позволяет перемещать исследуемый образец (ИО) при помощи микровинтов в трех плоскостях. Поворот микровинтов столика осуществляется с помощью шаговых двигателей, обеспечивающих минимальный шаг перемещения ИО по осям XY в 5 мкм.

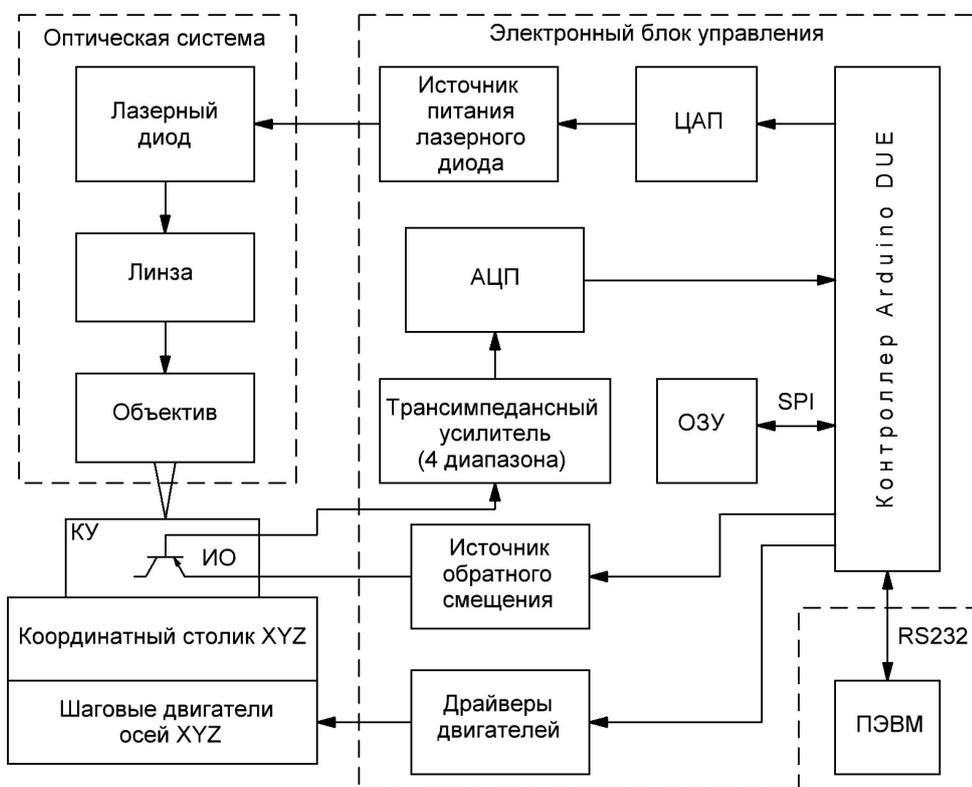


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки для диагностики полупроводниковых транзисторных структур.

Коллиматорная линза и объектив предназначены для точной фокусировки лазерного луча на поверхности кристалла при установке ИО различной толщины.

Основой электронного блока управления является контролер Arduino Due, который управляет процессом измерения и обеспечивает передачу результатов измерения на ПЭВМ. Контроллер вырабатывает управляющие сигналы, необходимые для шаговых двигателей, считывает результаты измерений.

В качестве измерителя токового сигнала с ИО используется трансимпедансный усилитель с внутренним переключением диапазонов измерения. Источник обратного смещения позволяет подавать дополнительное смещение на переходы ИО при проведении исследований.

2. Экспериментальные результаты измерения фотоэлектрического отклика транзисторных структур

В качестве объектов для апробации экспериментальной установки выбраны транзисторы: КТ819АМ, КТ840Б и КТ504А. Для обеспечения возможности фотовозбуждения участков поверхности кристаллов колпачки корпусов транзисторов были аккуратно удалены. В качестве источника лазерного излучения используется лазерный диод с длиной волны 405нм, мощностью 50 мВт. Диаметр сфокусированного пятна оценивался ПЗС-матрицей SC5239S и составляет 10 мкм.

При проведении исследований на установке фиксировался фототок перехода база - эмиттер транзистора. Наибольший интерес представляет величина пространственной неоднородности распределения фототока между элементами структуры кристалла транзистора.

На рис. 2 (а) приведена фотография структуры кристалла транзистора КТ819АМ и пространственное распределение фототока перехода база-эмиттер без напряжения обратного смещения (б). Шаг сканирования по осям ХУ 40 мкм, время сканирования образца 20 мин.

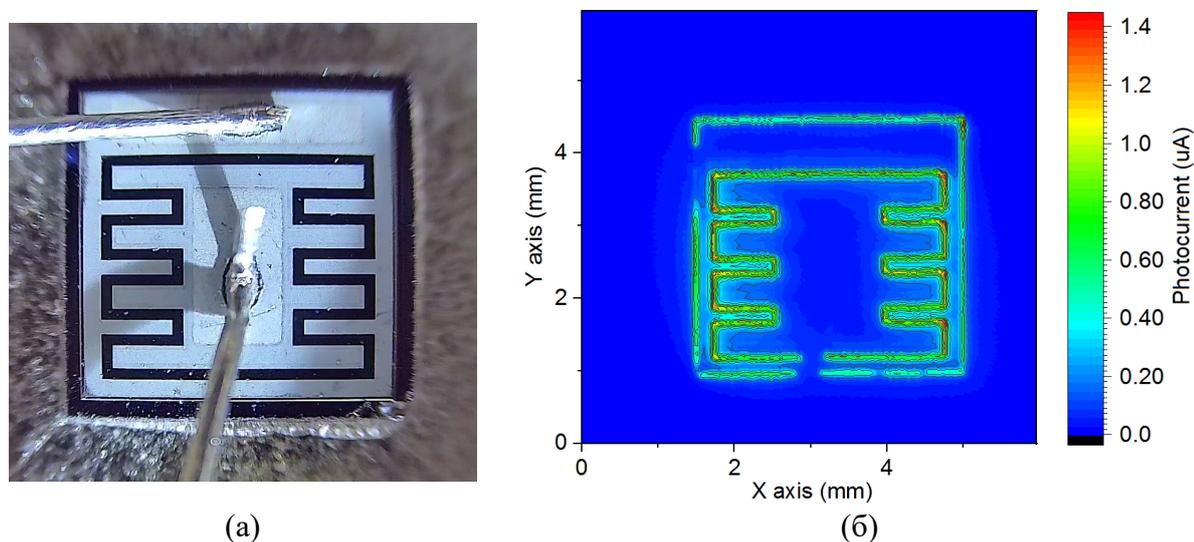


Рис. 2. Общий вид структуры транзистора КТ819АМ (а) и пространственное распределение фототока перехода база-эмиттер при локальном фотовозбуждении (б).

Из рисунка видно, что максимальное значение фототока наблюдается на границах базовых и эмиттерных дорожек структуры транзистора. При этом распределение фототока вблизи границ базовых дорожек структуры с эмиттерными имеет неоднородный характер.

Выводы

В работе представлена автоматизированная установка для фотоэлектрической диагностики транзисторных структур с возможностью сканирования ИО при возбуждении

лазерным излучением его кристалла и фиксацией измеренного значения фототока. Результаты апробации описанного метода фотоэлектрической диагностики в режиме статического фотовозбуждения на транзисторных структурах показывают наличие неоднородного распределения фототока вблизи границ базовых дорожек структуры с эмиттерными. Наличие неоднородности распределения фототока транзисторных структур может быть обусловлено внутренними дефектами и неоднородностями кристалла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-29-01134.

Список литературы

1. Сергеев В.А., Ходаков А.М. Двухсекционная модель токораспределения в полосковых структурах биполярных и гетеробиполярных СВЧ транзисторов // Радиотехника и электроника. – 2022. – № 11. - С. 1146-1151.
2. Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Козликова И.С. Оптоэлектронные методы дистанционного контроля температуры активных элементов электронных модулей // Надежность и качество -2021 : труды международного симпозиума. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. – С. 38-41.
3. B. T. van Gorkom, T. P. A. van der Pol, K. Datta, M. M. Wienk, R. A. J. Janssen, "Revealing defective interfaces in perovskite solar cells from highly sensitive sub-bandgap photocurrent spectroscopy using optical cavities," Nature Communications, vol. 13, Art. Number 349, January 2022.
4. M. V. Baranovskiy, G. F. Glinskii, M. S. Mironova, "Photoelectric diagnostics method for InGaN/GaN multiple-quantum-well heterostructures," Semiconductors, vol. 47, pp. 58–62, January 2013.

Photoelectric diagnostics of bipolar transistor structures

Director, Doctor of Engineering degree, Sergeev V.A.^{1,2} (SPIN: 5188-7405),
Deputy Director for Research, Ph.D., Frolov I.V.¹ (SPIN: 9046-9829)
Researcher, Radayev O.A.¹ (SPIN: 8569-2323)
Postgraduate student, Kazankov A.A.² (SPIN: 5696-6415)

¹ Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk

²Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk
sva@ulstu.ru

Abstract: The paper presents a schematic diagram and describes the principle of measuring unit for photoelectric diagnostics of bipolar and heterobipolar transistors by the local photoexcitation method. The unit allows to scan the surface of semiconductor transistor structure by laser radiation and to plot the diagrams of spatial distribution of photocurrent over the crystal. The results of experimental tests of the unit on several types of bipolar transistors are presented. The degree of heterogeneity of photocurrent can be used to estimate the magnitude of dispersion in the sensitivity of the elements of the studied structure and quality control.

Keywords: measuring unit, photoelectric response, bipolar transistor, heterobipolar transistor.

Исследование тонких пленок ВС_x, полученных методом лазерного напыления

Быков А.А.^{1,2}, Корнеева А.А.¹, Андреев А.В.¹, Белых А.Ю.^{1,2}, Ляшенко А.И.¹,
Кукушкин В.А.¹, Кутуза И.Б.¹, Зинин П.В.¹

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия, 117342,
Москва, Бутлерова ул., 15

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, Москва,
Красноказарменная ул., 14
bykov@ntcup.ru, bykova@mpei.ru

Аннотация: Исследование углеродных материалов, обладающих высокой электрической проводимостью или сверхпроводимостью, имеет большое значение в науке и электронике. Углеродосодержащие плёнки ВС_x обладают высокой твёрдостью и стойкостью к агрессивным средам, обладают высокой электрической проводимостью при нормальных условиях и могут становиться сверхпроводниками при низких температурах. В настоящей работе представлены результаты измерения упругих и электрических свойств тонкой плёнки ВС₅.

Ключевые слова: лазерное напыление, всх, алмазоподобные пленки, проводящие пленки.

Введение

В электронике тонкие плёнки выполняют роль электрических проводников, стойких к агрессивному воздействию внешних сред.

Существует множество различных способов получения тонких пленок, но наиболее простым для подбора параметров напыления является метод импульсного лазерного напыления (Pulsed Laser Deposition - PLD). Возможна дальнейшая оптимизация метода путем тонкой настройки энергии в пятне, частоты и длительности повторения импульсов лазерного излучения [1, 2].

В качестве материала для создания пленок используются различные неорганические соединения, например углеродосодержащие кристаллические соединения в системе В-С-N [3]. Гетеро-алмазные соединения, такие как ВС_x (с-ВС_x) могут формировать в процессе осаждения на подложку алмазоподобную пленку с большой концентрацией sp³ связей, высоким коэффициентом теплопроводности, высокой твердостью и сверхпроводимостью. Однако из-за большой ширины запрещенной зоны алмазоподобные пленки необходимо легировать ионами бора, тогда такие пленки будут становиться р-полупроводниками [4].

Результаты

В работе [5] подробно описана установка для напыления пленок, на которой проведен ряд экспериментов. Изучена проводимость пленки, получаемой из спрессованной смеси бора и углерода ВС₅. Мишень ВС₅ распыляли в камере на подложку из кремния при давлении в камере 1×10^{-6} Па. Получены однородные пленки толщиной 46 нм с вкраплениями бора. Толщина пленок и проводимость измерялась на атомно-силовом микроскопе. В качестве проводящего эталона использовался пиролитический графит.

Выводы

Методом лазерного напыления на подложку из кремния получена пленка ВС₅, сопротивление которой ниже, чем у пиролитического графита. Дальнейшее увеличение проводимости можно связать со степенью легирования углеродного соединения бором.

Список литературы

1. Sreenivas V., Subedi B., Boyd I., Chrisey D. Pulsed laser deposition of thin films (Chapter 10) 2nd Edition Handbook of Laser Technology and Applications Lasers Applications: Materials

- Processing and Spectroscopy (Volume Three) / Edited by: Chunlei Guo, Subhash Chandra Singh, 2021. P. 111-124.
2. Singh R.K., Narayan J. Pulsed-laser evaporation technique for deposition of thin films: Physics and theoretical model // Physical Review B. 1990. V. 41(13). P. 8843.
 3. Zinin P.V., Ming L.C., Kudryashov I., Konishi N., Manghnani M.H., Sharma S.K. Pressure- and temperature-induced phase transition in the B–C system // Journal of Applied Physics. 2006. V. 100(1). P. 013516.
 4. Bouchacourt M., Thevenot F. The properties and structure of the boron carbide phase // Journal of the Less Common Metals. 1981. V. 82. P. 227.
 5. Зинин П.В., Ляшенко А.И., Быков А.А., Корнеева А.А., Андреев А.В., Белых А.Ю., Краснобородько С.Ю., Филоненко В.П. Разработка установки импульсного лазерного напыления для получения углеродосодержащих наноплёнок, легированных ионами бора // Физические основы приборостроения. 2022. № 11(4). С. 24.

Применение магнитной дефектоскопии для оценки качества металлических изделий

главный инженер, Куковьякин А.И.¹
старший научный сотрудник, к.т.н., Мартыанов П.С.¹ (SPIN: 8194-0499)
Николаев Ю.Л.²
Борисенко А.А.³

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

²ФГБОУ ВО «МИРЭА-Российский технологический университет», Москва.

³Общество с ограниченной ответственностью «ТМС РУС» (ООО «ТМС РУС»), Москва.
La3232@mail.ru

Аннотация: приведена методика и техническое описание виброиндукционного преобразователя, который возможно использовать для регистрации величин рассеивания магнитного поля над дефектными участками поверхности металлических изделий, намагниченных постоянным магнитным полем. Описаны характеристики сигнала с виброиндукционного преобразователя, на основании которых выявляют дефекты в металле. Показаны результаты экспериментов, которые подтверждают достоверность методики.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, дефектоскопия, виброиндукционный преобразователь, магнитное поле, обработка информации.

Введение

Металлические конструкции в результате эксплуатации подвергаются различным внешним воздействиям, среди которых могут быть ударные нагрузки, статическая нагрузка, коррозия, усталость металла и т.д. В результате образуются повреждения деталей, которые необходимо вовремя отслеживать. Для регистрации дефектов в изделиях из металла существуют несколько способов получения информации, один из них это использование магнитной дефектоскопии.

Измерительные методы магнитной дефектоскопии основаны на получении и обработке измерительной информации о распределении напряженности локального магнитного поля, возникающего над дефектными участками поверхности намагниченных объектов в виде поверхностных трещин, расслоений внутри слоя, неоднородности магнитных свойств материала объекта контроля. Для регистрации магнитных полей дефектов используют одинарные магнитостатические (преобразователи Холла, феррозонды и др.), дифференциальные магнитостатические (градиентометрические) и дифференцирующие

(индукционные) первичные измерительные преобразователи. При этом ось чувствительности преобразователя ориентируют на регистрацию нормальной или тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля дефекта.

Основная проблема получения достоверной информации заключается в необходимости отстройки сигнала преобразователя от шумовых факторов как детерминированного, так и случайного характера. Как показывают исследования, изложенные в других работах, наиболее высокое соотношение сигнал/фон достигается с использованием виброиндукционного преобразователя (ВИП). Это объясняется дифференцирующим свойством преобразования измерительной информации. Кроме того, в отличие от магнитостатических преобразователей, сигнал ВИП характеризуется большим числом информативных параметров, однозначно связанных с параметрами распределения составляющих напряженности магнитного поля дефекта. В частности, при колебаниях катушки тангенциально ориентированного ВИП над центром магнитного поля дефекта с частотой ω , спектр сигнала содержит только четные гармоники с доминированием гармоники с частотой 2ω . При этом нечетные гармоники обращаются в ноль, изменяя фазу на 180° . При использовании нормально ориентированной катушки спектр сигнала содержит нечетные гармоники, с доминированием гармоники с частотой Ω , а четные гармоники обращаются в ноль, с изменением фазы на 180° . Таким образом, в отличии от магнитостатических преобразователей, информативным параметром сигнала которых является только амплитуда, информативными параметрами ВИП являются амплитуда и фаза гармоник, кратных частоте колебаний катушки.

Очевидно, что для повышения достоверности обнаружения дефектов целесообразно создание двухкомпонентного ВИП, ориентированного на одновременное получение измерительной информации как по нормальной, так и по тангенциальной составляющим напряженности магнитного поля дефекта.

The use of magnetic flaw detector to assess the quality of metal products

Chief engineer, Kukovyakin A.I.¹

Senior Researcher, Ph.D., Martyanov P.S.¹ (SPIN: 8194-0499)

Nikolaev Yu.L.²

Borisenko A.A.³

¹Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

²MIREA – Russian technological university, Moscow

³TMS RUS, Moscow

La3232@mail.ru

Annotation: The technique and a technical description of the vibration -induction converter are given, which can be used to register the values of dispersing the magnetic field above the defective areas of the surface of metal products, magnetized by a constant magnetic field. The characteristics of the signal with a vibration engine converter are described, on the basis of which defects in the metal are detected. The results of experiments are given that confirm the reliability of the methodology.

Keywords: non - destructive control, flaw detector, vibration engine converter, magnetic field, information processing.

Временные задержки в приёмном блоке системы регистрации быстропротекающих процессов.

аспирант, Ступин И.А.
главный научный сотрудник, д.т.н., Вагин В.А.
научный сотрудник, Костюковский С. Р.
старший научный сотрудник, Хорохорин А.И.

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

Аннотация: Рассматривается блок приёма оптического излучения электронной системы регистрации быстропротекающих процессов. Непосредственные, контактные методы контроля температуры невозможны при проведении измерений высокотемпературных технологических и взрывных процессов, в которых происходит уничтожение измерительных датчиков. Использование бесконтактного метода с помощью оптического волокна частично решает эту проблему. Получение экспериментальных значений временных задержек распространения сигнала в приёмном блоке позволит провести синхронизацию поступающих сигналов и оценить их влияние на точность измерения температуры.

Ключевые слова: задержка, температура, оптоволокно.

Введение

Система регистрации основана на спектральном методе измерения температуры, где некоторое количество оптоволоконных каналов являются приёмниками излучения. Каждый канал производит измерения на определённой длине волны, которые по физическим причинам сопровождаются ошибками и временными задержками. Это в свою очередь приводит к ошибкам в расчёте температуры. Причиной их является спектральная дисперсия показателей преломления оптоволоконного кабеля, его изгибы, ёмкость детектора, первичный усилительный каскад и т.п. Экспериментальное определение конкретного вида потерь представляет достаточно сложную физико-техническую задачу. С точки зрения корректировки результатов измерения нас интересуют полная временная задержка оцифрованного сигнала в каждом канале, безотносительно ее происхождения.

В работе описан лабораторный эксперимент регистрации лазерного монохроматического импульсного излучения с длительностью импульсом 5 нс. Оптоволокно используется как приёмник излучения для передачи его на фотодиод включённый по трансимпедансной схеме, сигнал с которого оцифровывается осциллографом.

1. Эксперимент

Схема эксперимента, представленная на рис. 1, была собрана на оптическом столе. Лазер 1 был направлен на торцы четырёх пятиметровых оптоволокон 2, собранных вместе. Фокусирующая линза 3 и фотодетектор 4 расположены в корпусе, который через SMA разъём сочленяется с противоположным концом оптоволокон. Детектор впаивается в печатную плату с первичным усилителем и соединён с осциллографом.

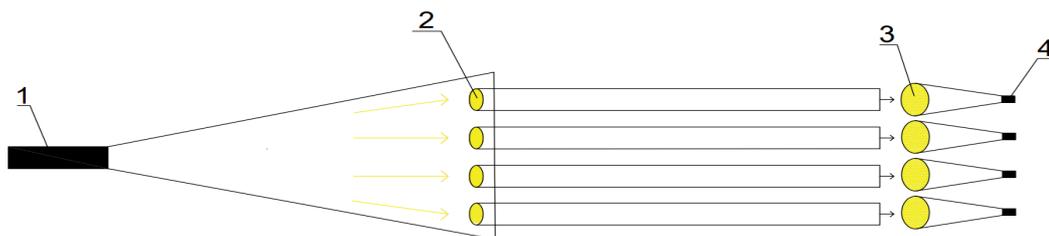


Рис. 1. Схема эксперимента.

На рис. 2 представлен результат измерения.

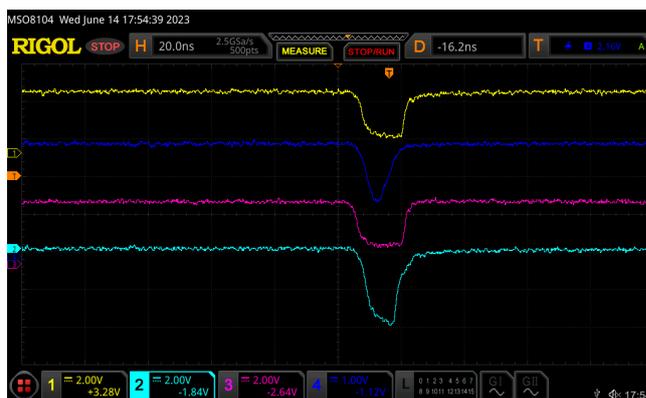


Рис. 2. Результат измерения.

2. Анализ результата

Измерение показало наличие временных задержек между каналами, порядка 2-4 нс. Оценить масштаб влияния их на измерение температуры является сложной математической задачей, так как вариаций ошибок и количества каналов большое множество. Точность сильно зависит от временного диапазона измерения и от количества отсчётов для аппроксимации МНК. Очевидно, что при длительности измерения сопоставимом с задержкой, происходит сильное рассогласование по времени регистрации излучения, вплоть до выхода значения за пределы диапазона измерения, тогда ошибка в измерении может достигать больших величин.

Выводы

Эксперимент показал наличие временных задержек в приёмном блоке. Выявил очевидную необходимость проведения калибровок разрабатываемой системы, получения поправочных коэффициентов для каждого канала измерения. Необходимо дополнительное моделирование по оценке допустимых задержек и определению количества каналов для сохранения точности измерения температуры.

Список литературы

1. Магунов А.Н., Спектральная пирометрия, Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2012 г.
2. Игнатов А.Н., Оптоэлектроника и фотоника, 2017 г.

Time Delays in the Receiving Unit of the System for Recording Fast-Flowing Processes

Postgraduate student, Stupin I.A.
Senior Researcher, Doctor of Engineering degree, Vagin V.A.
Researcher, S.R.Kostyukovsky
Senior Researcher, Khorokhorin A.I.

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
s2pin@rambler.ru

Abstract: The unit for receiving optical radiation of the electronic system of registration of high-speed processes is considered. Direct, contact methods of temperature control are impossible for measurements of high-temperature technological and explosive processes in which destruction of measuring sensors takes place. The use of non-contact method using optical fiber partially solves this problem. Obtaining experimental values of time delays of signal propagation in the receiving unit will allow to synchronize the incoming signals and assess their impact on the accuracy of temperature measurements.

Keywords: delay, temperature, optical fiber.

Быстрое измерение распределения температуры металлов, нагретых с помощью лазерного излучения, с использованием мультиспектральной видеокамеры

стажер-исследователь, Храмов Н.А.¹
научный сотрудник, к.т.н., Булатов К.М.¹

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
hramov.nikita98@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена задача создания высоких температур на поверхности металла с помощью импульсного ИК волоконного лазера YAG:Nd, а также способы быстрого измерения распределения температуры в пятне нагрева при помощи мультиспектральной видеокамеры.

Ключевые слова: лазерная резка металлов, лазерный нагрев, быстрое измерение распределения температуры.

Введение

Точные бесконтактные измерения распределения температуры поверхности во время лазерной обработки материалов остаются сложной задачей из-за определения значений коэффициента излучения в зависимости от температуры и длины волны. Напрямую измерить коэффициент излучения трудно, так как он постоянно изменяется в области взаимодействия лазера с образцом, где преобладают температурные градиенты, а изменение положения поверхности в пространстве сильно усложняет измерение. Уменьшить ошибку в измерении температуры при неизвестной излучательной способности можно увеличив количество длин волн, на которых производятся измерения. При помощи мультиспектральной камеры возможно одновременно получить изображение нагретой поверхности сразу на 16 длинах волн.

Анализ температурной карты во время лазерного нагрева

Представлен новый метод быстрого измерения поверхностного распределения температуры на основе 16-ти цветной видеокамеры. Показано, что метод мультиспектрального измерения работоспособен и позволяет получать поверхностные распределения температур объектов неизвестного состава. Измерено распределение температуры на поверхности алюминиевой пластины, нагретого лазерным излучением, методом мультиспектральной камеры, показанное на рисунке ниже.

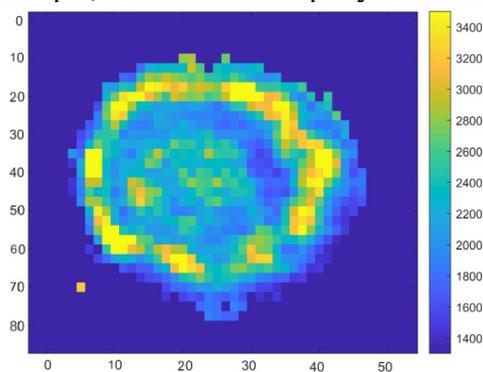


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности алюминиевой пластинки при лазерном нагреве, при времени экспонирования 1 мс.

Список литературы

1. К.М. Булатов, П.В. Зинин и др., Мультиспектральная камера для динамических измерений распределения высоких температур на поверхности твёрдых тел, «СВЕТОТЕХНИКА», 2022, № 5

Fast measurements of the temperature distribution of metals heated by laser radiation using a multispectral video camera

Trainee researcher, Khramov N.A.
Researcher, Ph.D., Bulatov K.M

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation, Moscow
hramov.nikita98@mail.ru

Abstract: The problem of creating high temperatures on a metal surface using a pulsed IR YAG:Nd fiber laser, as well as methods for fast measuring the temperature distribution in a heating spot using a multispectral video camera, is considered.

Keywords: laser cutting of metals, laser heating, rapid measurement of temperature distribution.

Introduction

Accurate non-contact measurements of the surface temperature distribution during laser material processing remain challenging due to the determination of emissivity values as a function of temperature and wavelength. It is difficult to directly measure the emissivity, since it constantly changes in the region of interaction between the laser and the sample, where temperature gradients predominate, and a change in the position of the surface in space greatly complicates the measurement. It is possible to reduce the error in temperature measurement at unknown emissivity by increasing the number of wavelengths at which measurements are made. Using a multispectral camera, it is possible to simultaneously obtain an image of a heated surface at 16 wavelengths at once.

Analysis of the temperature map during laser heating

A new method for rapid measurement of surface temperature distribution based on a 16-color video camera is presented. It is shown that the multispectral measurement method is efficient and allows one to obtain surface temperature distributions for objects of unknown composition. The temperature distribution on the surface of an aluminum plate heated by laser radiation was measured using a multispectral camera method, shown in the figure below.

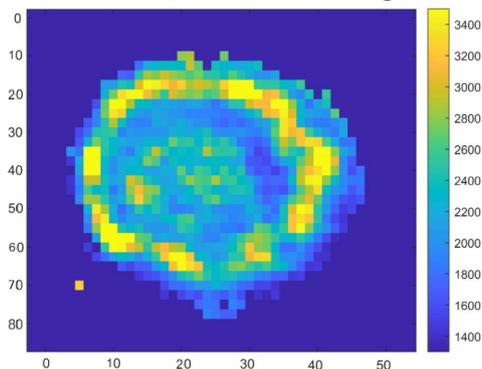


Fig. 1. Temperature distribution on the surface of an aluminum plate during laser heating, with an exposure time of 1 ms

References

1. K.M. Bulatov, P.V. Zinin et al., Multispectral camera for dynamic measurements of the distribution of high temperatures on the surface of solids, SVETOTEHNIKA, 2022, No. 5

Определение оптимального диапазона длин волн для дистанционного измерения температуры и излучательной способности

аспирант, Гришаев П.А.¹ (SPIN: 3881-3355),
ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н., Зинин П.В.¹ (SPIN: 3725-9090),
директор института, д.ф.-м.н., Булатов М.Ф.¹ (SPIN: 2995-6207),
студент, Андреев М.И.²

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

²Московский государственный университет, факультет космических исследований,
Москва
poll.97@yandex.ru

Аннотация: Работа посвящена определению оптимального интервала длин волн при дистанционном измерении температуры и коэффициента спектрального излучения, или излучательной способности (далее излучательной способности) с помощью метода наименьших квадратов (далее МНК) в приближении серого тела, где погрешность измерения данных параметров будет минимальной. В работе кратко изложен подход к определению температуры и излучательной способности, а также их ошибок измерений. Рассмотрены теоретические гипотезы для величины произведения длины волны минимальной погрешности на температуру излучающего тела. Показано, что значение вышеупомянутого параметра лежит между значениями, предсказанными существующими гипотезами.

Ключевые слова: дистанционное измерение температуры, дистанционное измерение коэффициента излучения, погрешности дистанционного измерения температуры, погрешности дистанционного измерения коэффициента излучения, метод наименьших квадратов.

Введение

Нередко в экспериментах по дистанционному измерению температуры и излучательной способности и их распределения необходим быстрый и устойчивый алгоритм нахождения параметров и их погрешностей. Один из параметров прибора, который можно контролировать, – это интервал длин волн, в котором производятся измерения.

Таким образом, работа посвящена выбору контролируемого интервала длин волн, оптимального для измерений температуры и излучательной способности.

1. Описание метода

Для определения параметров излучающего тела применяется аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК) спектральной интенсивности тела. Для аппроксимации используется формула Планка в приближении серого тела (1). При этом излучательную способность полагают независимой от длины волны излучения [1], $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$, т.к. измерения производятся в узком спектральном интервале 100 – 200 нм [2].

$$I(\lambda, T) = \varepsilon \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]} = \varepsilon L_{BB}(\lambda, T), \quad (1)$$

Где $I(\lambda, T)$ – спектральная плотность энергетической светимости (далее для краткости спектральная интенсивность) ($\text{Вт}/\text{м}^3$), ε – излучательная способность, λ – длина волны (нм), T – абсолютная температура (К), c_1 – комбинация констант, $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7417 \times 10^{29} (\text{Вт} \cdot \text{нм}^5 / \text{м}^3)$, c_2 – комбинация констант, $c_2 = hc/k_B = 1.4394 \times 10^7 (\text{нм} \cdot \text{К})$.

Аппроксимация методом наименьших квадратов осуществляется посредством минимизации (в общем случае численной) выражения (2).

$$S(\varepsilon, T) = \sum_{i=1}^n \omega_i \left[I_i(\lambda_i) - \varepsilon L_{BB_i}(\lambda_i, T) \right]^2, \quad (2)$$

Где $\omega_i = 1/\delta_i^2$, δ_i – погрешность i -того измерения. Для решения используется гибридный метод [3]. Суть метода заключается в переходе от двумерной минимизации выражения (2) по (ε, T) к одномерной минимизации по T (3). Для этого от выражения (2) берут производную по ε , приравнивают к нулю, выражают ε и подставляют в уравнение (2) [3].

$$S(T) = \sum_{i=1}^n \omega_i \left[I_i \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i I_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i L_{BB_i}^2} L_{BB_i} \right], \quad (3)$$

$$W = \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 \\ 0 & \omega_n \end{pmatrix}.$$

Общепринятым известным способом подсчёта погрешностей при использовании МНК является использование матрицы ковариаций [4-8].

Последовательность вычислений ошибок состоит в следующем. Вычисляется матрица производных J [4].

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varepsilon L_{BB_1}}{\partial T} & \frac{\partial \varepsilon L_{BB_1}}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial \varepsilon L_{BB_n}}{\partial T} & \frac{\partial \varepsilon L_{BB_n}}{\partial \varepsilon} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Затем вычисляется матрица ковариаций, в ней выбираются диагональные элементы, диагональные элементы умножаются на коэффициент Стьюдента (5).

$$s_T^2, s_\varepsilon^2 = \text{diagonal} \left((J^T W^T J)^{-1} \right)$$

$$\Delta T = s_T \cdot t(\alpha = 0,95, n)$$

$$\Delta \varepsilon = s_\varepsilon \cdot t(\alpha = 0,95, n) \quad (5)$$

2. Обсуждение результатов

Здесь и в дальнейшем для определения параметров и их погрешностей используется компьютерное моделирование сигнала по формуле Планка с последующим умножением на излучательную способность, ε (1), и наложением шума ($SNR = 30$). Значение $SNR = 30$ соответствует уровню шумов, наблюдаемых при измерениях излучения в экспериментах по лазерному нагреву образцов в ячейках алмазных наковален [9].

Таблица 1. Зависимость относительной ошибки измерения температуры и коэффициента излучения от температуры для следующих параметров зашумлённого спектра $\varepsilon=0,3$; $\lambda=650-850$ нм; $SNR=30$; $\Delta\lambda =2$ нм; $n = 100$: $T=1000-6000$ К

$T_{\text{моделирования, К}}$	$\Delta T/T, \%$	$\Delta \varepsilon/\varepsilon, \%$
1000	0,42	5,61
2000	0,24	1,63
3000	0,19	0,45
4000	0,02	0,10
5000	0,15	0,51
6000	0,28	0,82

Исходя из данных таблицы табл.1 можно сделать следующее предположение: чем больше нелинейность спектра излучающего тела в данном спектральном диапазоне, тем меньше относительная погрешность измерения параметров. Т.е. можно предположить, что произведение длины волны в минимуме относительных погрешностей на температуру будет равно $c_2/5$, аналогично закону смещения Вина.

В работе [10] была предпринята попытка объяснить такой характер погрешностей. Авторы получили оценку для произведения длины волны в минимуме относительных погрешностей на температуру равную $c_2/6$.

Для проверки гипотез были смоделированы спектры излучения тела с температурами в диапазоне 1000 – 6000 К, и в диапазонах длин волн $\lambda_1 = 500 - 4000$ нм, $\lambda_2 = (\lambda_1 + 200)$ нм. При каждой температуре был выделен спектр с минимальной относительной погрешностью. Часть характерных точек приведены в табл. 2.

Таблица 2. Длины волн минимальных относительных погрешностей и относительные погрешности измерения температуры и излучательной способности в зависимости от температуры излучающего тела. Параметры смоделированного спектра излучения $SNR = 30$, $T = 1000 - 6000$ К, $\varepsilon = 0.3$, $\lambda_1 = 500 - 4000$ нм, $\lambda_2 = (\lambda_1 + 200)$ нм.

T, K	$\min(\lambda), nm$	$\Delta T/T, \%$	$\Delta \varepsilon/\varepsilon, \%$
1000	2800	0,00382	0,0191
2000	1360	0,00818	0,0407
3000	880	0,0124	0,0614
4000	640	0,0173	0,0858
5000	500	0,0221	0,109
6000	400	0,0268	0,132

Произведение $\lambda_0 T_0$ было аппроксимировано линейной зависимостью. В результате получили следующие коэффициенты (табл. 3).

Таблица 3. Оценка произведения длины волны минимума относительной погрешности на температуру излучающего тела $\lambda_0 T_0 = a \cdot T_0 + b$, $\lambda_0 T_0 - c_2/5 = a' \cdot T_0 + y$, $\lambda_0 T_0 - c_2/6 = a'' \cdot T_0 + y'$, в зависимости от температуры излучающего тела.

a, nm	$b, K \cdot nm$	$y, K \cdot nm$	$y', K \cdot nm$
$-(83.8 \pm 7.2)$	$(2871 \pm 34) \times 10^3$	$-(10 \pm 34) \times 10^3$	$(472 \pm 34) \times 10^3$

Как видно из таблицы табл.3 с ростом температуры $\lambda_0 T_0$ отклоняется от гипотезы $c_2/5$ и приближается к гипотезе $c_2/6$.

Выводы

Таким образом, в настоящей работе показано, что существующие оценки произведения длины волны минимума относительных погрешностей на температуру излучающего тела не верны. В диапазоне температур излучающего тела 300 — 6000 К зависимость произведения $\lambda_0 T_0$ от температуры излучающего тела можно считать линейной. Значения произведения $\lambda_0 T_0$ в диапазоне температур излучающего тела 300 — 6000 К лежат между существующими теоретическими оценками данного произведения: $c_2/5$ и $c_2/6$.

Список литературы

1. A. N. Magunov. Spectral pyrometry (Review) // Instruments and Experimental Techniques. 2009. V. 52. № 4. P. 451-472. <https://doi.org/10.1134/s0020441209040010>.
2. A. N. Magunov. The Choice of a Spectral Interval within which a Heated Opaque Object Radiates as a Gray Body // Instruments and Experimental Techniques. 2010. V. 53. № 6. P. 910-914. <https://doi.org/10.1134/s002044121006028x>.
3. K. M. Bulatov, Y. V. Mantrova, A. A. Bykov, M. I. Gaponov, P. V. Zinin, A. S. Machikhin, I. A. Troyan, V. I. Batshev, I. B. Kutuza. Multi-spectral image processing for

- the measurement of spatial temperature distribution on the surface of the laser heated microscopic object // *Computer Optics*. 2017. V. 41. № 6. P. 864-868. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-6-864-868>.
4. Helcio O., Olivier F., Maillet D., Renato C. Thermal measurements and inverse techniques. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 776 p.
 5. Lane B., Whinterton E., Madhavan V., Donmez A. Uncertainty of temperature measurements by infrared thermography for metal cutting applications // *Metrologia*. 2013. V. 50. № 6. P. 637-653. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/6/637>.
 6. Strutz T. Data Fitting and Uncertainty. A practical introduction to weighted least squares and beyond. 1st ed. Wiesbaden: Springer, 2011. 281 p.
 7. Stepanov S., Sheindlin M. Statistical analysis of measurement results in multiwavelength pyrometry // *High Temperature*. 2017. V. 55. P. 802-807. <https://doi.org/10.1134/S0018151X17040204>.
 8. Duvaut Th. Comparison between multiwavelength infrared and visible pyrometry: Application to metals // *Infrared Physics & Technology*. 2008. V. 51. № 4. P. 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2007.12.001>.
 9. Зинин П.В., Булатов К.М., Быков А.А., Мантрова Ю.В., Кутуза И.Б. Дистанционное измерение распределения температуры на поверхности твёрдых тел при воздействии мощного лазера в ячейках высокого давления // *Успехи физических наук*. 2022. Т. 192. № 8. С. 1-13. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.05.038996>.
Zinin P.V., Bulatov K.M., Bykov A.A., Mantrova Yu.V., Kutuzova I.B. Remote measurement of the temperature distribution on the surface of solids under high-power laser irradiation // *Phys. Usp.* 2022. V. 65. № 8. P. 852–863. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.05.038996>.
 10. Rodiet C., Remy B., Degiovanni A. Optimal wavelengths obtained from laws analogous to the Wien's law for monospectral and bispectral methods, and general methodology for multispectral temperature measurements taking into account global transfer function including non-uniform emissivity of surfaces // *Infrared Physics & Technology*. 2016. V. 76. № 3. P. 444-454. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.04.006>.

Determination of the optimal wavelength range for remote measurement of temperature and emissivity

Ph. D. student, Grishaev P.A.¹ (SPIN: 3881-3355)

Leading Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences., Zinin P.V.¹ (SPIN: 3725-9090)

Institute head, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Bulatov M.F.¹ (SPIN: 2995-6207)

Student, Andreev M.I.²

¹Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

²Moscow State University, Faculty of Space Research, Moscow
poll.97@yandex.ru

Abstract: Report is devoted to determination of the optimal wavelength range for remote measurement of temperature and emissivity in the gray body approximation by least square method. Approach of determination of temperature and emissivity and uncertainties of their remote measurement. Two theoretical hypotheses of the composition of the wavelength of the minimum error and temperature of an irradiation body are considered. The value of the above parameter is revealed to be lying between the values predicted by the existing hypotheses.

Keywords: remote temperature measurement, remote emissivity measurement, remote temperature measurement errors, remote emissivity measurement errors, least squares method

Перспективы аддитивной профилизации беспилотных летательных аппаратов

аспирант, Захарова В.О. (SPIN: 2296-5303)
доцент, канд. техн. наук, Селиванов К.В. (SPIN: 7646-7790)

МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия
valeriyashe@yandex.ru, selivanov_kv@mail.ru

Аннотация: В работе рассмотрены перспективы применения аддитивных технологий для профилизации беспилотных летательных аппаратов. Кратко проанализированы основные тенденции профилизации беспилотных летательных аппаратов. Даны рекомендации по реализации компонентов беспилотных летательных аппаратов в условиях "Бережливого производства".

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты профилизация, аддитивные технологии, Бережливое производство.

Введение

В последнее время можно отметить тенденции все более широкого использования аддитивных технологий для профилизации современных беспилотных аппаратов. В общем случае беспилотные летательные аппараты (БПЛА) — это автономные летательные аппараты, которые могут быть управляемыми оператором или функционировать в автономном режиме [1]. Профилизация беспилотных летательных аппаратов включает в себя анализ показателей качества различных компонентов БПЛА, таких как корпус, двигатели, система управления, система сбора данных и другие. Такой системный анализ позволяет определять узкие места в работе БПЛА и формировать рекомендации по увеличению его эффективности и надежности.

Концепция профилизации БПЛА

Аддитивные технологии [2] являются основой профилизации летательных аппаратов. Применение аддитивных технологий позволяет быстро и эффективно изготавливать детали и компоненты систем управления беспилотными летательными аппаратами [3, 4]. Они также позволяют производить более сложные детали, которые сложнее и дороже изготовить традиционными методами.

Профилизация, в свою очередь, позволяет определить наилучшую конфигурацию деталей и систем беспилотных систем, подходящих для различных задач и условий эксплуатации, что повышает их эффективность и надежность, а также улучшает характеристики по безопасности. Аддитивные технологии поддерживают концепцию "Бережливого производства" [5, 6]. Концепция бережливого производства предусматривает минимизацию отходов, экономию ресурсов и устранение излишеств в процессе производства, а также сокращение времени и затрат на производство продукции. Аддитивные технологии, позволяют создавать изделия с минимальным количеством отходов, быстро и с меньшими затратами на производство.

Выводы

Применение профилизации активно осуществляется в авиационной индустрии. БПЛА, созданные с использованием аддитивных технологий и профилизации, могут легко адаптироваться к различным задачам, выполнять их точно и эффективно. Применение аддитивных технологий и профилизации в авиации имеет большой потенциал для создания перспективных продуктов.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проекта «ПРИОР/СН/НУ/22/СП2/5» в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список литературы

1. Лавров А.В., Власов Д.С. Методы и средства мониторинга характеристик БПЛА в реальном времени // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. №4. С.57-66.
2. Vlasov A. I., Juravleva L. V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices // Journal of Physics: Conference Series. V. 2373. N.072035.
3. Власов А.И., Зонтьева Д.Е., Евдокимов В.С., Ревзин Г.Г., Феоктистов Д.В. Гибридная система управления малыми беспилотными летательными аппаратами // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 8. С.15-24.
4. Лавров А.В., Курносенко А.Е., Андрусенко В.В., Солод А.Г. Использование динамических стендов при полунатурном моделировании систем беспилотных летательных аппаратов // Технологии инженерных и информационных систем. 2016. № 8-9 (206). С. 19-25.
5. Власов А.И., Ганев Ю.М., Карпунин А.А. Системный анализ "Бережливого производства" инструментами визуального моделирования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 4 (160). С. 19-24.
6. Власов А.И., Ганев Ю.М., Карпунин А.А. Система 5S-технология создания эффективного рабочего места в концепции "Бережливого производства" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1 (161). С.65-68.

Prospects for additive profiling of unmanned aerial vehicles

postgraduate student, Zacharova V.O. (SPIN: 2296-5303)
Associate Professor, Ph.D., Selivanov K.V. (SPIN: 7646-7790)

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
valeriyashe@yandex.ru, selivanov_kv@mail.ru

Abstract: The paper considers the prospects for the use of additive technologies for the profiling of unmanned aerial vehicles. The main trends in the profiling of unmanned aerial vehicles are briefly analyzed. Recommendations were given on the implementation of components of unmanned aerial vehicles in the conditions of Lean Production.

Keywords: unmanned aerial vehicles profiling, additive technologies, lean production.

Оптимизация конструкции высокотемпературных датчиков давления

инженер - исследователь, Забродин Е.В.

ООО «ГТЛАБ» Нижегородская обл., г. Саров
zabrodin@gtlab.pro

Аннотация: В статье описывается расчетно-экспериментальный метод оптимизации конструкций высокотемпературных датчиков давления с использованием моделирования методом конечных элементов. В модель заложены экспериментально определенные

механические характеристики материала упругого элемента. Указанный подход позволил оптимизировать ряд конструкций.

Ключевые слова: высокотемпературный датчик давления, мембрана, собственная частота.

Введение

В работе будет рассмотрена оптимизация конструкции датчика давления емкостного типа.

1. Статический анализ

Задача решается в упругой постановке. Выполняется анализ напряженно-деформированного состояния (статический анализ) при различных давлениях. Получены картины распределения полных напряжений по Мизесу, перемещения различных точек мембраны, контролировалось не превышение предела текучести в материале мембраны.

Таблица 1. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния конструкции.

Толщина мембраны, мм	Перемещения, мкм	Напряжения, МПа
0,45	7,68	133
0,6	8,46	173
0,9	11,02	208
1,8	9,69	192
2,1	12,13	353
2,3	10,92	452

В табл. 1 указаны экспериментальные результаты, которые согласуются с моделью.

2. Модальный анализ

Таблица 2. Результаты расчетов собственных частот конструкции.

Толщина мембраны, мм	Собственная частота по МКЭ, Гц	Собственная частота по инженерной методике, Гц
0,45	11128	11177
0,6	13168	13176
0,9	17716	19599
1,8	30415	30893
2,1	33995	34486
2,3	35806	36351

Результаты расчета собственных частот по инженерной методике, с использованием формул (1) и (2) согласуются с результатами, полученными с помощью МКЭ.

Расчет собственной частоты мембраны (t):

$$t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}}, \quad (1)$$

где C – жесткость мембраны, Н/м; m – масса центра, кг.

Жесткость мембраны (C) рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{F}{w} \quad (2)$$

где C – жесткость мембраны, Н/м; F – сила, приложенная к мембране, Н; w – перемещение мембраны под действием силы, м.

Зависимость собственной частоты от толщины мембраны приведена на рис. 1.

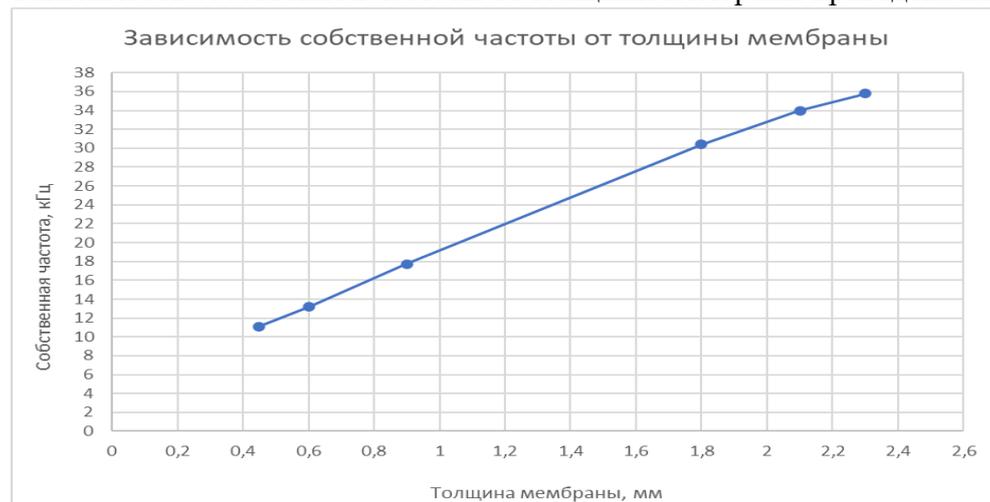


Рис. 1. Зависимость СЧ от толщины мембраны.

Таблица 3.

Толщина мембраны, мм	Собственная частота по МКЭ, Гц	Собственная частота по инженерной методике, Гц
0,45	11128	11177
0,6	13168	13176
0,9	17716	19599
1,8	30415	30893
2,1	33995	34486
2,3	35806	36351

Выводы

Проведены статический (анализ напряженно-деформированного состояния) и модальный анализ (определение собственных частот) датчика 6V202 для различных толщин мембран. Получены картины распределения полных напряжений по Мизесу, перемещения различных точек мембраны. Определены собственные частоты конструкции. Наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Подтверждено, что модель может быть использована для расчета геометрических параметров новых датчиков на требуемые диапазоны давлений.

Список литературы

1. Симчук А.А., «Датчики переменного давления», Мир измерений, 2011, №5(123), с.1.
2. Тимонин Р.М., Храмов А.С., «Емкостные датчики давления» 2016, с.1.
3. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов, Машгиз, 1962.
4. Иванов Д.В., Доль А.В., «Введение в ANSYS Workbench», Саратов, 2016.

Лазерный нагрев в алмазной наковальне для изучения фазовых переходов при высоких давлениях

Булатов К.М., Зинин П.В., Кутуза И.Б., Титов С.А., Быков А.А.

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
117342, Россия, Москва, ул. Бутлерова, 15

В Научно-технологическом центре уникального приборостроения РАН была организована лаборатория спектроскопии экстремального состояния вещества, основными направлениями деятельности которой являются разработка новых приборов и методов исследований вещества при высоких давлениях и температурах. Недавно в лаборатории была создана установка для *лазерного нагрева веществ*, находящихся в ячейках высокого давления.

На основе этой установки был разработан впервые метод измерения распределения температуры и излучательной способности веществ, находящихся при высоких давлениях и температурах. Уникальность разработанного метода и установки является использование двойного акустооптического фильтра (tandem acousto-optical tunable filter), состоящего из двух сопряженных АО кристаллов, соединенных с видеокамерой высокого разрешения [1]. Использование АО фильтра позволяет вычислить распределение температуры и излучательной способности поверхности нагретого тела получается путем подгонки экспериментальной спектральной зависимости интенсивности излучения в каждой точке нагретого объекта к распределению Планка с использованием метода наименьших квадратов. В последние годы нами был предложен новый метод быстрого измерения поверхностного распределения температур на основе восьмицветной видеокамеры [2]. Частота измерения распределения температуры составляет 80 Гц. Разработан математический аппарат для определения распределения температуры в поле зрения камеры без использования информации об излучательной способности. Величина статистической ошибки измерений температуры составляет 10% при температуре 1170 К и спадает до 3% при температуре 1500 К.

В докладе также будут представлены результаты экспериментов по изучению фазовых переходов в углеродных материалах с большой концентрацией азота и бора при высоких давлениях и высоких температурах.



Рис. 1. Фотография установки лазерного нагрева веществ в ячейках высокого давления.

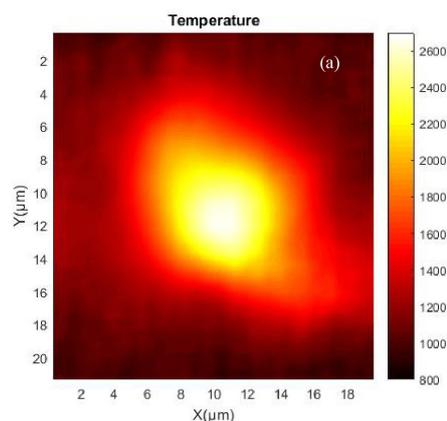


Рис. 2. Двумерное распределение температуры (цветовая карта) на поверхности пластины из железа, нагретой в ячейке высокого давления при 55 ГПа ИР лазером.

Список литературы

1. Зинин, П.В., К.М. Булатов, А.А. Быков, Ю. Мантрова, И.Б. Кутуза, Дистанционное измерение распределения температуры на поверхности твёрдых тел при воздействии мощного лазера в ячейках высокого давления. *Успехи физических наук*. **192**(8) р. 1-13 (2022).
2. К. М. Булатов, П. В. Зинин, А.С. Мачихин, И. Б. Кутуза. «Мультиспектральная камера для динамических измерений распределения высоких температур». *Светотехника*. №5, 67-70 (2022).

Мультиспектральные изображения при измерении распределения температуры

ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н., Зинин П.В.
аспирант Малыгина И.В.

Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва
malixina.ira2013@yandex.ru

Аннотация: Работа посвящена теплофизические свойства материалов, находящихся в экстремальных условиях, при которых давление и температура воздействуют одновременно. Исследования проводились в области бесконтактного определения пространственного распределения термодинамической температуры при неизвестной излучательной способности. Современные исследования в области бесконтактного измерения и контроля температуры и поверхностных свойств объектов и материалов при высоких и экстремально высоких температурах нуждаются в использовании новых подходов, позволяющих решать поставленные задачи в экстремальных условиях при высокой скорости протекания изучаемых процессов.

Ключевые слова: контроль температуры, высокое давление, методы пирометрии, излучательная способность, материалы.

Введение

Термодинамическое состояние любого вещества, характеризующее степень его нагретости определяется с помощью температуры. [1] Температура величина, которая характеризует уровень кинетической энергии движения атомов и молекул, из которых состоит тело. Тепловое движение в твердых телах порождает широкий спектр электромагнитных волн, который называют тепловым излучением. Тепловое излучение нагретого тела содержит информацию о температуре данного тела и находится в оптическом диапазоне длин волн.

Коэффициент теплового излучения материалов – одно из фундаментальных свойств теплового излучения. Он представляет собой отношение интенсивности (яркости) излучающего тела к интенсивности излучения абсолютно чёрного тела в заданном направлении. Измерение коэффициента излучения при высоких температурах важно для понимания множества физических явлений, таких как: определение теплопередачи теплового излучения в ядре Земли [1]; процессов в диффузионном пламени [2]; получения солнечных элементов с низким коэффициентом [3]; в тепловом контроле космических аппаратов; высокоэффективном использовании солнечной энергии и т.д. [4-7]

Энергетические характеристики излучения, имеющего сплошной спектр, зависят от температуры и излучательной способности тела. Равновесным называют излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с веществом. Вопросами измерения

температуры объектов и коэффициента излучения занимается термография. Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda)$ представляет собой коэффициент пропорциональности, который в зависимости от объекта может изменяться от 0 до 1 и оказывает сильное влияние на излучение объекта. Термографические измерения сводятся к регистрации такого излучения и вычислению температуры с помощью закона Планка.

$$I_0 = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (1)$$

где $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт/м² – первая постоянная Планка, $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ М·К – вторая постоянная Планка, λ – длина волны, T – абсолютная температура в кельвинах.

При использовании данного метода температура в каждой точке нагретого лазером тела определяется по большому набору экспериментальных точек на кривой Планка и это позволяет получить высокую точность определения температуры. С использованием метода наименьших квадратов можно получить распределение температуры и излучательной способности поверхности тела путем подгонки экспериментальных данных к распределению Планка. Данное распределение представлено на рис. 1.

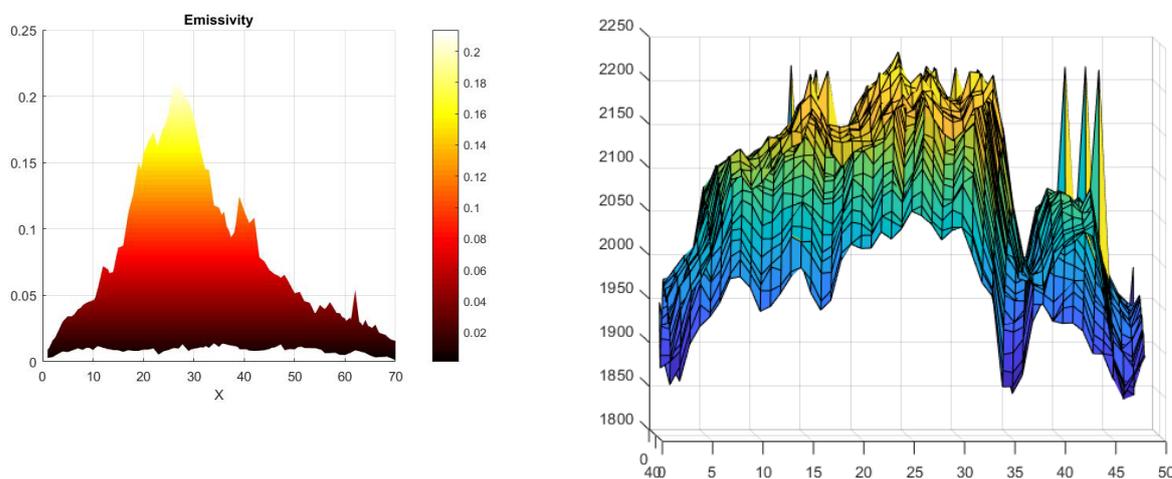


Рис. 1. Распределение температуры и излучательной способности

Одним из главных достоинств нашего метода является возможность получения распределений температуры и коэффициента теплового излучения путём поточечного измерения значений для всего исследуемого участка, в отличие от распространённого измерения средних значений по участку.

Иначе обстоит дело с гиперспектральными изображениями. При тематической классификации таких изображений задача выделения признаков статистическими (параметрическими) методами является обязательным этапом решения задачи распознавания.

Цифровая обработка спектральных изображений, исследуемых образцов заключается в измерении интенсивности спектрального излучения в каждом пикселе мультиспектральных изображений с последующим определением температуры и коэффициента теплового излучения методом наименьших квадратов.

Проанализировав данные, были выявлены следующие закономерности: при одинаковой температуре коэффициент излучения тем меньше, чем больше длина волны; При одинаковой длине волны коэффициент излучения тем больше, чем больше температура.

Список литературы

1. Howell J R, S.R.a.M.M.P., *Thermal Radiation Heat Transfer* (CRC Press), 2010.

2. Jyothi, J., et al., *Measurement of high temperature emissivity and photothermal conversion efficiency of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO spectrally selective coating*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017. 171: p. 123-130.
3. Gonzalez-Fernandez, L., et al., *Analysis of calibration methods for direct emissivity measurements*. Applied Optics, 2010. 49(14): p. 2728-2735.
4. Dubrovinsky, L.S. and S.K. Saxena, *Emissivity measurements on some metals and oxides using multiwavelength spectral radiometry*. High Temperatures-High Pressures, 1999. 31(4): p. 393-399.
5. Magunov, A.N., *Spectral pyrometry (Review)*. Instruments and Experimental Techniques, 2009. 52(4): p. 451-472.
6. Ballico, M.J. and T.P. Jones, *NOVEL EXPERIMENTAL-TECHNIQUE FOR MEASURING HIGH-TEMPERATURE SPECTRAL EMISSIVITIES*. Applied Spectroscopy, 1995. 49(3): p. 335-340.
7. Honnerova, P., Martan, J and Honner, M, *Uncertainty determination in high-temperature spectral emissivity measurement method of coatings*. Applied Thermal Engineering, 2017. №261: p. 124.

Multispectral images for temperature distribution measurement

Leading researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Zinin P.V.,
PhD student Malykhina I.V.

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

Abstract: The work is devoted to the thermophysical properties of materials under extreme conditions, under which pressure and temperature act simultaneously. Research was carried out in the field of non-contact determination of the spatial distribution of thermodynamic temperature at an unknown emissivity. Modern research in the field of non-contact measurement and control of temperature and surface properties of objects and materials at high and extremely high temperatures requires the use of new approaches that allow solving problems under extreme conditions at a high rate of the processes under study.

Keywords: temperature control, high pressure, pyrometry methods, emissivity, materials

High-pressure diamond anvil cell with heating device for X-ray diffraction and Raman spectroscopy *in situ* investigations of phase transitions

Junior Researcher, Bokov A.V.

Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Salamatin D.A.

Leading Design Engineer, Novikov A.P.

Leading Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Lyapin S.G.

Leading Researcher, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Tsvyashchenko A.V.

Vereshchagin Institute for High Pressure Physics RAS, Moscow

bokov@hppi.troitsk.ru

Keywords: diamond anvil cell, heater, collimator.

In a modern experiment at high pressures, it often becomes necessary to perform X-ray diffraction and Raman spectroscopy analysis, which is easily performed at synchrotron centers around the world. As a rule, such experiments are very expensive, and the submission of an

application and its consideration at the respective mega-installations often takes several months. In order to "not stand in line", a high-pressure diamond anvils cell and a sample heating device for in situ X-ray and Raman studies of materials was created at the HPPI RAS.

A completely new method of manufacturing an X-ray collimator has also been developed, which makes it possible to obtain a direct parallel X-ray beam with a spot diameter of less than 100 microns and operate at high temperatures. This collimator can be used in X-ray diffractometer [1]. The use of these devices together makes it possible to carry out experimental work on the study of phase transitions in almost any X-ray laboratory at pressures up to 100 GPa and temperatures up to 650°C. The design of the chamber was also adapted for conducting optical studies using the Raman scattering method and showed its reliability and efficiency during operation. In this case, only air cooling is sufficient for the chamber and no additional water cooling is required, as in [2], which allows it to be used in the most precise experiments.

The above equipment is planned to be used to study phase transitions in functional materials. In particular, to investigate the P-T phase diagram of $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ and $\text{Bi}_{1-x}\text{Tb}_x\text{FeO}_3$ compounds.

The work was partially supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-72-00014, <https://rscf.ru/en/project/22-72-00014/>.

Bibliography

[1] Novikov A. P., Salamatin D. A., Tsvyashchenko A. V., Brazhkin V. V. Method for manufacturing an X-ray collimator / Patent for invention No. 2790441 dated February 21, 2023 (Rospatent)

[2] Instruments and Experimental Techniques, 2021, №3, 158-160

Разработка методики измерения температуры стационарных и быстропотекающих процессов в задачах спектральной пирометрии.

аспирант Гаранин Д.А.

главный научный сотрудник, д.т.н. Вагин В.А.

научный сотрудник Костюковский С.Р.

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
fargist@gmail.com

Аннотация: Измерение температуры стационарных и динамических высокотемпературных объектов являются необходимым инструментом при проведении многих научных и технологических исследований. Рассмотрение спектральных пирометрических систем и эффективных методик их использования является целью предлагаемого доклада.

Ключевые слова: спектральная пирометрия, фурье-спектрометр, планковское распределение, абсолютно черное тело.

Рассматриваются две спектральных системы.

1. Фурье-спектрометр инфракрасного диапазона, который снабжен системой наведения, обеспечивающей показатель визирования примерно 70, что позволяет измерять объекты с пятном визирования порядка 10 см на расстоянии до 10 м. Прибор калибруется посредством эталона АЧТ с температурой до 1773 К. Измерение спектрального исследуемого объекта, учитывающее калибровку, позволяет найти максимум соответствующего планковского распределения. Затем по формуле Вина вычисляется

температура тела. При этом (при необходимости) можно вычислить и его излучательную способность. Диапазон измеряемых температур от 800 К до 2000 К. Прибор предназначен для измерения стационарных процессов.

2. Многоканальная спектральная система ближнего ИК и видимого диапазона. Состоит из системы фотоприемников с соответствующими спектральными светофильтрами. На эту систему направляется исследуемое излучение. Система может измерять температуры динамических объектов с температурами до 3000 – 3500 К и частотным диапазоном до нескольких МГц. Частотный диапазон определяется частотными характеристиками фотоприемников и регистрирующей электроники. Прибор калибруется эталоном АЧТ, что позволяет рассчитать относительные коэффициенты спектральных каналов. Затем полученные спектральные значения аппроксимируются планковским распределением. И по его максимуму находится температура в этот момент времени. В результате всего процесса измерения получаем функцию описывающую поведение температуры объекта во времени.

Список литературы

1. Магунов А. Н., Спектральная пирометрия // Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2012. - 248 с. - ISBN 978-5-9221-1385-4.
2. Вагин В.А., Хитров О.В., Спектральный пирометр и его возможности // Физические основы приборостроения, 2022, №4.
3. Батшев В.И., Вагин В.А., Костюковский С.Р., Фурье-спектрометр для пирометрических измерений // Физические основы приборостроения, 2022, №4.

Перспективы создания отечественного компактного устройства для видеокapиллярoскопии

доцент, к.т.н, Крюков А.В.^{1,2} (SPIN: 1515-2122)
аспирант, Марченко М.О.¹

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва
st.m.mike@mail.ru
kryukov_av@bmstu.ru

Аннотация: Методы современной капиллярoскопии связаны с исследованиями рисунка капилляров мягких тканей человека и параметрами кровотока в них, что позволяет проводить информативную неинвазивную диагностику показателей состояния организма и указывать на те или иные заболевания и реакции на протекающие процессы. Дальнейшее развитие методик капиллярoскопии связано с их объединением с фотоплетизмографией – регистрацией изменений амплитуды колебаний объема крови, возникающих при наполнении капилляров и мелких сосудов в зависимости от фазы кардиоцикла. Это делает актуальной задачу создания достаточно простого и удобного в использовании компактного устройства для проведения видеокapиллярoскопии не только ногтевого ложа, но и других произвольных участков кожи, которое может применяться в ежедневной медицинской практике.

Ключевые слова: видеокapиллярoскопия, фотоплетизмография, дерматоскопия, кровотоков, новообразования.

Введение

В работе рассмотрены отечественные и зарубежные разработки по дерматоскопии и видеокапилляроскопии, а также проведена экспериментальная оценка оптических параметров и качества изображения дерматоскопа DermLite 4 компании 3Gen. На основании полученных данных сформулирована концепция универсального устройства для дерматоскопии и видеокапилляроскопии, а также сформированы требования, которым должно удовлетворять разрабатываемое устройство. Произведён расчёт оптической системы регистрирующего канала прибора.

1. Концепция универсального устройства для дерматоскопии и видеокапилляроскопии

Определены требования, которым должно соответствовать проектируемое устройство:

- наличие визуального канала с видимым увеличением 8-12 крат и линейным полем предмета порядка 12-25 мм;
- наличие канала фото- и видеорегистрации с линейным увеличением 1,5-3 крат с линейным полем от 1 до 2,5 мм;
- линейный предел разрешения в плоскости предмета не хуже 5 мкм при проекции пикселя на участок кожи в диапазоне от 0,8 до 2,5 мкм;
- возможность записи видеофайлов с частотой от 50 до 250 Гц и глубиной цвета до 12 бит;
- использование светодиодной подсветки с переключением между белыми/зелеными/оранжевыми/УФ светодиодами;
- возможность работы в режиме иммерсии и кросс-поляризации для борьбы с бликами кожи;
- наличие съемных крышек с диаметром прижимного стекла порядка 20-30 мм для работы с иммерсией, введения поляризации и решения проблемы малой ГРИП;
- компактные размеры, небольшая масса и эргономичный дизайн, приближенный к внешнему виду современных зарубежных дерматоскопов.
- модульный принцип устройства, когда модуль видеорегистрации с внешним питанием может быть заменен модулем с аккумуляторами для автономной работы в режиме визуального дерматоскопа.

Согласно приведённым требованиям, может быть предложена схема устройства, представленная на рис. 1.

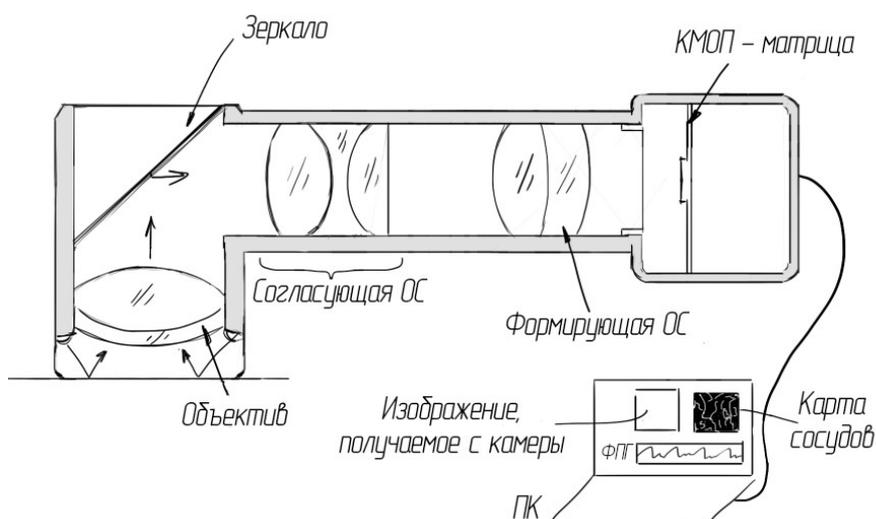


Рис. 1. Концепция устройства для дерматоскопии / видеокапилляроскопии.

2. Результаты моделирования регистрационного канала

МПФ и пятна рассеяния, соответствующие рассчитанной согласно [1, 2, 3] системе, в прямом ходе лучей, представлены на рис. 2.

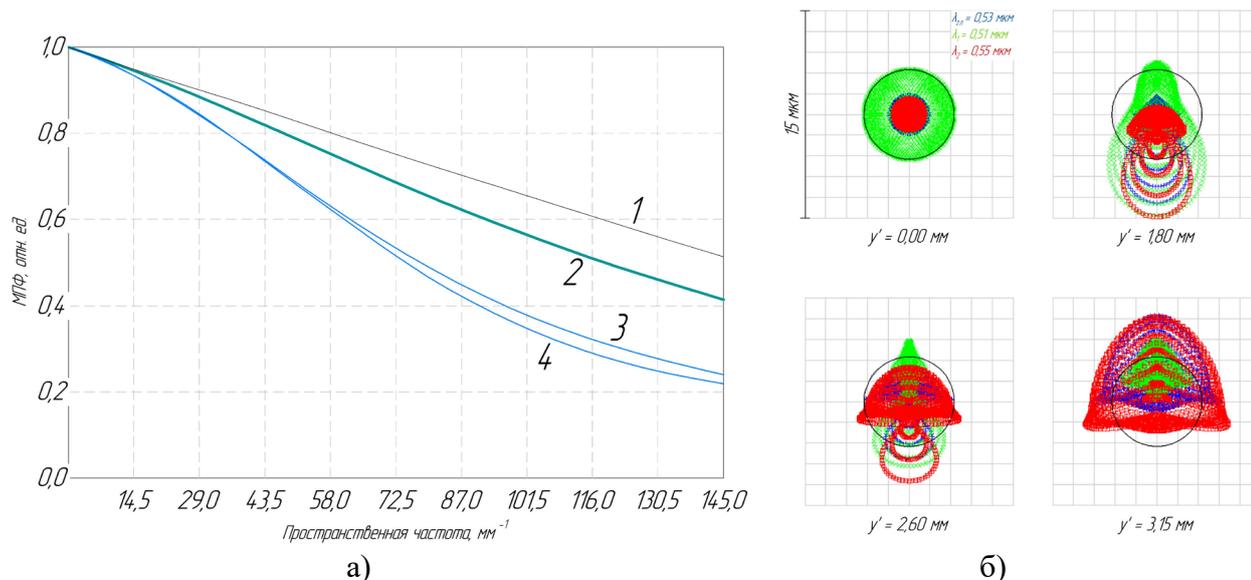


Рис. 2. Оценка качества изображения оптической системы регистрирующего канала: МПФ (а), диаграммы пятен рассеяния (б)

МПФ оценивалась на пространственной частоте, соответствующей частоте Найквиста приёмника излучения, равной 145 мм^{-1} . Кривая 1 на рис. 2 (а) соответствует дифракционно-ограниченной оптической системе, кривая 2 характеризует качество для центра поля, кривые 3 и 4 – для края поля при сагиттальной и меридиональной ориентации тест-объекта. Кривые для зоны поля близки к кривой 2 и на рисунке не показаны. Значения МПФ на критической частоте в любой точке изображения не ниже 0,2, что удовлетворяет критерию Фуко для разрешающей способности.

Размер дифракционного кружка на рис. 2 (б) показан в виде окружности, диаметр которой составляет 6,5 мкм. Среднеквадратичная величина размеров пятна рассеяния в любой точке изображения не превышает размеров дифракционного кружка.

Выводы

Основные результаты работы связаны с подтверждением возможности создания компактного отечественного устройства, объединяющего функции дерматоскопа и видеокапилляроскопа. Компактность устройства позволяет применить его для произвольного участка кожного покрова, что существенно расширяет диагностические возможности метода ВКС.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010).

Список литературы

1. Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. Теория оптических систем. Изд. 4-е, Санкт-Петербург: Лань, 2008 г.
2. Л. А. Запрыгаева, И. С. Свешникова. «Расчет и проектирование оптических систем». М.: Логос, 2000 г.
3. Крюков А.В, Поспехов В.Г., Ровенская Т.С., Сушков А.Л. Компьютерный синтез оптических систем: [учебное пособие] : [в 2 ч.] / Москва, 2010.

Prospects for creating a domestic compact device for videocapillaroscopy

Assistant professor, Ph.D. of Engineering Sciences, Krioukov A.V.^{1,2} (SPIN: 1515-2122)
Marchenko M.O.¹

¹Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow

st.m.mike@mail.ru

kryukov_av@bmstu.ru

Abstract: Methods of modern capillaroscopy are associated with studies of the pattern of human capillaries and the parameters of capillary blood flow. It helps to provide informative non-invasive diagnostics of the human body state and indicates certain diseases and reactions to ongoing processes. Further development of capillaroscopy techniques is connected with their combination with photoplethysmography - the registration of changes in the amplitude of fluctuations in blood volume that occur in capillaries and small vessels, depending on cardiocycle phase. This makes it necessary to design a compact and easy-to-use smart device that can be used in daily medical practice to conduct video capillaroscopy not only of the nail bed, but also of other arbitrary skin areas.

Keywords: videocapillaroscopy, photoplethysmography, dermatoscopy, bloodflow, neoplasms.

Информационно-измерительные системы неинвазивного биомониторинга

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Зайцева А.Ю.¹ (SPIN: 5748-1072)

Авдюшенко Сергей Александрович²

младший научный сотрудник, Мазинг М.С.¹ (SPIN: 3134-1019)

¹Институт Аналитического Приборостроения РАН, Санкт-Петербург

²Военно-медицинская академия им.С.М.Кирова, Санкт-Петербург

anna@da-24.ru

Аннотация: Информационно-измерительные системы биомониторинга - технологии, позволяющие неинвазивно и удаленно отслеживать физиологические параметры функционального состояния человека.

Разработанные аппаратно-программные комплексы основываются на сочетании современных сенсорных решений с технологиями интеллектуальной обработки многомерных данных. Реализация представляет собой систему с беспроводной связью, состоящую из носимых оптических сенсоров, собирающих данные о физиологических параметрах человека, таких как частота сердечных сокращений, оксигенация и др. Полученные данные обрабатываются методами машинного обучения и распознавания образов. Строится модель кластерного анализа с применением методов искусственных нейронных сетей и метода главных компонент. Полученные результаты и данные сохраняются в базе данных, которая доступна для анализа и использования в будущих исследованиях. Данный подход позволяет выявлять отклонения от нормы функционального состояния и диагностировать наличие патологии.

Ключевые слова: микроциркуляторное русло, диагностическая система, спектроскопия, окклюзионная проба.

Введение

Современная тенденция к широкому внедрению в клиническую практику инновационных методов неинвазивной медицинской диагностики позволяет ускорить процесс выявления различных заболеваний на ранних стадиях, что в свою очередь способствует повышению эффективности лечения, а, следовательно, и увеличению количества благоприятных исходов. В последнее десятилетие вопросы изучения микроциркуляторных процессов, а также вопросы профилактики и лечения различных нарушений микроциркуляторного русла составляют одну из актуальнейших проблем клинической практики медицины [1]. Микроциркуляторное русло – это дистальная часть системы кровообращения, состоящая из мельчайших сосудов (таких как венулы или капилляры), средний диаметр которых составляет менее 0,3 миллиметра. Важность проблемы изучения микроциркуляторных процессов объясняется тем, что микроциркуляция представляет собой сложную систему, регулирующую обменные процессы между кровью и тканями (транспортная функция), а также играющую большую роль в регуляции гемодинамики человеческого организма, поскольку она обеспечивает транспортное артериальное кровяное давление, а также венозный возврат крови к сердцу. При этом важно отметить, что микроциркуляторное русло представляет собой не механическую сумму различных сосудов, а целый анатомо-физиологический комплекс, который сложен для исследования. Кроме того, периферическая микроциркуляция играет важную роль как в регуляции гемодинамики человеческого организма, так и в трофическом обеспечении тканей и поддержании тканевого метаболизма [2].

Схема микроциркуляторного русла представлена на рис. 1.

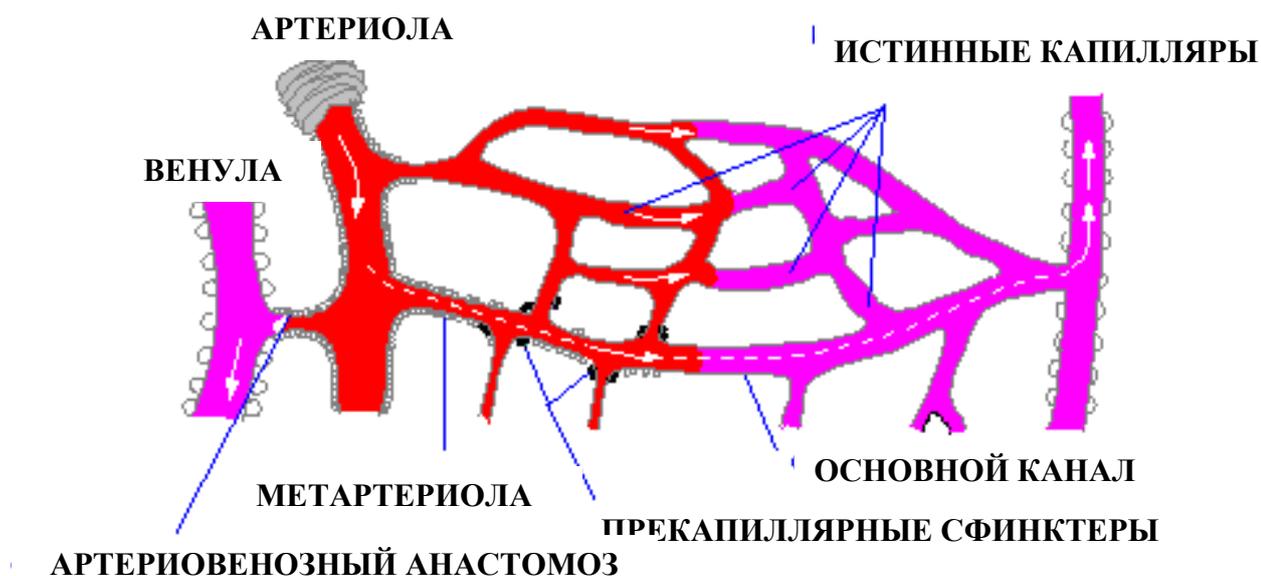


Рис. 1. Схема микроциркуляторного русла.

Приток крови к капиллярам обеспечивается артериолами, резистивными сосудами, окруженными гладкой мускулатурой сосудов. Поступление крови в капиллярное русло контролируется сокращением или расширением артериол и прекапиллярных сфинктеров. Кровь оттекает в капилляры и выносится в венозное кровообращение посткапиллярными венулами. В качестве альтернативы кровь может направляться непосредственно из артериол в венулы через метартериолы, минуя капиллярное русло. Эти механизмы контролируют гидродинамическое давление и объем кровотока через отдельные капиллярные русла для удовлетворения метаболических и дыхательных потребностей тканей [3].

На сегодняшний день накоплены данные по исследованию микроциркуляции при сахарном диабете, гипертонической болезни, венозной недостаточности и ряде других

заболеваний. Однако методические приемы диагностики нарушений тканевого кровотока во многом еще остаются несовершенными, что существенно затрудняет изучение микроциркуляции в клинических условиях. Для оценки параметров микроциркуляции в современной клинической практике применяют различные диагностические методы (метод лазерной доплеровской флоуметрии, метод транскутанной оксиметрии). Однако у перечисленных методов есть ряд существенных недостатков, которые ограничивают их применение в исследовании микроциркуляторно-тканевых систем в медицинской практике. В частности данное оборудование является стационарным и дорогим.

Перспективным методом диагностики, который продолжает набирать популярность, является технология оптической тканевой оксиметрии (ОТО). Несмотря на то, что метод имеет достаточно широкое распространение (в частности в церебральной оксиметрии, которая является одним из частных случаев технологии) использование метода именно для оценки оксигенации периферических тканей на данный момент по большей части только изучается и исследуется. В частности, метод оптической тканевой оксиметрии имеет хорошую воспроизводимость и помимо баланса доставки и потребления кислорода может отражать состояние кровотока в микроциркуляторном русле.

Принцип работы метода базируется на разных спектрах поглощения основных производных форм гемоглобина (оксигемоглобина и дезоксигемоглобина) только если в случае пульсоксиметрии регистрируется и анализируется свет прошедший через исследуемый участок тканей, с последующим определением степени поглощенного света на двух длинах волн, то в методе ОТО анализируется обратно рассеянное (отраженное) в тканях оптическое излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра. Таким образом, во основном во всех со временных тканевых оксиметрах, работающих на принципах ОТО, все измерения проводятся в конфигурации «на отражение», т.е. с одной поверхности биологической ткани (рис. 2)

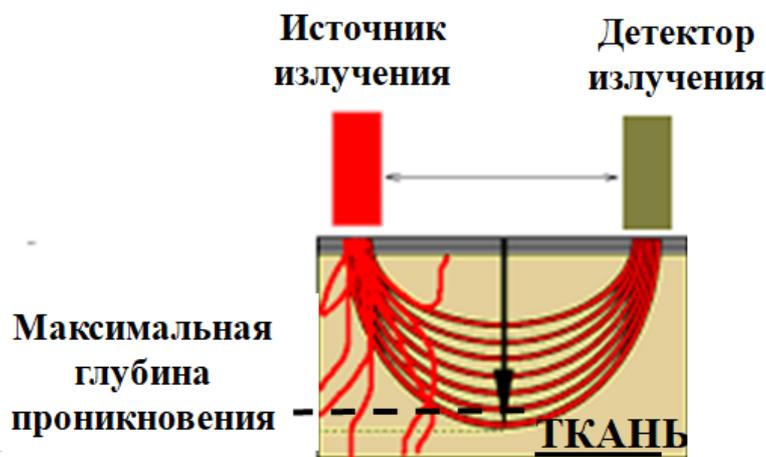


Рис. 2. Работа тканевого оксиметра в конфигурации «на отражение».

Конструктивно датчик современных коммерческих тканевых оксиметров обычно представляет собой светонепроницаемое основание, на котором размещены источники излучения и оптические детекторы. При освещении кожи излучением свет проникает в ткани во всех направлениях и поглощается, в частности, гемоглобином в крови и миоглобином в мышцах. Оптические датчики детектируют часть обратно рассеянного света. Разница в поглощении света с разной длиной волны используется для определения относительного уровня оксигенации измеряемой ткани, поскольку оксигенированный и деоксигенированный гемоглобин имеют разные спектры поглощения. Кроме того, наличие нескольких оптических детекторов в конструкции оптического оксиметра на

разном расстоянии от источника позволяет оценить сатурацию тканей на разной глубине, что является большим преимуществом методики. В отличие от пульсоксиметрии, технология ОТО предполагает независимость показаний (сатурации) от пульсаций артериальной крови. Это позволяет проводить измерения при низкой амплитуде пульсовой волны, её отсутствии или в случаях аритмий. Не привязываясь к пульсациям в сигнале, тканевый оксиметры измеряют сатурацию общего сосудистого (суммарно артериального и венозного) русла, являются средством оценки оксигенации периферических тканей. В зависимости от региона методика разделяется на церебральную, висцеральную и тканевую оксиметрию. В настоящее время чаще всего используется церебральная оксиметрия: во время операции при анестезии и при критических состояниях для анализа насыщения тканей головного мозга кислородом. Однако последние исследования показали, что тканевая оксиметрия может успешно использоваться и фактически уже используется при состояниях, которые сопровождаются выраженными нарушениями микроциркуляции и тканевой перфузии, что также в перспективе позволит диагностировать ухудшение кровообращения в верхних и нижних конечностях.

Важно отметить, что одним из динамично развивающихся в настоящее время направлений изучения особенностей регуляции микрососудистого русла является анализ состояния микроциркуляции системы до и после окклюзионного теста, а также анализ взаимосвязей между перфузией и параметрами, характеризующими процессы метаболизма в биоткани [4]. При этом при проведении окклюзионной пробы резервные возможности систем оцениваются по приросту показателя микроциркуляции крови, происходящему во время постокклюзионной гиперемии [5,6].

Целью настоящей работы являлась разработка аппаратно-программного комплекса, основанного на методе БИК – спектрометрии, для неинвазивной оценки нарушений микроциркуляции крови и кислородного статуса тканей человека при проведении функциональной пробы с локальной ишемией.

1. Материалы и методы

Разработана и исследована диагностическая система оценки микроциркуляции, состоящая из двух модулей: оптико-электронного и вычислительно-информационного.

В качестве базового принципа работы разрабатываемой системы был выбран неинвазивный метод оптической тканевой оксиметрии (ОТО), который производит регистрацию обратно-рассеянного света в тканях в конфигурации «на отражение», при которой источник излучения и детектор располагаются на одной стороне относительно исследуемой биологической ткани.

Оптико-электронный модуль представлен восемнадцатиканальным интегральным оптическим анализатором спектров видимого и ИК-диапазонов. Анализатор спектров состоит из трех микросхем (чипов), расположенных на общей отладочной плате со встроенным микроконтроллером с низким энергопотреблением. Набор из трех микросхем обеспечивает 18 измерительных каналов датчика (в каждой микросхеме по 6 каналов), работающих в диапазоне от 410 до 940 нм. В качестве внешних источников излучения были выбраны три светодиода белого, красного и ИК излучения, которые были встроены в микросхему оптического анализатора. Вычислительно-информационный модуль осуществляет общее управление системой, отображение полученных измерений, а также обработку полученного массива данных.

Была разработана и изготовлена конструкция корпуса прибора, ограничивающая поступление дневного света к датчикам при проведении измерений. Также обеспечено соединение устройства с ПК посредством беспроводной системы связи, что значительно облегчает проводимые измерения.

На рис. 3 изображен внешний вид оптического анализатора спектров со встроенными светодиодами (белый, красный и светодиод ближнего ИК-диапазона).



Рис. 3. Внешний вид оптической системы оценки состояния микроциркуляторного русла.

Управление датчиками анализатора спектров заключается в передаче интерфейсом в текстовом виде команд управления, а также в исследовании отклика на них. В ответ на команду датчик присылает строку с восемнадцатью целочисленными значениями. Результат измерения воспроизводится на компьютере в пользовательском окне ПО анализатора спектров. Показания анализатора спектров представляют собой комбинацию численных значений 18 датчиков в условных единицах для каждого измерения.

Основное назначение окклюзионной пробы, как функциональной нагрузки, заключается в провокации сосудистых реакций путем создания кратковременной блокировки венозного и/или артериального кровотока конечности манжетой тонометра, а также развитием реактивной гиперемии после снятия окклюзии (реперфузия). Для создания артериовенозной окклюзии применяют давление манжеты на конечность на 30-50 мм.рт.ст. выше систолического. Для создания венозной окклюзии подбирается давление выше венозного на 40-50 мм.рт.ст. Схематическое изображение методики инструментальной оценки нарушений регуляции периферического кровообращения приведено на рис. 4.

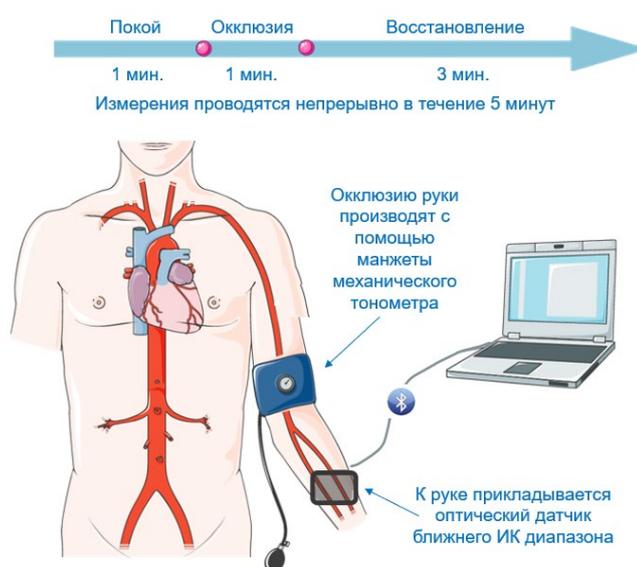


Рис. 4. Схематическое изображение методики инструментальной оценки нарушений регуляции периферического кровообращения.

Растущий интерес к изучению реакции на окклюзионную пробу обусловлен большими перспективами применения данного теста в качестве процедуры для обнаружения

нарушений микроциркуляции, которые являются предвестником развития различных патологий [7, 8].

2. Экспериментальные исследования

Для инструментальной оценки системы микроциркуляции было проведено экспериментальное исследование на базе Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова. Исследования проводились с участием двадцати испытуемых мужского пола в возрасте 20 лет. Каждый испытуемый прошел полный медицинский осмотр, согласно которому он не имел серьезных медицинских отклонений на момент проведения исследования.

Каждому испытуемому была предложена функциональная нагрузка, представляющая собой окклюзионную пробу. Также были исследованы гемодинамические явления в трех переходных процессах: покой - ишемия, ишемия - гиперемия, гиперемия - покой.



Рис. 5. Процесс экспериментального исследования в момент проведения окклюзионной пробы.

Во время экспериментального исследования каждый испытуемый находился в положении сидя. Оптическая система была расположена на предплечье левой руки. Время от момента ограничения кровотока манжетой до его прекращения фиксировалось секундомером. Измерения проводились с интервалом 10 секунд. Было произведено шесть измерений оптической системой до функциональной нагрузки в состоянии покоя в положении сидя. Далее следовала окклюзия в течение одной минуты [9]. Длительность восстановления составляла 3 минуты.

3. Полученные результаты и их обсуждение

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием программного комплекса анализа данных с целью визуального представления информации о каждом испытуемом в графическом виде. Для каждого испытуемого построены диаграммы, которые представляют собой набор численных значений отклика сенсоров по длинам волн в условных единицах. Так, например, на длине волны 535 нм значения интенсивности сигнала в момент окклюзии падает до 24 условных единиц с последующим восстановлением свыше значения покоя, что показано на рис. 6. На длине волны 810 нм значения интенсивности сигнала в момент окклюзии падает до 11 условных единиц с последующим восстановлением до значения покоя (рис. 7). На длине волны 560 нм значения интенсивности сигнала в момент окклюзии падает до 32 условных единиц с последующим восстановлением ниже значения покоя.

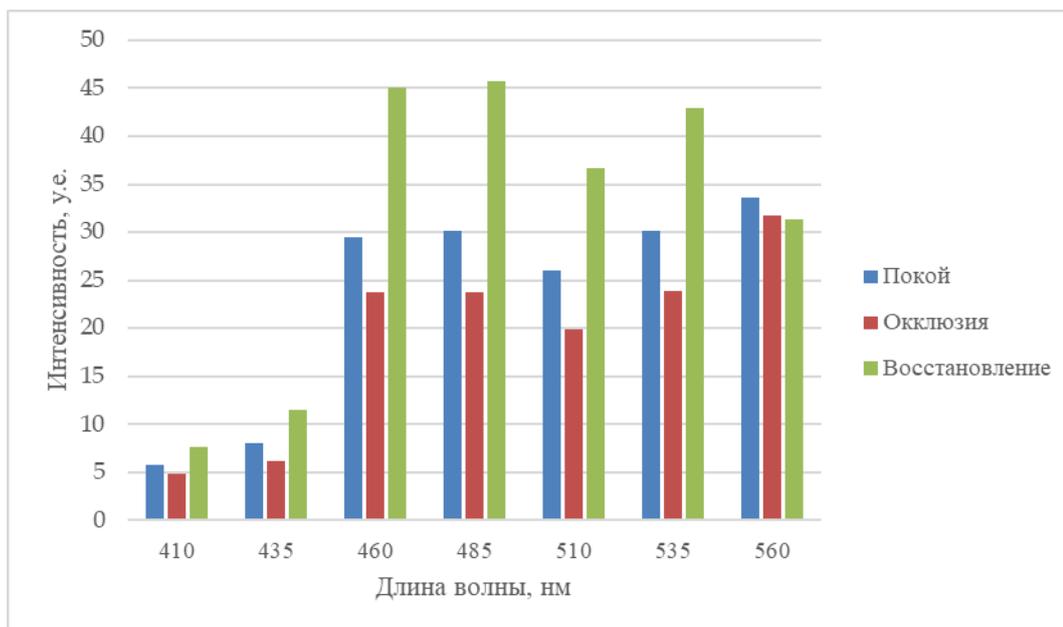


Рис. 6. Спектр биологических тканей типичного испытуемого, длины волн 410–560 нм.

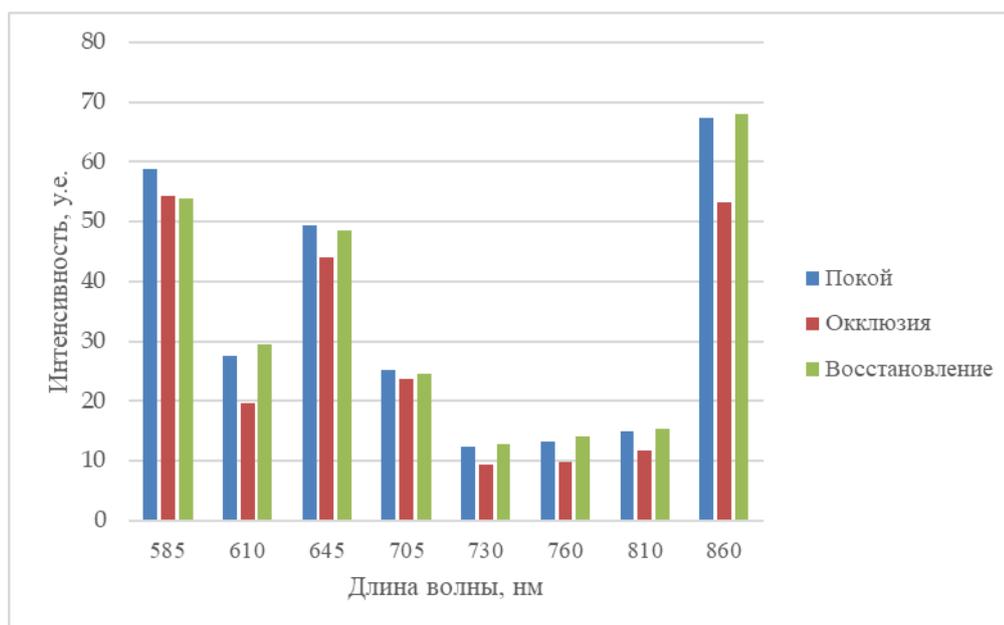


Рис. 7. Спектр биологических тканей типичного испытуемого, длины волн 585–860 нм.

Таким образом, показана возможность отслеживания динамики изменения статуса биологических тканей оптическими методами в видимом и ИК-диапазоне длин волн.

Еще один метод исследования и визуализации полученных результатов – временной анализ интенсивности обратно рассеянного излучения биологических тканей в состоянии покоя, окклюзии и в процессе восстановления.

Для наглядного представления результатов анализа были выбраны длины волн ближнего ИК-диапазона 730, 760 и 810 нм, как наиболее ярко характеризующие динамику изменения процессов обратного рассеяния в биологических тканях. Временная зависимость интенсивности обратно рассеянного излучения биологических тканей для типичного испытуемого представлена на рис. 8.

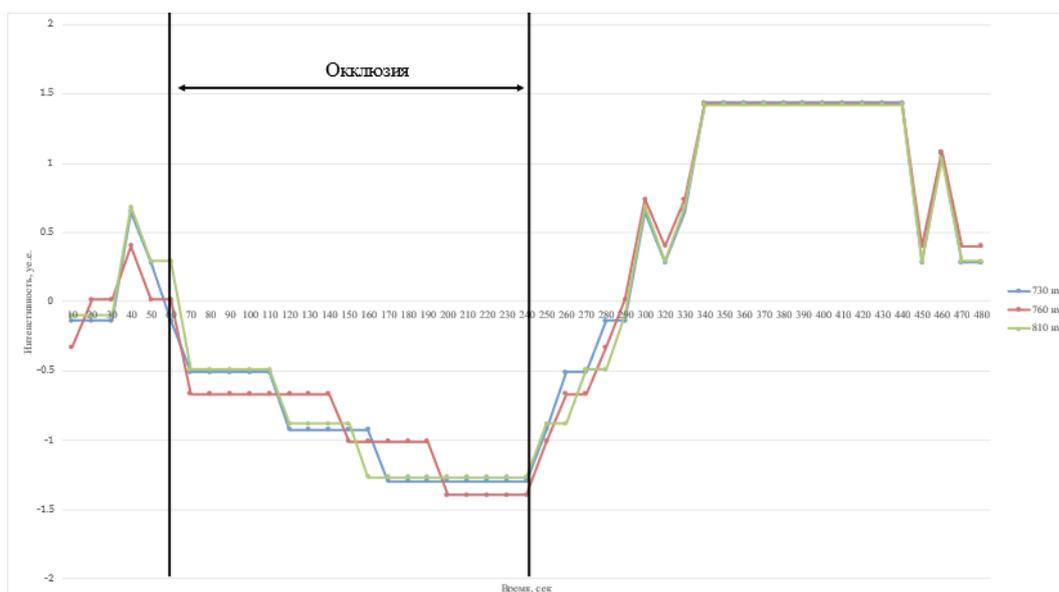


Рис. 8. Временная зависимость интенсивности обратно рассеянного излучения биологических тканей для типичного испытуемого.

Показано, что значения интенсивностей на выбранных длинах волн существенно снижаются во время окклюзии и восстанавливаются до значений значительно выше покоя. При этом степень выраженности искусственной ишемии конечности, которую можно наблюдать по постепенному снижению значений показателей датчиков разработанной оптической системы во время действия окклюзии, у всех испытуемых являлась схожей. Восстановление же кровотока в артериях конечностей у испытуемых происходило с разной динамикой, что говорит о том, что реакция микроциркуляторного русла на окклюзионный тест у испытуемых не является одинаковой. Также важным показателем является резерв кровотока, который можно определить по разнице показаний датчика до и после окклюзии. Резерв кровотока — это изменение объемного кровенаполнения от минимальных значений во время окклюзии до максимальных во время постокклюзионной гиперемии. На графиках данный параметр можно определить по разнице показателей оптических датчиков системы во время и после манжеточной пробы. Так, например, может выявляться как большой, так и сниженный резерв капиллярного кровотока. Повышенное значение (выше нормы) этого параметра может свидетельствовать о нарушении кровообращения и, в частности, говорить о наличии патологического сужения просвета в сосудах из-за неполноценного сокращения их стенок. Пониженный показатель (ниже нормы) резерва кровотока может наблюдаться при застойных явлениях в сосудах. Помимо этого, адаптационный резерв капиллярного кровотока характеризует тип микроциркуляторного русла, поэтому данный параметр может быть использован не только для оценки состояния системы микроциркуляции крови, но и в качестве критерия, позволяющего достоверно выявлять индивидуально-типологические особенности микроциркуляции и микрогемодинамики человека с последующей оценкой проявления развития патологических процессов.

Полученные результаты представляют варианты компенсаторно-адаптационных реакций организма на функциональную нагрузку. Адекватность ответа на нагрузку коррелирует с независимыми медико-биологическими исследованиями, отражающими реальные компенсаторно-адаптационные реакции испытуемых. Анализируя результаты исследований, можно говорить об эффективности разработанного метода оценки состояния микроциркуляции с целью оценки компенсаторно-восстановительных реакций, функционального состояния и работоспособности человека.

Выводы

Полученные результаты исследования отражают актуальность методического подхода к решению проблем неинвазивной оценки нарушений микроциркуляции крови и позволяют рекомендовать разработанную неинвазивную оптическую сенсорную систему в качестве аппаратно-программного комплекса поддержки принятия врачебных решений, а также как автоматизированную систему экспресс-диагностики кислородного обеспечения тканей человека.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00761-22-00.

Список литературы

1. Поленов С. А. Основы микроциркуляции //Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2008. – Т. 7. – №. 1. – С. 5-19.
2. Бесчастнов В. В. и др. Современные методы оценки кислородного статуса и состояния микроциркуляции биотканей: оптическая диффузионная спектроскопия (обзор) //Современные технологии в медицине. – 2018. – Т. 10. – №. 4. – С. 183-195.
3. Скворцов Ю. И., Королькова А. С. Гомоцистеин как фактор риска развития ИБС (обзор) //Саратовский научно-медицинский журнал. 2011. Т. 7, №. 3. С. 619-624.
4. Vamashmoos S.A., Al-Nuzaily M.A., Al-Meerri A.M., Ali F.H. Relationship between total homocysteine, total cholesterol and creatinine levels in overt hypothyroid patients //Springerplus. 2013. Vol. 2. P.423. doi: 10.1186/2193-1801- 2-423.
5. Katrinchak C., Fritz K. Clinical implications of C-reactive protein as a predictor of vascular risk //J. Am. Acad. Nurse Pract. 2007. Vol. 19. №7. P. 335–40. DOI: 10.1111/j.1745-7599.2007.00234.x
6. Петрищев Н.Н., Васина Л.В., Сапегин А.А. и др. Диагностическая значимость определения содержания факторов повреждения эндотелия для оценки выраженности эндотелиальной дисфункции при остром коронарном синдроме //Клиническая больница. 2015. Т. 1. №11. С. 41-45.
7. Васина Л. В., Петрищев Н. Н., Власов Т. Д. Эндотелиальная дисфункция и ее основные маркеры //Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2017. Т. 16. №. 1. С. 4-15.
8. Шабров А. В. и др. Современные методы оценки эндотелиальной дисфункции и возможности их применения в практической медицине //Рациональная фармакотерапия в кардиологии. 2016. Т. 12, №. 6. С. 733-742.
9. Перминов А. С., Юран С. И. Проектирование оптоэлектронных датчиков с устранением влияния артефактов //Вестник ИжГТУ им. МТ Калашникова. 2010. №. 3. С. 102-105.
10. Thijssen DH, Black MA, Pyke KE, Padilla J, Atkinson G, Harris RA et al. Assessment of flow-mediated dilation in humans: a methodological and physiological guideline. American, Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 2011, vol. 300, no.1, DOI:10.1152/ajpheart.00471.2010.
11. Abdul-Ghani S, Fleishman AN, Khaliulin I, Meloni M, Angelini G D, Suleiman MS. Remote ischemic preconditioning triggers changes in autonomic nervous system activity: implications for cardioprotection, Physiological Reports, 2017, vol. 5, no.3, DOI: 10.14814/phy2.13085.
12. Tee GBY., Rasool AHG., Halim AS., Rahman ARA. Dependence of human forearm skin postocclusive reactive hyperemia on occlusion time. Journal of pharmacological and toxicological methods, 2004, vol. 50, no. 1, pp. 73-78, DOI: 10.1016/j.vascn.2004.02.002/

Высокоэффективное проточное концентрирование нуклеиновых кислот

заведующий сектором, к.т.н., Петров Д.Г.¹ (SPIN: 2975-8180)
старший научный сотрудник, к.х.н. Дженлода Р.Х.² (SPIN: 2512-5114)
младший научный сотрудник Антифеев И.Е.¹ (SPIN: 8886-4498)
ведущий научный сотрудник, Макарова Е.Д.¹. (SPIN: 5506-9178)
главный научный сотрудник Курочкин В.Е.¹ (SPIN: 1868-9326)

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институту аналитического приборостроения Российской Академии наук (ИАП РАН), г. Санкт-Петербург

²Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии наук (ГЕОХИ РАН), г. Москва
dimoon88@mail.ru

Аннотация: При решении задач по обнаружению и идентификации возбудителей инфекционных заболеваний в пробах окружающей среды часто возникают ложноотрицательные ответы, что обусловлено низкой концентрацией и степенью очистки ДНК / РНК в пробе [1]. Способом решения такой задачи может являться создание системы выделяющей и концентрирующей ДНК/РНК из пробы большего объема чем при обычном лабораторном исследовании, где объем пробы не превышает 1- 2 мл.

Предложенная система проточного концентрирования позволяет выделять и концентрировать нуклеиновые кислоты из проб более 10 мл. Показано, что такой подход позволяет достичь степени очистки ДНК, для последующего анализа методом полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ).

При подборе режимов удерживания сорбента в потоке и скорости пропускания пробы через него возможно добиться двадцатикратного повышения степени концентрирования ДНК в сравнении с обработкой аналогичной пробы в стационарном режиме.

Ключевые слова: Нуклеиновые кислоты, проточные методы концентрирования, высокоэффективное выделение ДНК

Введение

В работе предложен способ высокоэффективной (эффективность более 80%) очистки и концентрирования нуклеиновых кислот. Способ реализуется на базе ультразвуковой суспензионной колонки (1,2), которая позволяет удерживать частицы магнитного сорбента на котором и происходит концентрирование целевой молекулы ДНК – рекомбинантной плазмиды 6610. Концентрирование таким способом при подборе скорости пропускания пробы через сорбент позволяет до двадцати раз увеличить концентрацию нуклеиновых кислот в очищенной пробе. Такой способ может быть использован для анализа проб где содержание целевой молекулы нуклеиновых кислот не позволяет их идентифицировать при заборе и анализе единичной пробы.

Подбор условий и апробация проточного концентрирования ДНК

Принимая во внимание результаты экспериментальных исследований по эффективности выделения НК по воздействию УЗ с частотой 2,65 МГц, различной интенсивности, а также способности УЗ удерживать частицы микрометрового размера [3,4], была сформулирована задача по исследованию режимов позволяющих выделять НК в потоке под воздействием УЗ. Для этого на первом этапе был модифицирован УЗ модуль, представлены на рисунке 1, была изготовлена стеклянная камера с объемом проточной зоны 1,5 мл, прокачка пробы и реагентов осуществлялась с помощью перистальтического насоса, также перистальтический насос осуществлял прокачку дистиллированной воды

для обеспечения контакта пьезоизлучателя (генератора УЗ) и охлаждения. На рис. 1 представлена функциональная схема установки с закреплённой проточной камерой.

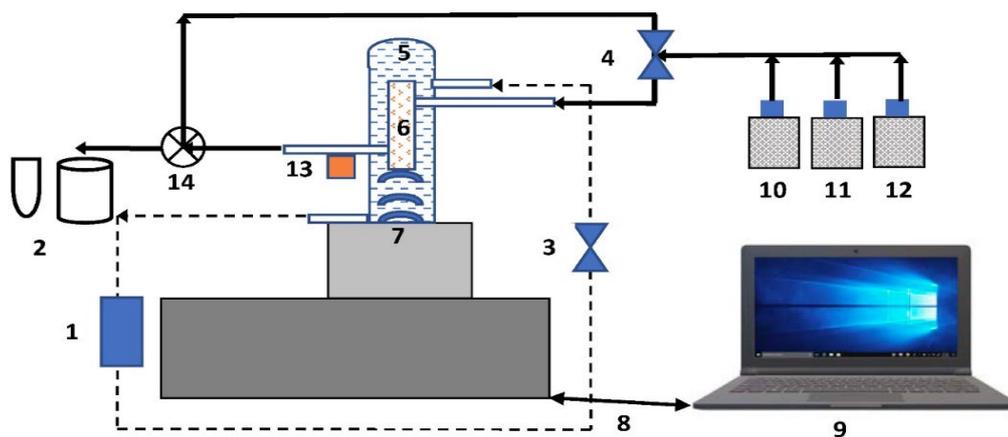


Рис. 1. Функциональная схема установки для проточного концентрирования НК, где 1 – емкость с дистиллированной водой, 2 – емкости для слива или очищенной НК, 3,4 – перистальтические насосы, 5 – внешний охлаждающий объем, 6 – реакционная камера, 7 – излучатель УЗ, 8 – канал связи, 9 – ПЭВМ, 10 – проба; 11 – промывной реагент, 13 – элюирующий реагент, 13 – постоянный магнит, 15 – кран переключатель

Созданная установка позволяет удерживать магнитный сорбент (магнитные частицы) в жидкости, размером 10 -100 мкм, на интенсивности 2,2 Вт/см², удалось добиться удержания количества суспензии магнитного сорбента как для ручной реализации выделения НК, то есть 50 мкл суспензии. Подбор условий удержания осуществляли закачиванием частиц в камеру, и последующим изменением интенсивности от 1,2 - 3,0 Вт/см² с шагом в 0,2 Вт/см². На интенсивностях менее 1,8 Вт/см² сорбент удерживался до скорости потока 1 мл/мин, далее вымывался. На интенсивности 2,0-2,2 Вт/см², удалось удерживать магнитные частицы на скорости потока до 5,0 мл/мин. Полученные результаты можно обобщить - параметры УЗ воздействия необходимые для удержания магнитного сорбента 10-100 мкм в потоке жидкости: скорость прокачивания через камеру с сорбентом – до 5 мл/мин, интенсивность УЗ с частотой 2,65МГц – 2,0-2,2 Вт/см² потока жидкости.

Таким образом были определены режимы удержания магнитного сорбента в потоке под воздействием УЗ, для реализации проточного выделения НК.

Выделение НК в потоке

Серия экспериментов включала выделение из нескольких видов проб, где в качестве растворителя плазмиды помимо воды, как в модельной пробе также использовались вытяжки из стандартов почв и жидкое удобрение «Идеал».

В экспериментах использовались:

- модельная (водный раствор) проба (МП);
- жидкое удобрение «Идеал» (ИЛ);
- стандарт дерново-подзолистой почвы (ДПП);
- стандарт песчаной почвы (ПП);
- стандарт чернозёмной почвы (ЧЗП).

Выделение из проб объёмом 10 мл

В табл. 1 и 2 представлены результаты выделения НК в потоке с различными скоростями прокачивания (расхода), а также показана зависимость от количества прокачиваний пробы НК объёмом 10 мл.

Таблица 1. Выход НК из пробы 10 мл при трёхкратном прокачивании.

Особенности состава пробы	Выделение на картридже	Скорость потока, мл/мин				
		0,1 мл/мин	0,5 мл/мин	1,0 мл/мин	2,0 мл/мин	3,0 мл/мин
		Выход НК, %				
МП	3,5	91	92	83	61	41
ДПП	2	67	74	51	52	23
ПП	1	71	68	56	38	21
ЧЗП	2,2	67	59	52	23	16

Таблица 2. Выход НК из пробы 10 мл при пятикратном прокачивании

Особенности состава пробы	Выделение на картридже	Скорость потока, мл/мин				
		0,1 мл/мин	0,5 мл/мин	1,0 мл/мин	2,0 мл/мин	3,0 мл/мин
		Выход НК, %				
МП	3,5	95	85	82	70	51
ДПП	2	74	76	71	62	20
ПП	1	77	78	68	49	31
ЧЗП	2,2	67	62	66	53	37

Выводы

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что при 3 кратном прокачивании пробы достигается результат эффективности выделения НК практически совпадающий с результатами выделения при пятикратном прокачиваний модельной пробы через проточную камеру (результат в пределах погрешности), для проб содержащих вытяжки стандартов почв результат при пятикратном пропускании превосходит 3 кратное пропускание.

Полученные результаты позволяют судить о возможности повышения эффективности выделения НК под воздействием УЗ с помощью проточного способа реализации, при сопоставлении результатов выделения НК из модельных проб объёмом 10 мл удаётся более чем в 22 раза повысить степень концентрирования НК в элюате.

Список литературы

1. Д. Г. Петров, Е. Д. Макарова, Н. Н. Гермаш, И. Е. Антифеев Методы выделения и очистки ДНК из лизатов клеток / Научное приборостроение. – 2019. – Т.29. – № 4. – С. 28-50.
2. Д. Г. Петров, Е. Д. Макарова, И. Е. Антифеев, А. В. Бродская, Н. Н. Константинова, С.Н. Малышин. Воздействие полей разной природы на выход ДНК из модельных растворов на двуокиси кремния. Влияние ультразвука / Научное приборостроение. – 2017. – Т. 28. – № 4. – С. 40-55.
3. Р. Х. Дженлода, В. М. Шкинев, Д. Г. Петров, Б. Я. Спиваков Ультразвуковая суспензионная колонка для анализа *Mycobacterium tuberculosis* с использованием наноструктурированного магнитного сорбента / XIII Международная научная конференция «Актуальные вопросы биологической физики и химии». – Севастополь. – Т.1. – С.43-45.
4. Р. Х. Дженлода, Н. Н. Князьков, Е. Д. Макарова. Теоретическое описание удерживания частиц в ультразвуковой суспензионной колонке Научное приборостроение. – 2013. – Т. 23. – № 3. – С. 44-55.
5. R. Kh. Dzhenloda, D. G. Petrov, V. M. Shkinev, B. Ya Spivakov. DNA recovery from environmental samples on suspension columns under a combined action of ultrasound and magnetic fields followed by PCR detection / Mendelev Communications. – 2017. – №27. – P. 302-303.

Концепция реализации цифровой производственной среды на основе модели контекстной осведомленности

аспирант, Ванройе Н.К. (SPIN: 4490-4144)
доцент, канд. техн. наук, Власов А.И. (SPIN: 4901-3509)

МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия
nvanroje@mail.ru, vlasovai@bmstu.ru

Аннотация: В работе предложена концепция построения системы управления производством на основе модели контекстной осведомленности. Кратко проанализированы основные положения данной модели. даны рекомендации по разворачиванию системы управления производством в условиях "Бережливого производства".

Ключевые слова: модели контекстной осведомленности, бережливое производство, управление производством, Manufacturing Execution System, MES.

Введение

В условиях цифровой трансформации промышленности на первое место выходят задачи оперативного реагирования на глобальные и локальные изменения рынка с целью обеспечения конкурентоспособности и повышения производительности предприятий приборостроения [1]. Цифровизация производства реализует необходимый инструментальный оперативного управления в виде цифровой системы управления производством (Manufacturing Execution System (MES)). MES является инструментом, обеспечивающим интеграцию процессов управления производством в режиме реального времени, что позволяет оперативно отслеживать динамику производственных циклов и в кратчайшее время реагировать и принимать управленческие решения [2].

Принципы модели контекстной осведомленности

В эпоху цифровой трансформации "умные" заводы могут автоматизировать производственные операции за счет контекстной осведомленности. Реализация технологий "Бережливого производства" позволяет реализовать внедрение MES системы на основе оценки производства с учетом обнаруженных точек потерь и обеспечения эффективных рабочих мест [3, 4].

Модель контекстной осведомленности представляет собой способ настройки поведения системы и компонентов в зависимости от контекста выполнения работы. При этом под "контекстом" понимается любая информация, которая может быть использована в качестве характеристики ситуации и физического объекта, к которому она относится.

Современные производства генерируют огромное количество данных, что определяет такие проблемы, как:

- необходимость максимально эффективного использования постоянно увеличивающегося объема производственных данных для поиска смысла, зависимостей, связей и проблем в производстве [5],

- иметь инструментальный для поддержки извлечения, хранения и анализа данных с целью получения наилучших управленческих решения [6, 7].

Модель контекстной осведомленности позволяет агрегировать производственные данные. Ставя цели системного разворачивания MES-решения приборостроительного предприятия необходимо реализовывать надлежащие функции MES-системы с учетом добавленной стоимости в производственной цепочке. Применение модели контекстной осведомленности позволяет строить информационные системы по принципам семантической однородности и обеспечивать основное требование современных информационных систем по однократности ввода общесистемных данных.

Выводы

В общем случае функционал MES и его интеграция с аналитическими инструментами (такими как системы прогнозирования, Big Data и т.д.) обеспечивают повышение общей эффективности производственных процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проекта «ПРИОР/СН/НУ/22/СП2/5» в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список литературы

1. Шахнов В.А., Курносенко А.Е. Моделирование цифрового производства электронной аппаратуры в рамках концепции "Индустрия 4.0" // Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии. Материалы I Международной научно-практической конференции. 2019. С. 585-594.
2. Власов А.И., Михненко А.Е. Информационно-управляющие системы для производителей электроники // Производство электроники. 2006. № 3. С. 15-21.
3. Власов А.И., Ганев Ю.М., Карпунин А.А. Система 5S-технология создания эффективного рабочего места в концепции "Бережливого производства" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1 (161). С. 65-68.
4. Власов А.И., Ганев Ю.М., Карпунин А.А. Системный анализ "Бережливого производства" инструментами визуального моделирования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 4 (160). С. 19-24.
5. Гриднев В.Н., Емельянов Е.И., Власов А.И., Карпунин А.А. Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур в среде Altium Designer: управление проектом // Датчики и системы. 2016. № 6 (204). С. 46-52.
6. Berdyugina O.N., Krivoshein A.I., Vlasov A.I. Technological platform for innovative social infrastructure development on basis of smart machines and principles of internet of things // Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC 2018). 2018. N. 8570062.
7. Prudius A.A., Karpunin A.A., Vlasov A.I. Analysis of machine learning methods to improve efficiency of big data processing in industry 4.0 // Journal of Physics: Conference Series. 2019. N. 032065.

The concept of implementing a digital production environment based on a contextual awareness model

postgraduate student, Vanroe N. K. (SPIN: 4490-4144)
Associate Professor, Ph.D., Vlasov A.I. (SPIN: 4901-3509)

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
nvanroje@mail.ru, vlasovai@bmstu.ru

Abstract: The paper proposes the concept of building a production management system based on a contextual awareness model. The main provisions of this model were briefly analyzed. Recommendations are given for the deployment of the Production Management System in Lean Manufacturing.

Keywords: contextual awareness models, lean manufacturing, manufacturing management, Manufacturing Execution System, MES

Классификация гиперспектральных данных методами машинного обучения

аспирант, Труфанов Н.Н.¹ (SPIN 3166-9867),
старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. Чуриков Д.В.¹ (SPIN: 2236-5778)
научный сотрудник, Кравченко О.В.²

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения, Москва

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление», Москва
tru17v@gmail.com

В работе решается задача классификации гиперспектральных данных различными методами машинного обучения. В качестве обучающей выборки взяты наборы данных «Indian pines» и «Pavia University» из открытых источников. В работе рассматриваются методы снижения размерности данных для предварительной обработки, а также исследуется влияние размерности входных данных на точность классификации разработанных моделей.

Ключевые слова: машинное обучение, гиперспектральные данные, классификация.

1. Indian pines

Набор данных «Indian pines» представляет собой гиперкуб, представляющий собой 200-канальное изображение размерами 145x145 пикселей. К каждому столбцу пикселей ставится в соответствие метка одного из 16 классов, которые в совокупности образуют слой истинных значений (ground truth). Срез гиперкуба и карта меток показаны на рис. 1.

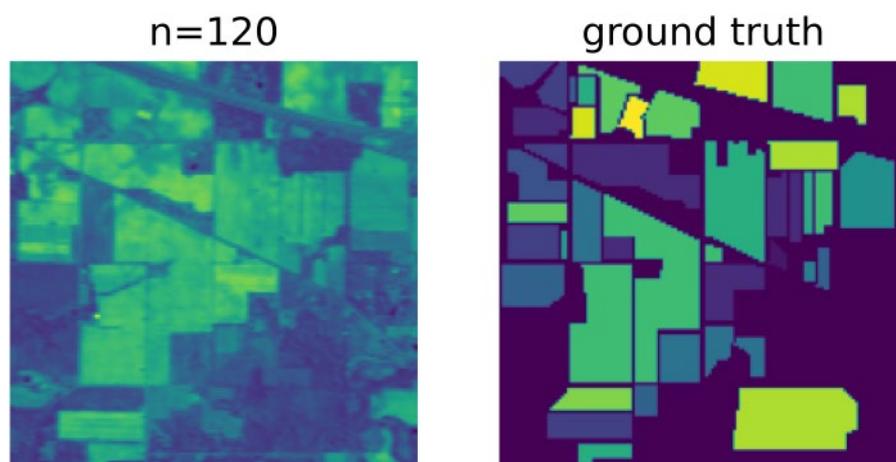


Рис. 1. Срез гиперкуба «Indian pines» по каналу №120 (слева) и карта меток (справа).

С точки зрения классификации данных гиперкуб содержит избыточное количество информации, которая существенно затрудняет обучение моделей, требуя больших вычислительных затрат. В связи с этим в работе рассматривается метод снижения главных компонент (РСА) для снижения размерностей. Для выбора необходимого числа компонент анализируем кумулятивную сумму вклада собственных чисел матрицы ковариации (рисунок 2), после чего для дальнейшего рассмотрения оставляем лишь те компоненты, собственные числа которых в сумме составляют 0.95 и 0.997 от суммы всех собственных чисел.

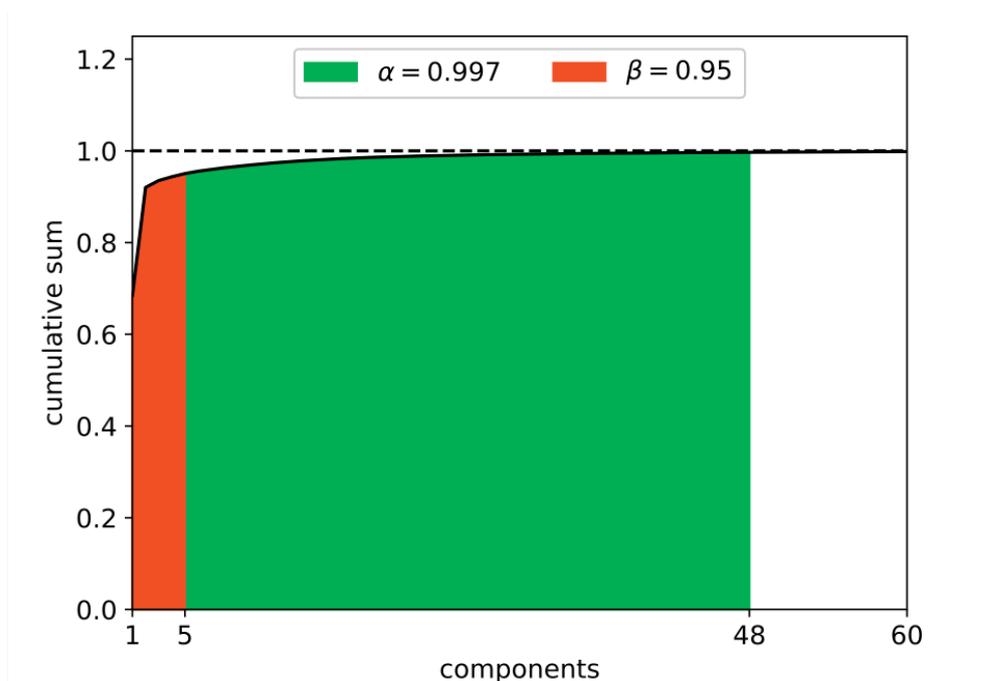


Рис. 2. Кумулятивная сумма при применении метода главных компонент для набора данных «Indian pines».

Таким образом, на уровне $\alpha = 0.997$ мы снижаем размерность с 200 до 48 каналов, а на уровне $\beta = 0.95$ размерность сокращается до 5 каналов. Полученные слои для случая $\beta = 0.95$ показаны на рисунке 3.

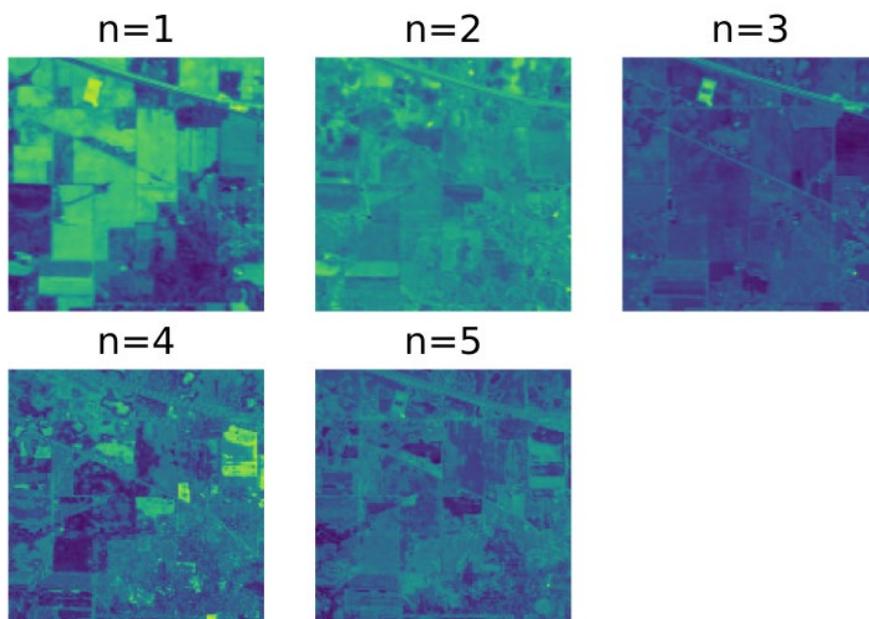


Рис. 3. Гиперкуб «Indian pines» при снижении размерности до 5 слоёв.

2. Pavia university

Набор данных «Pavia university» представляет собой 103-канальное изображение размером 610x340 пикселей. Срез на канале №20 и карта меток показаны на рисунке 4.

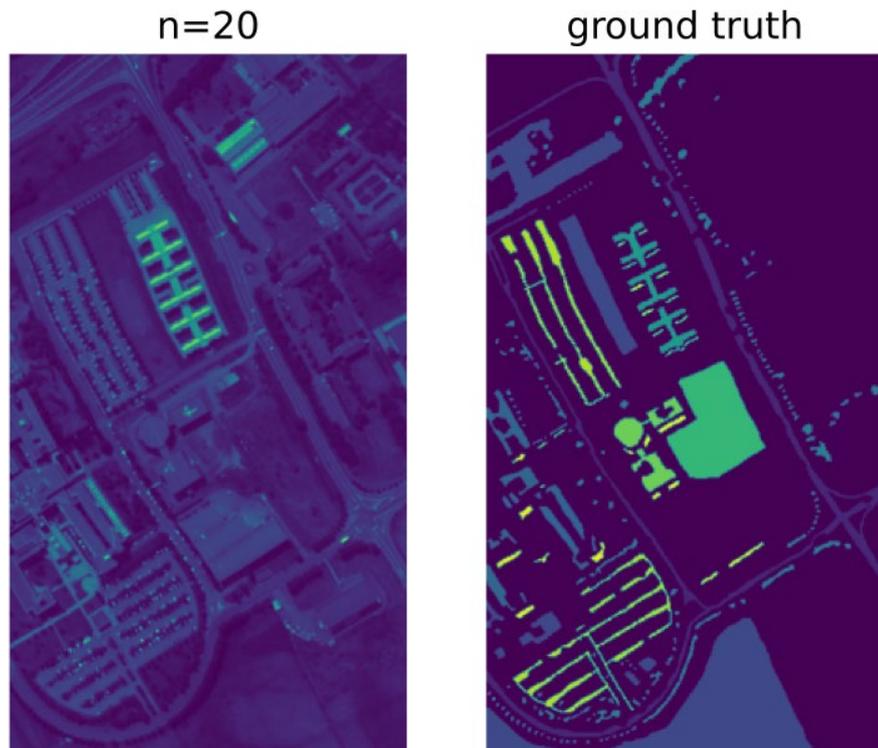


Рис. 4. Срез гиперкуба «Pavia university» по каналу №20 (слева) и карта меток (справа).

Необходимое число компонент определим аналогичным образом с помощью метода главных компонент (рисунок 5).

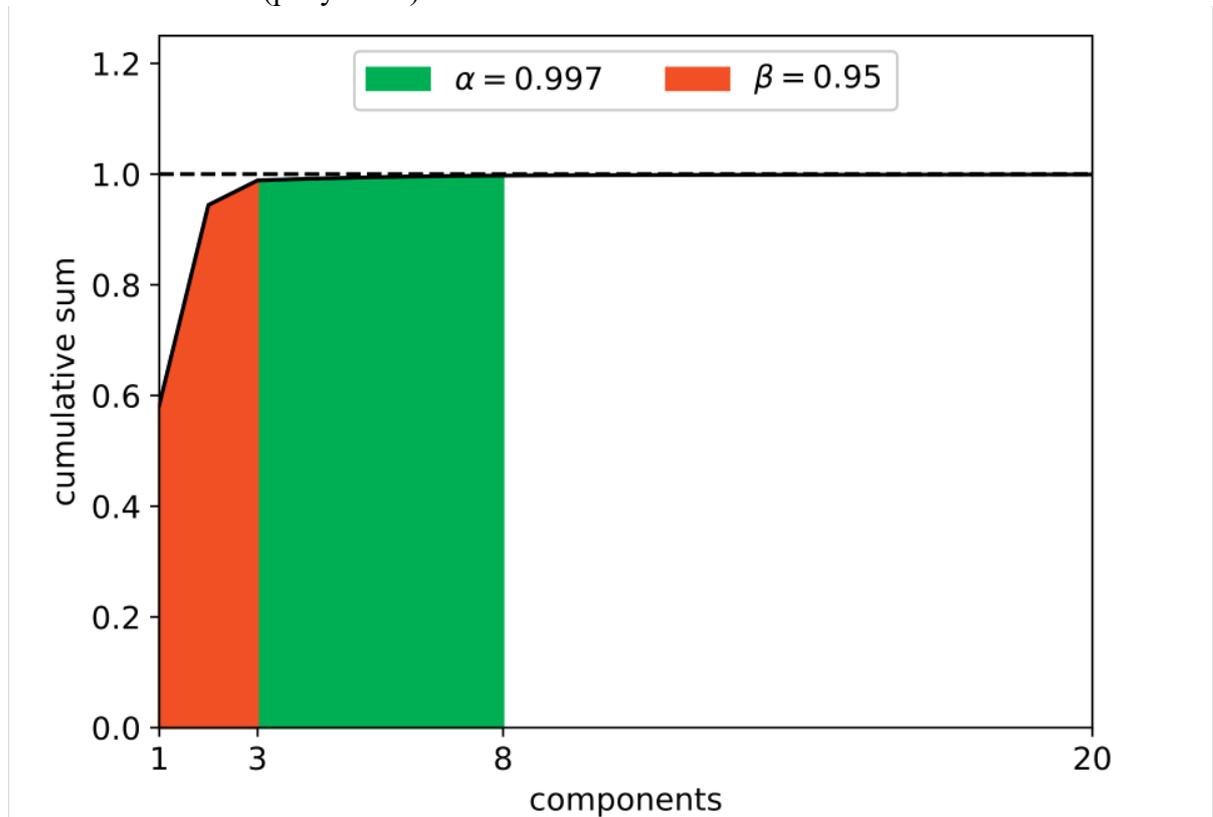


Рис. 4. Кумулятивная сумма при применении метода главных компонент для набора данных «Pavia university».

Полученные слои для случая $\beta = 0.95$ показаны на рисунке 5.

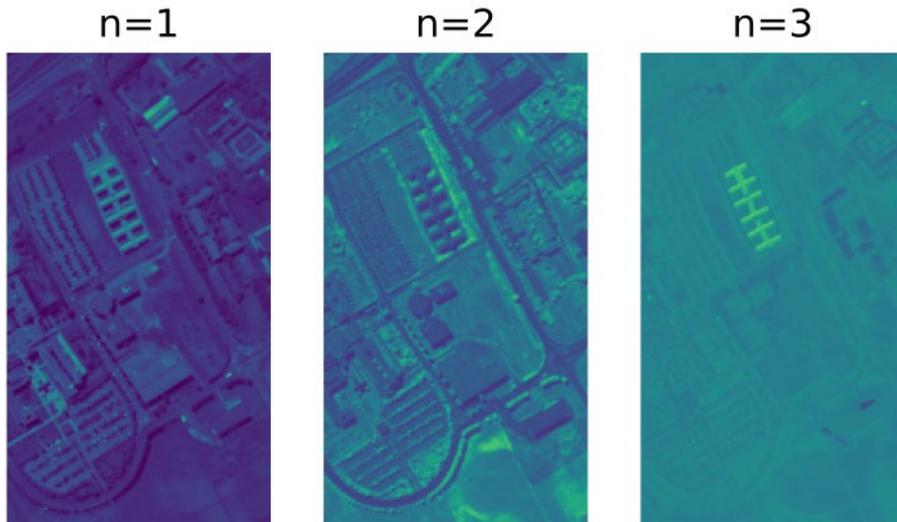


Рис. 5. Гиперкуб «Pavia university» при снижении размерности до 5 слоёв.

3. Классификация

Для решения задачи классификации воспользуемся четырьмя методами:

- Random forest (RF);
- k-nearest neighbors (KNN);
- Support Vector Machines (SVM);
- Logistic Regression (LR).

Для определения качества классификации воспользуемся взвешенной по классам F_1 -мерой, значения которой для каждого метода на каждом наборе данных представлены в таблице 1 и графически на рисунке 6.

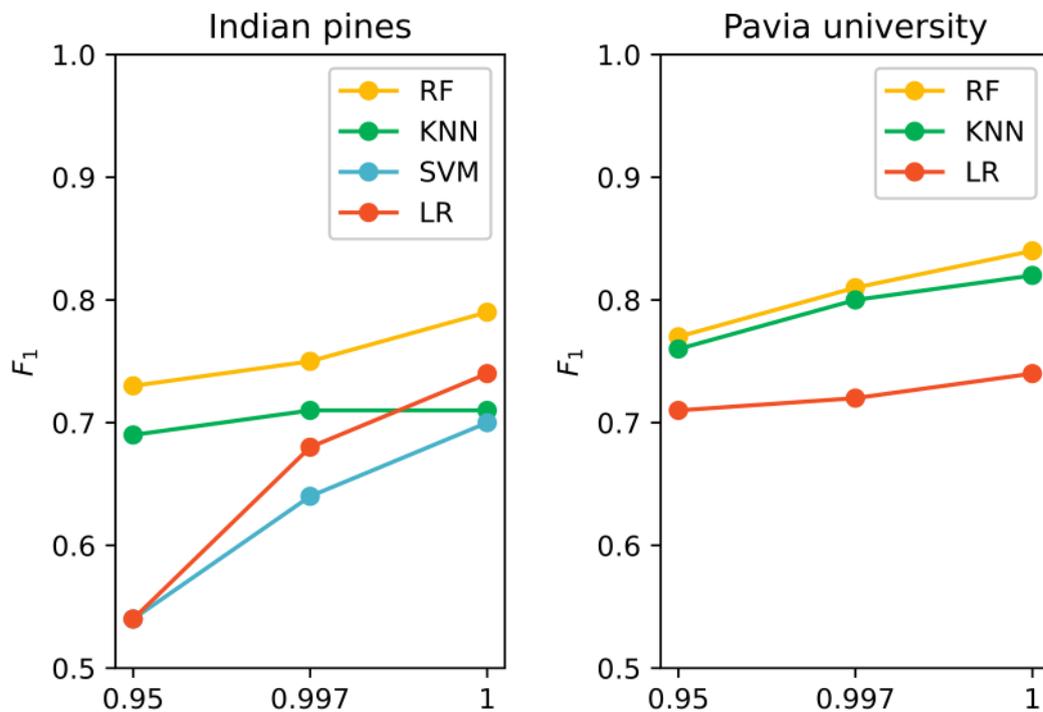


Рис. 6. Результаты работы классификаторов при различной размерности входных данных.

Таблица 1. Сравнение классификаторов по F_1 мере

Набор данных	RF	KNN	SVM	LR
Indian pines - 5	0.73	0.69	0.54	0.54
Indian pines - 48	0.75	0.71	0.64	0.68
Indian pines - 200	0.79	0.71	0.70	0.74
Pavia university - 3	0.77	0.76	-	0.71
Pavia university - 8	0.81	0.80	-	0.72
Pavia university - 103	0.84	0.82	-	0.74

Выводы

Решена задача классификации гиперспектральных данных различными методами машинного обучения. В качестве предварительной обработки данных используется метод главных компонент для снижения размерностей входных данных. Лучшие результаты достигнуты с помощью классификатора на алгоритмах Random forest и k-nearest neighbors, они же показали хорошую устойчивость к снижению размерности входных данных, что в свою очередь позволило существенно снизить вычислительные затраты.

Список литературы

1. CS229 - Machine Learning // Stanford Engineering Everywhere (SEE) URL: <https://see.stanford.edu/Course/CS229> (дата обращения: 1.06.2023).
2. Г. Д. Карташов, В. И. Тимонин, Л. М. Будовская Многомерный статистический анализ. - 1 изд. - 2007: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - 48 с.

Classification of hyperspectral data by machine learning methods

Trufanov N.N.¹,
Ph.D. of Physico-mathematical Sciences., Churikov D.V.¹,
Kravchenko O.V.²

¹Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

²Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Moscow
tru17v@gmail.com

The paper solves the problem of classification of hyperspectral data by various machine learning methods. The data sets "Indian pines" and "Pavia University" from open sources were taken as a training sample. The paper discusses methods for reducing the dimensionality of data for preprocessing, and also examines the influence of the dimensionality of input data on the classification accuracy of the developed models.

Keywords: machine learning, hyperspectral data, classification.

О температурной зависимости теплоёмкости нематических жидких кристаллов в изотропной окрестности точки фазового перехода НЖК – ИЖ

Абдурасулов А.А., Абдурасулов Д.А.

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,
г. Душанбе, Таджикистан

При термодинамическом описании аномальных ориентационных свойств теплофизических параметров нематических жидких кристаллов (НЖК), в частности теплоёмкость (C_{pn}), в окрестности точки фазового перехода нематический жидкий кристалл-изотропная жидкость (НЖК-ИЖ), устанавливаются вклады ориентации (ΔC_{pn}^θ), флуктуация ориентации (ΔC_{pn}^f) молекул НЖК, в определении их аномального поведения [1,2]. Например, для

$$C_{pn}(T) = C_{pi}(T) + \Delta C_{pn}^\theta(T) + \Delta C_{pn}^f(T) + \dots$$

Однако, закономерность зависимости их значения в изотропной фазе ($C_{pi}(T)$) от температуры, здесь, остается неопределенной.

В данном сообщении, приводятся некоторые результаты молекулярно-статистического описания возможности существования ближнего ориентационного порядка в изотропной фазе НЖК (short order), и определении закономерности зависимости регулярной части теплоёмкости изотропной фазы НЖК ($C_{pi}(T)$) от температуры.

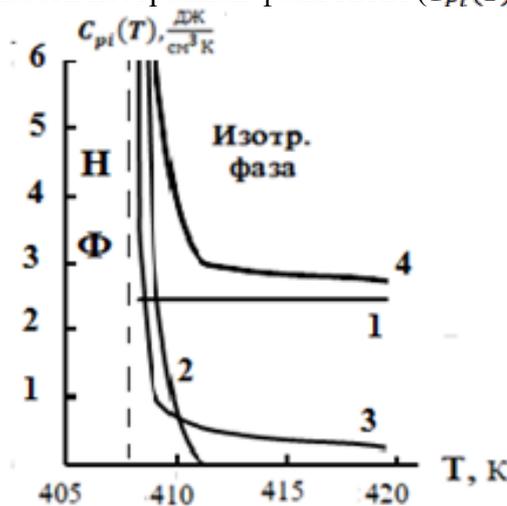


Рис. 1. Температурная зависимость теплоёмкость ПАА в изотропной фазе.

Рассматривается жидкая система, состоящая из N одинаковых жёстких молекул произвольной формы с массами m и моментами инерции I . Положение несферических молекул в пространстве определяются набором декартовых $\vec{x}_i\{x_i; y_i; z_i\}$ и угловых $\vec{\theta}_i\{\theta_i; \phi_i; \psi_i\}$ координат. Гамильтониан жидкости задается в виде

$$H = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\vec{p}_i^2}{2m} + \frac{\vec{M}_i^\alpha \vec{M}_i^\beta}{2I_{\alpha\beta}} + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j=1}^N \Phi_{ij}(\vec{x}_{ij}, \vec{\theta}_{ij}) \right].$$

В рамках равновесной функции распределения молекул, определяется выражение для плотности внутренней энергии НЖК, которое показывает возможность существования ближнего ориентационного порядка в изотропной фазе НЖК. Результаты численного расчета $C_{pi}(T)$ (для ПАА п-азоксианизола [1]) на основе полученного выражения приведены на рис.1 и представляют: вклады теплового движения и радиальной структуры НЖК (крив.1); ближнего ориентационного порядка (крив. 2); флуктуации ориентационного порядка (крив.3).

Кривая 4. – суммарное значение $C_{pi}(T)$. Полученные результаты, качественно близки к экспериментальным данным.

Список литературы

1. Де Жен П. Физика жидких кристаллов - М.: «Мир», 1977, 400 с.
2. Абдурасулов Д. А., Абдурасулов А.А., Одинаев С. Об аномальном поведении теплоёмкости нематических жидких кристаллов при переходе в изотропную фазу. - Политехнический вестник. Серия: интеллект, инновация, инвестиции, 2020, 4(50), С. 15-119.
3. Одинов С., Абдурасулов Д.А., Абдурасулов А. О вкладе ближнего ориентационного и радиального порядка молекул в теплоёмкость изотропной фазы нематических жидких кристаллов. // Известия НАН Таджикистана, 2022, №2 (187), с.37 -48.

Частотная дисперсия динамических вязкоупругих коэффициентов многоатомных жидкостей

Абдурасулов А.А., Абдурасулов Д.А., Шоайдаров Н.Б.

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,
г. Душанбе, Таджикистан

В рамках обобщенного ранее неравновесной функции распределения (НФР) [1] для описания неравновесных свойств сложных асимметричных жидкостей [2], сформулирована замкнутая система уравнений обобщенной гидродинамики, позволяющий описать динамические вязкоупругие свойства жидкостей, состоящих из одинаковых жестких молекул произвольной формы [3]. Показано, что характерные время релаксации всех происходящих в такой жидкой системы термических релаксационных процессов, можно выразить через характерные времена трех основных для данной жидкости трансляционных (τ_{tt}), вращательных (τ_{rr}), и обменных между поступательными и вращательными степенями свободы молекул (τ_{tr}), релаксационных процессов.

Упрощенные с учетом особенностей молекулярной структуры и характера происходящих в конкретной жидкой системе релаксационных процессов, полученная система уравнений обобщенной гидродинамики упрощается и применяется для описания динамических вязкоупругих свойств этих жидкостей.

В настоящей работе приводятся результаты применения упрощенных с учетом условия

$$\frac{\tau_{tr}}{\tau_{tt}}, \frac{\tau_{tr}}{\tau_{rr}} \ll 1,$$

что соответствует рассмотрению жидких систем, где обмен энергия между разными степенями свободы молекул происходит, быстрее чем обмен энергия между одинаковыми степенями свободы уравнения, для описания динамических вязкоупругих свойств многоатомных жидкостей. Например, для динамического коэффициента сдвиговой вязкости многоатомных жидкостей получено выражение

$$\eta_{s\ tr}(\nu) = \frac{\mu_{s\ tr} \alpha \tau_{tr}}{2(1+(\nu\tau_{\text{эф}})^2)(1+(\nu\tau_{tr})^2)},$$

где $\mu_{s\ tr}$ - высокочастотный модуль упругости,

$$\tau_{\text{эф}} = \frac{10\tau_{tr}^2(\tau_{tt} + \tau_{rr})}{3\tau_{tt}\tau_{rr}},$$

ν – частота динамического процесса.

На рис. 1, приведены результаты численного расчета $\eta_{s\ tr}(\nu)$ для жидкого азота. Видно, что частотная дисперсия $\eta_{s\ tr}(\nu)$ имеет, как минимум две релаксационные области с характерными временами релаксации $\tau_{\text{эф}}$ и τ_{tr} .

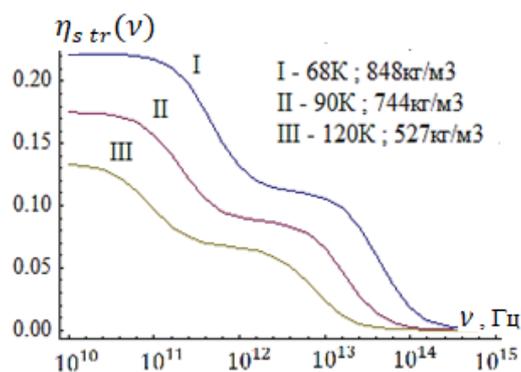


Рис. 1. Зависимость динамического коэффициента сдвиговой вязкости жидкого азота от частоты.

Список литературы

1. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: «Мир», 1977, 400 с.
2. Абдурасулов Д. А., Абдурасулов А.А., Одинаев С. Об аномальном поведении теплоёмкости нематических жидких кристаллов при переходе в изотропную фазу. Политехнический вестник. Серия: интеллект, инновация, инвестиции, 2020, 4(50), С. 15-119.
3. Абдурасулов А.А., Шоайдаров Н.Б., Абдурасулов Д.А. К статистической теории динамических вязкоупругих свойств многоатомных жидкостей. //Материалы VIII Международной конф. «Современные проблемы физики», Душанбе, ФТИ имени С.У. Умарова, 21-22 октября 2022 г.С.134-139.

Влияние адсорбированных молекул азота на эмиссионные свойства одно ственных углеродных нано трубок, синтезированных разрядно-дуговым способом

С.М.Умаев

ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова»

Аннотация

Исследуются автоэмиссионные свойства углеродных нано трубок, синтезированных разрядно-дуговым способом с последующим адсорбцией азотом при нормальных условиях. Испытания на эмиссионные свойства углеродных нано трубок в сверхтекучем гелии показали, что ток отрицательных зарядов меняется в пределах 10^{-12} А до 10^{-6} А, а напряжение от 50В до 500В. Автоэмиссионные свойства у источников зарядов исследуются при низких температурах в сверхтекучем гелии. В начале проводились испытания на эмиссионные свойства у автоэлектронных источников первого типа - не модифицированных азотом углеродных нано трубок. Ток отрицательных зарядов на уровне 10^{-12} А возникает при напряжении $U=80$ В. Затем проводились испытания на эмиссионные свойства у автоэлектронных источников второго типа - модифицированных углеродных нано трубок азотом. Ток отрицательных зарядов на уровне 10^{-12} А возникает при напряжении $U=120$ В.

Ключевые слова: углеродные нано трубки; физическая адсорбция; эмиссионные свойства модифицированных углеродных нано трубок.

Введение

Необычные физико-химические свойства углеродных nano трубок (УНТ) составляют основу для множества направлений прикладного использования этих объектов. Так, хорошая проводимость и высокое аспектное отношение УНТ делают их уникальным источником полевой электронной эмиссии, который может быть использован в высокоэффективных холодных эмиссионных катодах.

Поскольку УНТ представляет собой поверхностную структуру, вся ее масса заключена в поверхности ее слоев; поэтому рассматриваемый объект имеет аномально высокую удельную поверхность ($\approx 2000 \text{ м}^2/\text{г}$), что, в свою очередь, определяет особенности его сорбционных характеристик [1].

Сорбционные свойства тубулярных ((tubularis; лат. tubulus трубка) относящийся к трубке, имеющий форму трубки) nano структур уже давно привлекают внимание широкого круга исследователей. Особо выдающимися характеристиками обладают углеродные nano трубки [2]. Изучению механизмов адсорбции атомов и молекул на их поверхности (внутренней и внешней) посвящен довольно обширный круг работ, в том числе работы [3; 4; 5; 9; 10]. В настоящей работе приведены результаты теоретических и практических исследований физической адсорбции азота углеродными nano трубками и исследованы эмиссионные свойства модифицированных и не модифицированных углеродных nano трубок в сверхтекучем гелии.

Методы и техника эксперимента

Разрядно-дуговой метод, примененный Ииджимой, по сей день остается самым популярным. В этом методе для получения углеродных nano трубок использует термическое распыление графитового электрода в плазме дугового разряда, горящей в атмосфере гелия.

Устройство для получения массивов углеродных трубок на металлических подложках описано в статье Н. Н. Колесникова, Д. Н. Борисенко, А. А. Левченко [11] Патент РФ № 2 2013.

Эксперимент

Полированные подложки в количестве 3-5 штук размещались на плоском графитовом катоде и закреплялись графитовыми винтами так, что расстояние от центра катода до центра подложки составляло 12-20мм. Расстояние между электродами-1-2мм. Напряжение - (20-25) В, сила тока - (100-110) А, продолжительность горения дуги варьировалась в интервале 10-30 с. Процесс осаждения проводили в атмосфере гелия. Процесс синтеза осуществляется в камере, заполненной гелием под давлением около 500 Торр. Для выращивания однослойных nano трубок в качестве катализатора использовались смеси Ni и Co~3/2. Присутствие углеродных nano трубок в синтезированном материале было подтверждено фотографиями. Фотографии были сделаны сканирующим микроскопом (лаборатория института физики твердого тела г. Черноголовка Московская область).

Подготовка ячеек:

1. Обработка ячеек ацетоном, а затем спиртом (технический спирт)
2. Припаивание контактов к выводам ячеек.
3. Образцы с углеродными nano трубками синтезированных разрядно-дуговым способом закрепляем сверху диафрагмой и ставим в ячейки.
4. Изолируем эмиттер и коллектор (расстояние между массивов углеродных nano трубок на металлических подложках и коллектором - 0,3мм) .
5. Подготовленные ячейки крепим к стержню и опускаем в стеклянный гелиевый криостат. Проводим откачку объема с помощью вакуумного насоса; заливаем азот (предварительное захлаживание); заливаем гелий. Для получения температуры 4,2-2,17 К проводим откачку паров ^4He .

Измерения вольтамперных характеристик автоэлектронной эмиссии проводились по схеме (рис3) с использованием источника постоянного напряжения Stanford Research Systems, ModelPS350/5000V-25W К.

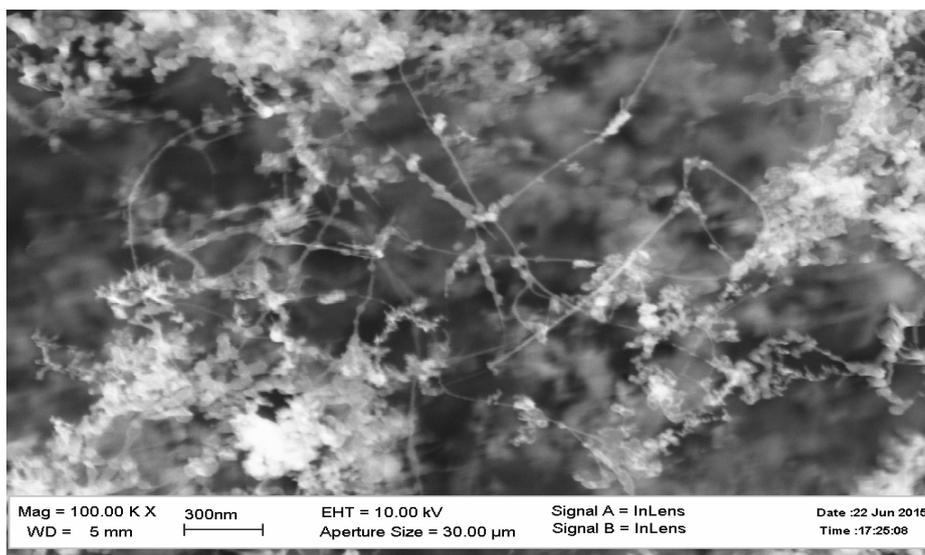


Рис. 2. Фотография углеродных nano трубок, синтезированных дуговым способом, сделаны сканирующим микроскопом (лаборатория института физики твердого тела г. Черноголовка Московская область).

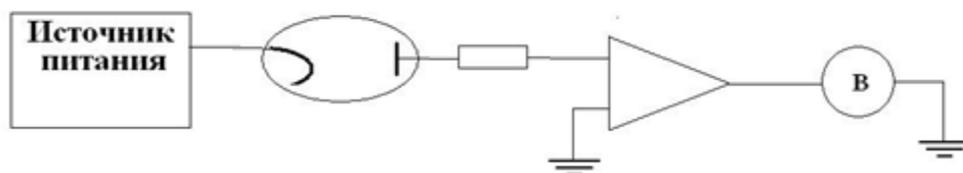


Рис. 3. Схема для измерения вольтамперных характеристик автоэлектронных эмиттеров.

Для измерений коллекторного тока использовали усилитель постоянного тока *Stanford Research Systems, Model SR 570*.

Напряжение к источнику подключали через ограничительное сопротивление $R \approx 10^{10}$ Ом. Вольтамперную характеристику источников зарядов снимали при низких температурах в сверхтекучем гелии. В начале проводились измерения вольтамперной характеристики эмиссионного тока немодифицированных углеродных nano трубок в диапазоне 10^{-12} - 10^{-6} А.

При увеличении напряжения наблюдается плавный рост тока от 10^{-10} А до 10^{-7} А. Заметная инжекция электронов, как видно из рис.4, первоначально начиналась при напряжении около 80 В.

Модифицирование углеродных nano трубок азотом:

1. Подготовленные ячейки с углеродными nano трубками, синтезированных разрядно-дуговым способом, крепим к стержню и опускаем в стеклянный криостат.
2. Наливаем 250мл жидкого азота(77К) в стеклянный криостат, при температуре 295К, давление 1 атмосфера.
3. Через 2 часа азот испаряется полностью (адсорбция атомов или молекул на внутренней и внешней поверхности).

Затем проводим откачку объема с помощью вакуумного насоса; заливаем азот (предварительное захлаживание); заливаем гелий. Для получения температуры 4,2-2,17К проводим откачку паров ^4He . Вольтамперную характеристику источников зарядов модифицированных углеродных nano трубок снимаем при низких температурах в сверхтекучем гелии. Заметная инжекция электронов, как видно из рис.5, первоначально начиналась при напряжении около 120 В.

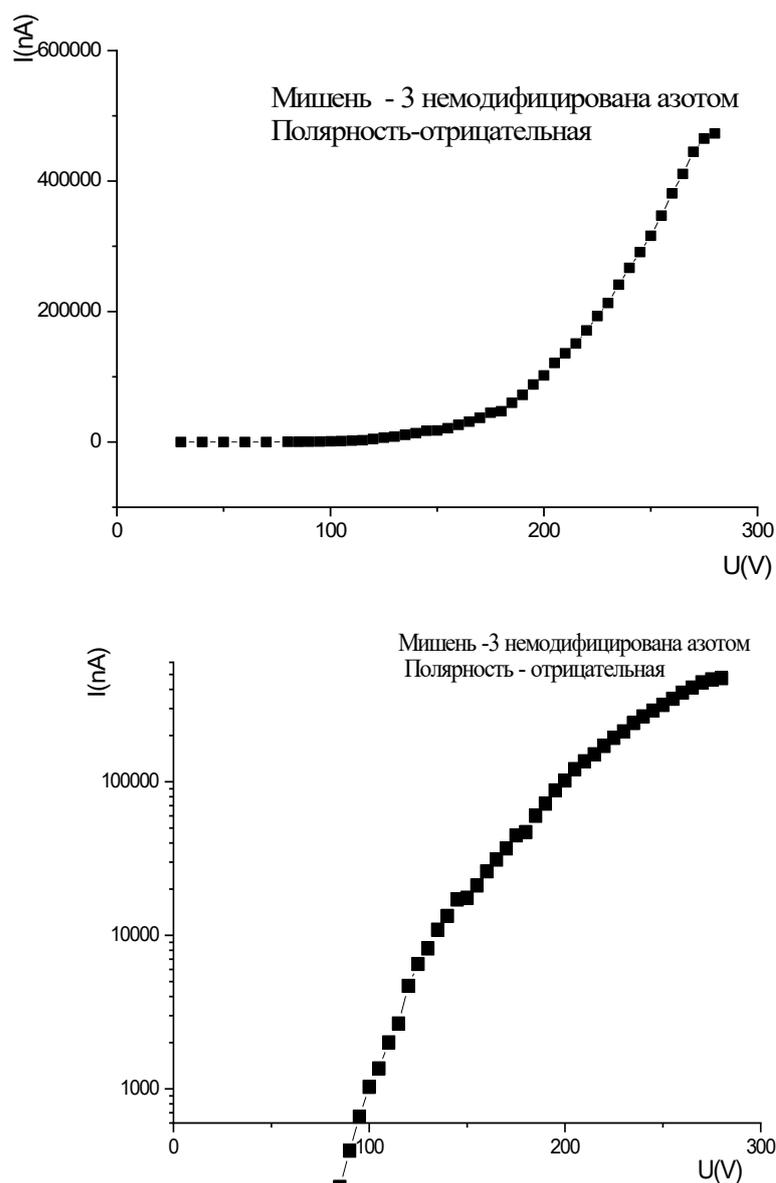


Рис. 4. Вольтамперная характеристика не модифицированного источника, изготовленного разрядно-дуговым способом.

Обсуждение результатов исследований:

Высокие эмиссионные характеристики УНТ определяются в первую очередь высоким значением аспектного отношения, характеризующим эти объекты. Благодаря этому электрическое поле в окрестности нано трубки в сотни раз превышает среднее по объему значение, оцениваемое как отношение падения напряжения к величине межэлектродного промежутка. В результате эмиссионные свойства УНТ проявляются при существенно более низких значениях приложенного напряжения по сравнению с традиционно используемым и автоэмиссионными катодами, изготовленными на основе макроскопических металлических остри. В нашем случае эмиссионные свойства не модифицированных углеродных нано трубок проявляются при напряжении $U = 80\text{В}$ Рис.4. С повышением приложенного напряжения коллекторный ток возрастает.

Адсорбция-процесс, в котором атомы или молекулы вещества в одной фазе (обычно газ) становятся связанными с поверхностью второго вещества в другой фазе (обычно твердой). В результате диффузии молекулы азота проникают в поры и осаждаются на поверхности нано трубки. Молекулы азота связываются с поверхностью углеродной

трубки(молекулами углерода) силами Ван-дер-Ваальса, с учетом притяжения квадруполь, а также постоянных и наведенных диполей. Снижение подвижности носителей заряда связано с тем, что в сверхтекучем гелии происходит «отвердевание молекул» - сужение кристаллической решетки и изменение положения уровня Ферми и, соответственно, ухудшения эмиссионных свойств углеродных nano трубок. Из эксперимента видно, что эмиссионные свойства не модифицированных углеродных nano трубок проявляются при напряжении $U = 80\text{В}$ (рис.4), а у модифицированных - при $U = 120\text{В}$ (рис.5).

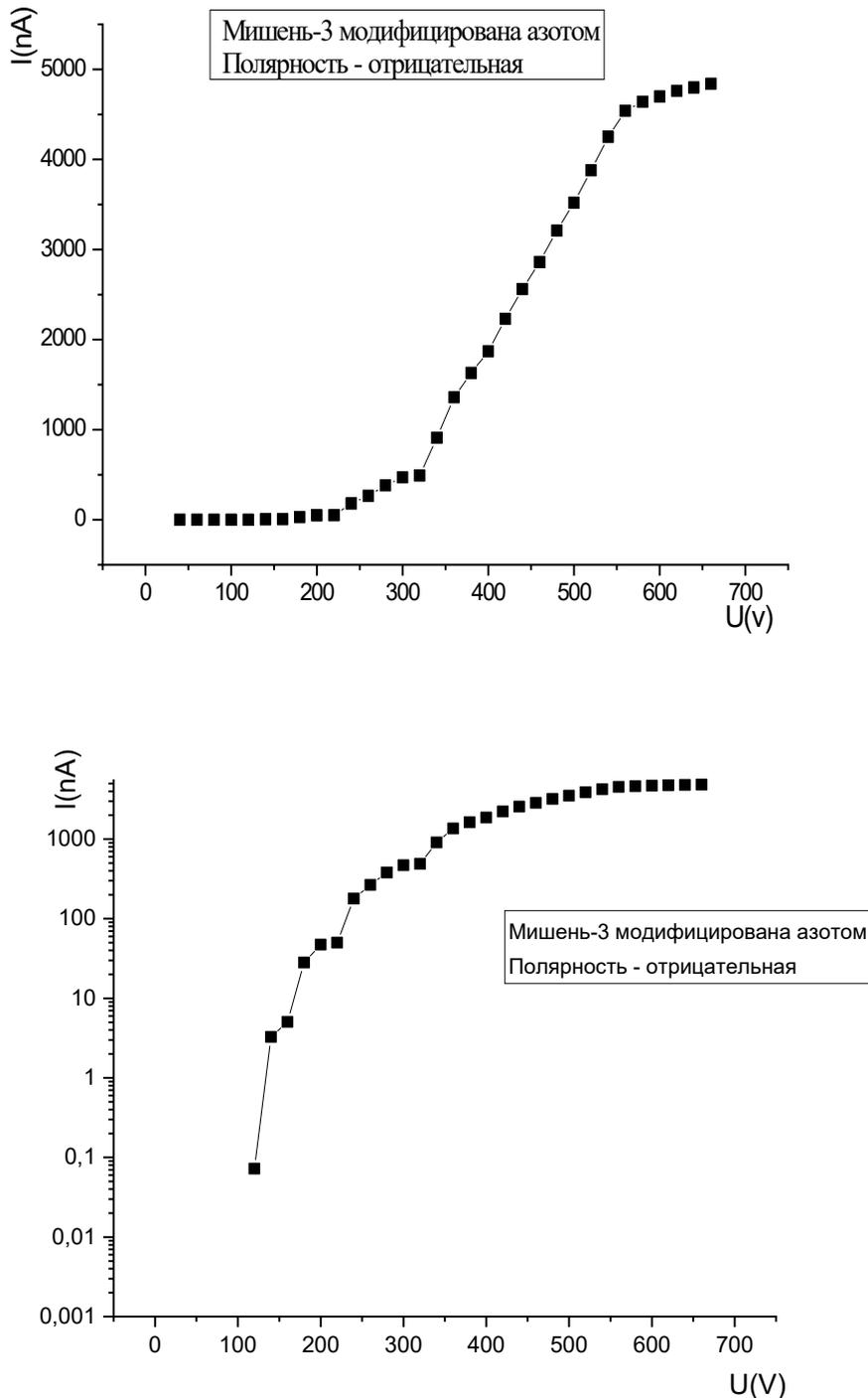


Рис. 5. Вольтамперная характеристика модифицированного источника, изготовленного разрядно-дуговым способом.

Заключение

В настоящей работе были приведены результаты теоретических и практических исследований физической адсорбции азота углеродными нанотрубками и исследованы эмиссионные свойства модифицированных и не модифицированных углеродных нанотрубок в сверхтекучем гелии. Из анализа эксперимента следует, что углеродные нанотрубки, модифицированные азотом, дают эмиссионный ток при напряжениях больше, чем не модифицированные. На наш взгляд это связано с тем, что молекулы азота, диффундированные в поры и на поверхности углеродных нанотрубок (при нормальных условиях), в сверхтекучем гелии «отвердевают», происходит сужение кристаллической решетки и изменение положения уровня Ферми и соответственно ухудшаются эмиссионные свойства углеродных нанотрубок.

Исследования проводились в лаборатории ИФТТ РАН, Черноголовка.

Список литературы

1. Елецкий, А.В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур [Текст] / А.В. Елецкий // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174. – № 11. – С. 1191 – 1231
2. Елецкий, А. В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур / А. В. Елецкий // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 11. – С. 1191–1231.
3. Запороцкова, И. В. Механизмы заполнения однослойных углеродных нанотрубок атомарным водородом / И. В. Запороцкова, Н. Г. Лебедев // Химическая физика. – 2006. – Т. 25, № 5. – С. 91–96.
4. Запороцкова, И. В. Особенности сорбции легких атомов на поверхности однослойного углеродного тубелена / И. В. Запороцкова, А. О. Литинский, Л. А. Чернозатонский // Письма в ЖЭТФ. – 1997. – Т. 66. – С. 799–802.
5. Лебедев, Н. Г. Исследование процессов окислирования и фторирования однослойных углеродных нанотрубок в приближении MNDO / Н. Г. Лебедев, И. В. Запороцкова, Л. А. Чернозатонский // Физика твердого тела. – 2002. – Т. 44, № 3. – С. 464–466.
6. Литинский, А. О. Модель ионно-встроенного ковалентно-циклического кластера в MNDO о расчетах межмолекулярных взаимодействий в гетерогенных системах / А. О. Литинский, Н. Г. Лебедев, И. В. Запороцкова // Журнал физической химии. – 1995. – Т. 69, № 1. – С. 189.
7. Ярославцев, А. Б. Протонная проводимость в твердых телах / А. Б. Ярославцев // Успехи химии. – 1994. – Т. 63. – С. 449.
8. Dewar, M. J. S. Ground states of molecules. 38. The MNDO method. Approximations and Parameters / M. J. S. Dewar, W. Thiel // J. Amer. Chem. Soc. – 1977. – Vol. 99. – P. 4899–4906.
9. Lebedev, N. G. Single and regular hydrogenation and oxidation of carbon nanotubes: MNDO calculations / N. G. Lebedev, I. V. Zaporotskova, L. A. Chernozatonskii // International Journal of Quantum Chemistry. – 2003. – Vol. 96, № 2. – P. 149–154.
10. Lebedev, N. G. Fluorination of carbon nanotubes: quantum chemical investigation within MNDO approximation / N. G. Lebedev, I. V. Zaporotskova, L. A. Chernozatonskii // International Journal of Quantum Chemistry. – 2003. – Vol. 96, № 2. – P. 142–148
11. Н. Н. Колесников, Д. Н. Борисенко, А. А. Левченко, Устройство для получения массивов углеродных нанотрубок на металлических подложках. Патент РФ № 2 2013.

Особенности многоаспектного исследования недоусложнённых моделей биоинспирированных нейросетей в развитии идей А. Н. Радченко

старший научный сотрудник, к.т.н., Рожнов А.В.¹ (SPIN: 9745-5752)
доцент, Ph.D., Рохини С. Халликар²

¹Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

²Инженерный колледж Раштрея Видьялая, Бангалор, Карнатака, Индия
rozhnov@ipu.ru

Представлены характерные особенности междисциплинарных исследований в интересах развития новых средств и методов многоаспектного моделирования перспективных интеллектуальных сред на начальных этапах жизненного цикла сложных систем различного назначения, в том числе преимущественно и в ходе организации и проведении поисковых исследований. Так, в рассматриваемом случае биоинспирированные нейросети – это, прежде всего, взаимоувязанные частные модели гибридных искусственных нейронных сетей, основывающихся на принципах работы биологических нейронов. В частности, в данном исследовании получает закономерное развитие ряд наиболее интересных и основополагающих идей А. Н. Радченко в новых возможностях интеллектуального обеспечения при построении недоусложнённых компонентов виртуальной семантической среды («Wetware»), применяется формализм диофантовых нейронных сетей. Многоаспектный характер проводимых исследований позволяет своевременно учитывать возникающие тенденции в сфере интеллектуализации.

Ключевые слова: биоинспирированные нейросети, многоаспектные исследования, идеи А. Н. Радченко.

В рамках совместного с инициативными зарубежными коллегами доклада представлены характерные особенности междисциплинарных исследований в интересах обоснования предложений по развитию новых средств и методов многоаспектного моделирования перспективных интеллектуальных сред на начальных этапах жизненного цикла сложных систем различного назначения [1-11], в том числе преимущественно и в ходе организации поисковых исследований. Итак [1-5], биоинспирированные нейросети (биологически инспирированные искусственные нейронные сети) в рассматриваемом случае это, прежде всего, взаимоувязанные частные модели гибридных искусственных нейронных сетей, основывающихся на принципах работы биологических нейронов в определённо большей степени, чем во многих наиболее популярных в настоящее время научно-обоснованных и прикладных подходах в рамках т.н. современных технологий искусственного интеллекта. В частности, в данном предварительном исследовании получает закономерное развитие ряд основополагающих идей А.Н. Радченко (Моделирование основных механизмов мозга. Издательство «Наука», Ленинградское отделение, Л. 1-212. Авт. Радченко А.Н., 1968) [1] в реализуемых возможностях интеллектуального обеспечения («Wetware»). Наряду с таким обоснованным использованием представлений целостной информационно-структурной модели биологического мозга, при построении практически реализуемых архитектур и недоусложнённых компонентов виртуальной семантической среды, при этом применяется формализм диофантовых нейронных сетей (Тимофеев А.В., Шибзухов З.М., 1997).

Выводы

Многоаспектный характер проводимых совместных предварительных исследований позволяет своевременно учитывать возникающие тенденции становления, формирования

и развития новых идей публичных передовых междисциплинарных проектов [3, 6, 9, 11] в востребованной сфере интеллектуализации систем (сред) и процессов «как есть» в целом.

Список литературы

1. Моделирование основных механизмов мозга. Радченко А.Н. 1968. Издательство «Наука», Ленинградское отделение, Л. 1-212.
2. Фатеева Ю.Г., Рожнов А.В. О многоаспектном моделировании биоинспирированной нейросети на основании идей А. Н. Радченко: введение // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2017. Т. 7, № 4. С. 186-189. eLIBRARY ID: 38468434, EDN: TTPSIZ.
3. Рожнов А.В. Совершенствование комплексных подходов и проблемные вопросы интеллектуализации технологий в сервисах медицинской диагностики / Материалы 30-й Международной конференции "Проблемы управления безопасностью сложных систем" (Москва, 2022). – М.: ИПУ РАН, 2022. С. 349-354. eLIBRARY ID: 50112140, EDN: UDHENA.
4. Рожнов А.В. Некоторые предпосылки расширения предметной области комплексных исследований управления ЛА в контексте концепции «организм-на-чипе» / Тезисы 20-й Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» (Москва, 2022). – М.: МГППУ, 2022. С. 160-161. eLIBRARY ID: 49416120, EDN: WYJTZJ.
5. Рожнов А.В. Исследование потенциала управления траекторией полёта ЛА посредством системы, использующей сеть живых нейронов коры головного мозга / Тезисы 20-й Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» (Москва, 2022). – М.: МГППУ, 2022. С. 159-160. eLIBRARY ID: 49416119, EDN: KXPYKL.
6. Разработка и исследование алгоритмов выделения и распознавания объектов в видеопоследовательностях на базе специализированных мобильных устройств. Отчёт о НИР. [Конкурсы по направлениям "Стратегия научно-технологического развития РФ" (МК)]. Рук.: Рожнов А.В. – М., 2019. eLIBRARY ID: 50713756, EDN: MMNBKU.
7. Рожнов А.В., Гречанюк Ф.А. К дискуссии о новых понятиях в сфере интеллекта: что есть «сверхискусственное»? / Тезисы 14-й Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» (Москва, 2016). – М.: МГППУ, 2016. С. 15-18. eLIBRARY ID: 25673788, EDN: VPVHTV.
8. Лобанов И.А., Рожнов А.В. О сознании, законе замкнутых пространств и философии Н.А. Белова // Всероссийская научно-практическая конференция «Сознание и подсознание в искусстве и науке» («Григорьевские чтения», 17 цикл, Москва, 20-21 марта 2014 года). Программа, 2 день. – М.: Государственный центр современного искусства (ГЦСИ), Московское музыкальное общество, 2014.
9. Hallikar, Rohini. (2012). A Novel Method for Obtaining a Better Quality Speech Signal for Cochlear Implants using Kalman with DRNL and SSB Technique. Advanced Computing: An International Journal. 3. 71-75. 10.5121 / acij.2012.3409 [<https://www.researchgate.net/publication/269671383>].
10. Hallikar, Rohini & Uttarakumari, M. & Padmaraju, K. & Yashas, D. (2018). Modified Turbo and SDRM Method for Speech Processing for Cochlear Implants. International Journal of Engineering and Technology (UAE). 7. 179-181. 10.14419 / ijet.v7i4.5.20040 [<https://www.researchgate.net/publication/327965306>].
11. O, Arun & Nadig, Anirudh & S, Hariharan & Surya, J & Hallikar, Rohini. (2022). Brain Tumor Detection, Segmentation and Comparison using ResNet and Unet. Xi'an Jianzhu Keji Daxue Xuebao / Journal of Xi'an University of Architecture & Technology. XIV. 585-593. 10.37896 / JXAT14.07/315458 [<https://www.researchgate.net/publication/364029958>].

Features of multiaspect research of not up to complicated models of bio-inspired neural networks in the development of A. N. Radchenko's ideas

Senior Researcher, Ph.D. of Engineering Sciences, Rozhnov A.V.¹ (SPIN: 9745-5752),
Professor (Assistant), Ph.D., Rohini S. Hallikar²

¹V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia

²Rashtriya Vidyalaya College of Engineering, Bengaluru, Karnataka, India
rohinish@rvce.edu.in

The characteristic features of interdisciplinary research are presented in the interests of substantiating proposals for the development of new tools and methods for multiaspect modeling of promising intelligent environments at the initial stages of the life cycle of complex systems. So, biologically inspired artificial neural networks in the case under consideration are, first of all, interconnected private models of hybrid artificial neural networks based on the principles of biological neurons to a definitely greater extent than in many of the currently most popular scientifically based and applied approaches. In particular, in this study, a number of the A. N. Radchenko ideas are developing (in the wetware). Along with such a reasonable use of representations of the integral information-structural model of the biological brain, the formalism of Diophantine neural networks is used in the construction of uncomplicated components of the virtual semantic environment.

Keywords: bio-inspired neural networks, multiaspect research, A. N. Radchenko's ideas

Генетический алгоритм и метод оптимизации симплекс для оптимизации цветовых параметров в фрактальных изображениях, совместно с классификацией цветовых схем с использованием нейронной сети

Нуралиев Ф.М., Тастанова С.А.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

Аннотация. В данной статье представлен новый подход к оптимизации цветовых параметров в фрактальных изображениях ковров, основанный на комбинации генетического алгоритма и метода оптимизации симплекс. Этот подход обеспечивает более эстетически привлекательные цветовые решения, учитывая специфические особенности фрактальных структур в ковровом дизайне. Кроме того, статья также представляет метод классификации цветовых схем фрактальных изображений с помощью нейронной сети, что позволяет автоматически определять характеристики цветовых решений.

Фрактальные изображения широко используются в различных областях, таких как компьютерная графика, дизайн, архитектура и текстильное производство. Одним из важных аспектов создания красивых и эстетически привлекательных фрактальных изображений является оптимизация и настройка цветовых параметров [1]. Цветовые схемы играют ключевую роль в создании визуального впечатления и выражении идей в фрактальном дизайне. Однако, определение оптимальных цветовых параметров может быть сложной задачей, требующей экспериментов, проб и ошибок. В данной статье мы представляем новый подход, объединяющий генетический алгоритм и метод оптимизации симплекс, для эффективной оптимизации цветовых параметров в фрактальных изображениях [2].

Генетический алгоритм и метод оптимизации симплекс Генетический алгоритм (ГА) является эволюционным методом оптимизации, основанным на принципах естественного отбора и генетической мутации [3]. Он имитирует процесс естественного отбора, в котором "особи" с наилучшими характеристиками выживают и передают свои гены следующему поколению. В нашем исследовании мы применяем генетический алгоритм для оптимизации цветовых параметров в фрактальных изображениях. Алгоритм состоит из следующих шагов: инициализация популяции цветовых схем, оценка их качества с помощью целевой функции, селекция лучших решений, скрещивание и мутация, формирование новой популяции. Этот процесс повторяется до достижения оптимального решения [4].

Метод оптимизации симплекс, с другой стороны, является итерационным алгоритмом оптимизации, используемым для нахождения минимума или максимума функции. Он основан на идее движения по многограннику (симплексу) в пространстве параметров функции с целью нахождения оптимального значения. Мы комбинируем генетический алгоритм с методом оптимизации симплекс для улучшения процесса оптимизации цветовых параметров в фрактальных изображениях [5]. Генетический алгоритм обеспечивает исследование разнообразных цветовых схем, в то время как метод оптимизации симплекс уточняет и настраивает параметры для достижения наилучших результатов.

Классификация цветов фрактальных структур с использованием нейронной сети. Помимо оптимизации цветовых параметров, важным аспектом является классификация цветов фрактальных структур. В нашей работе мы применяем нейронные сети для классификации цветовых схем фрактальных изображений в ковровом дизайне [7]. Нейронные сети представляют собой мощный инструмент машинного обучения, способный обрабатывать и анализировать большие объемы данных. Мы обучаем нейронную сеть на размеченных данных фрактальных изображений с различными цветовыми схемами. Затем полученная модель может автоматически классифицировать новые цветовые схемы на основе их характеристик. Это позволяет нам более точно анализировать и оценивать цветовые решения в фрактальных изображениях и определять их соответствие требованиям коврового дизайна [8].

Список литературы

1. Liao, H., Zhu, Y., Zhang, L., & Ren, X. (2018). Fractal image compression based on genetic algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, 77(10), 12119-12137.
2. Rajapakse, T. W., & Collins, J. J. (2000). A genetic algorithm for the design of fractal antenna arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 48(4), 521-529.
3. Chung, H. C., Cheng, Y. T., & Chen, C. T. (2003). Genetic algorithm for fractal image compression. *Signal Processing*, 83(7), 1549-1562.
4. Wang, D. H., & Qiu, T. X. (2005). Fractal image compression based on genetic algorithm. *Journal of computer research and development*, 42(1), 130-134.
5. Pappas, T. N., & Safranek, R. J. (1992). Color image quality metrics. *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, 1, 381-385.
6. Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600-612.
7. Liu, F., & Li, S. (2014). Adaptive fractal image compression based on GA and PSO algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, 70(3), 1949-1965.
8. Li, X., Guo, H., Li, X., Li, S., & Li, D. (2019). An improved fractal image compression based on adaptive color quantization and differential evolution algorithm. *Neural Computing and Applications*, 31(9), 4971-4982.

Расчет статики и динамики геометрически нелинейных гибких анизотропных пластин со сложной формой

Профессор, доктор технических наук, доцент Ф.М. Нуралиев¹ (SPIN-код: 8518-9757),
Доцент, кандидат технических наук, доцент Н.Г. Эшкараева²,
Доцент, PhD по техническим наукам Ш.Ш. Сафаров³,

^{1, 3}Ташкентский университет информационных технологий
имени Мухаммада ал-Хоразми
nuraliev2001@mail.ru

²Каршинский государственный университет, Карши
1970narxol@gmail.com

Аннотация: В статье рассматривается расчет задач статики и динамики анизотропных гибких пластин сложной конфигурации методом R-функции (RFM) приложенного академиком В.Л.Рвачевым. Вывод уравнения движения геометрически нелинейной анизотропной пластины основан на принципе Лагранжа – в случае статики и Гамильтона-Остроградского – в случае динамики. Здесь при построении конкретных моделей используются геометрические соотношения Коши и физические соотношения, в обратной форме закона Гука, а также закон изменения перемещений – гипотеза Кирхгофа-Лява. При этом получаются системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с естественными начально-граничными условиями, т.е. с граничными условиями (статика) и начальными условиями (динамика). Эти уравнения решаются при соответствующих граничных условиях в зависимости от способа закрепления краев пластины, т.е. жестко-зашемленные края, свободно-опертые края, свободный край и т.д. На основе предложенного метода разработан вычислительный алгоритм линеаризации нелинейных систем дифференциальных уравнений, и здесь мы представляем простейший метод линеаризации, полученный при использовании метода последовательных приближений. Для расчета анизотропных гибких пластин сложной конфигурации предложен вычислительный алгоритм с использованием вариационного метода Бубнова-Галеркина и структурного метода R-функций.

Ключевые слова: вариационный принцип Остроградского-Гамильтона (Лагранжа), анизотропные пластины, геометрическая нелинейность, метод R-функций (RFM), метод Бубнова-Галеркина, вычислительный алгоритм, метод линеаризации (итерации), сложные конфигурации области

Введение

Здесь основные уравнения теории упругости тонких пластин выводятся на основании вариационного принципа Лагранж. При построении конкретных моделей используются геометрические соотношения Коши и физические соотношения, в обратной форме закона Гука, а также закон изменения перемещений [3]. При выводе уравнения используется прямоугольная система координат.

При выводе уравнения равновесия используем гипотезу Кирхгофа-Лява [2]:

$$u_1 = u - z \frac{\partial w}{\partial x}, \quad u_2 = v - z \frac{\partial w}{\partial y}, \quad u_3 = w(x, y). \quad (1)$$

На основании этого соотношения Коши запишем в виде [1]:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2, \\ \varepsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}.$$

С учетом гипотезы Кирхгофа-Лява закон Гука принимает следующий вид [4]:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= B_{11}\varepsilon_{11} + B_{12}\varepsilon_{22} + B_{16}\varepsilon_{12}, \\ \sigma_{22} &= B_{12}\varepsilon_{11} + B_{12}\varepsilon_{22} + B_{26}\varepsilon_{12}, \\ \sigma_{12} &= B_{16}\varepsilon_{11} + B_{26}\varepsilon_{22} + B_{66}\varepsilon_{12}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}$ – компоненты тензора деформации; $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$ – компоненты тензора напряжения; B_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$) – постоянные.

Уравнения равновесия геометрически нелинейных анизотропных гибких пластин, введенные на основе принципа Лагранжа. [4].

Рассмотрим численное исследование и расчет анизотропных пластин со сложной формой при свободно-опертых граничных условиях.

Свободное опирание (скользящий шарнир):

$$\left. \begin{aligned} w|_r &= 0, \\ M_n|_r &= \left[S_1 \frac{\partial^2 w}{\partial n^2} + 2S_2 \frac{\partial^2 w}{\partial n \partial \tau} + S_3 \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} \right] |_r = 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_n|_r = 0, \tau_n|_r = 0. \quad (5)$$

Выводы

Вначале рассмотрим численное исследование относительно $nk = 2, 3, 4$ и при $slutoch = 10$ и 20 , пластины со сложной областью приведены выше с вырезом, когда радиус $r=0,1$. Результаты исследования приводится в виде графиков на рис. 1 и 2, соответственно.

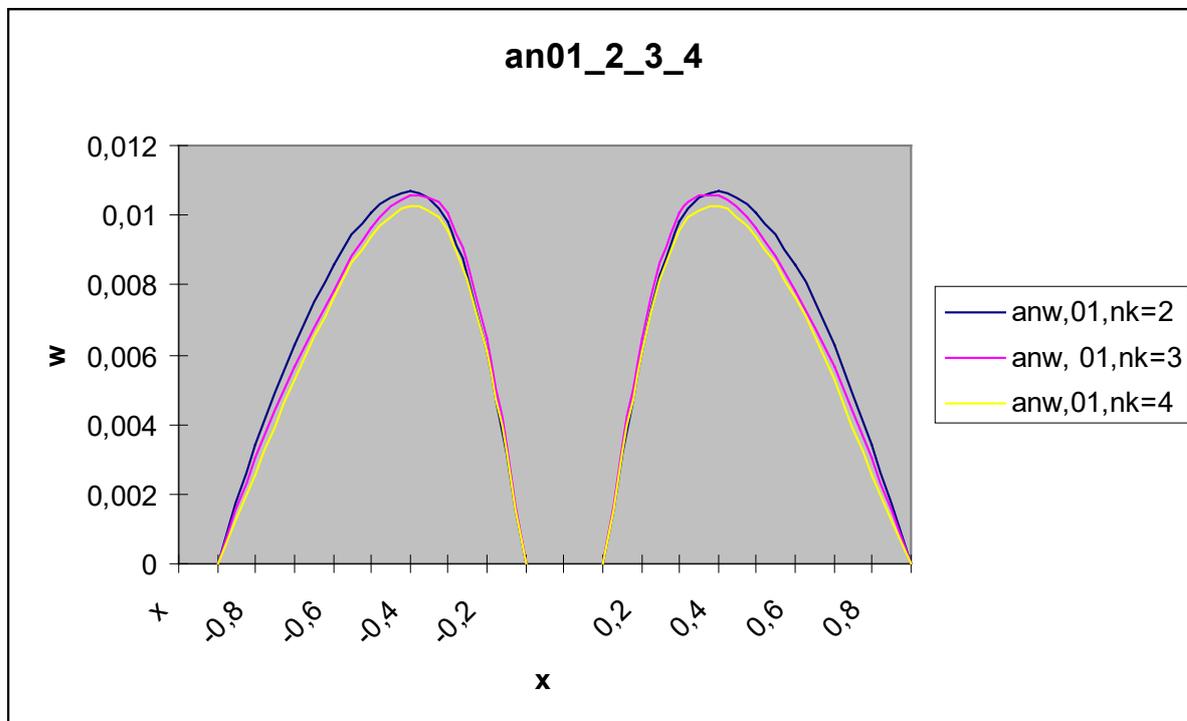


Рис. 1. График изменения перемещения w по сечению OX при $nk = 2, 3, 4$, $slutoch = 20$.

Список литературы

1. Александров А.В, Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1990. 405с.

2. Амбарцумян С. А. Теория анизотропных пластин. - М: Наука, 1987.-360с.
3. Кабулов В.К. Алгоритмизация в механике сплошных сред. - Ташкент: Фан, 1979. - 391с.
4. Назиров Ш.А., Эшкароева Н.Г. Геометрик ночизик анизотроп эластик пластинканинг математик модели // Вопр. кибернетики: Сб. науч.тр. - Ташкент, ИК АН РУз, 1999.- вып. 158.- С. 44-51.
5. F.M. Nuraliev; N.G. Eshkoraeva; B.Sh. Aytmuratov. Calculation of orthotropic flexible plates with complex configuration. International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). 04-06 November 2020. Tashkent, Uzbekistan. DOI: 10.1109/ICISCT50599.2020.9351497.

Calculation of statics and dynamics of geometrically nonlinear flexible anisotropic plates with a complex shape

Professor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor F.M.Nuraliev¹
(SPIN code: 8518-9757),

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor N.G. Eshkaraeva²,
Docent, PhD in Technical Sciences Sh.Sh.Safarov³,

^{1,3}*Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi*
nuraliev2001@mail.ru

²Karshi State University, Karshi
1970narxol@gmail.com

The article deals with the calculation of problems of statics and dynamics of anisotropic flexible plates of complex configuration by the R-function method (RFM) applied by Academician VL Rvachev. The derivation of the equation of motion of a geometrically nonlinear anisotropic plate is based on the Lagrange principle in the case of statics and Hamilton-Ostrogradsky in the case of dynamics. Here, when constructing specific models, Cauchy's geometric relations and physical relations are used, in the inverse form of Hooke's law, as well as the law of displacement change - the Kirchhoff-Love hypothesis. In this case, systems of nonlinear differential equations in partial derivatives with natural initial-boundary conditions are obtained, i.e. with boundary conditions (statics) and initial conditions (dynamics). These equations are solved under the appropriate boundary conditions depending on the method of fixing the edges of the plate, i.e. hard-clamped edges, loose-supported edges, free edge, etc. Based on the proposed method, a computational algorithm for the linearization of nonlinear systems of differential equations has been developed, and here we present the simplest linearization method obtained using the method of successive approximations. For the calculation of anisotropic flexible plates of complex configuration, a computational algorithm is proposed using the Bubnov-Galerkin variational method and the structural method of R-functions.

Keywords: Ostrogradsky-Hamilton (Lagrange) variational principle, anisotropic plates, geometric nonlinearity, R-function method (RFM), Bubnov-Galerkin method, computational algorithm, linearization method (iteration), complex configurations