

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК [535.016+537.868.4]::53.06

МИКИТЧУК
ЕЛЕНА ПЕТРОВНА

**ФОТОАКУСТИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ
В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ
НА ОСНОВЕ МОНОСЛОЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА И ЗОЛОТА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика

Минск, 2020

Работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель – **Козадаев Константин Владимирович**,
доктор физико-математических наук, доцент,
проректор по учебной работе и
интернационализации образования
Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты: **Маскевич Сергей Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
директор Учреждения образования
«Международный государственный экологический
институт имени А.Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

Ропот Петр Иосифович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заместитель заведующего центра
«Диагностические системы»
Государственного научного учреждения
«Институт физики имени Б. И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация – Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Защита состоится 12 июня 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407. Телефон учёного секретаря: +375 17 209-55-58.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «12» мая 2020 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций,
кандидат физико-математических наук, доцент



О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня ультразвуковые приборы широко применяются в различных системах от технической диагностики до биомедицинских исследований. В качестве излучателей и приемников ультразвука используют традиционные пьезоэлектрические электроакустические преобразователи, характеризующиеся большим напряжением питания, массивностью, высокой чувствительностью к электромагнитным помехам, относительно узкой полосой частот. Перспективным направлением для технических приложений является развитие фотоакустических методов приема и генерации ультразвука. Фотоакустические приемники с резонатором на торце оптического волокна обладают шириной полосы рабочих частот на уровне лучших образцов аналогичных пьезоэлектрических устройств, а по компактности и чувствительности превосходят их. Но, если методы приема акустических сигналов волоконно-оптическими фотоакустическими устройствами считаются достаточно развитыми, то проблема генерации широкополосного ультразвука с помощью компактных устройств решена не в полной мере.

Актуальной задачей, как в практическом, так и в теоретическом плане, является разработка миниатюрных волоконно-оптических фотоакустических излучателей на основе наноструктур. Как показывают исследования, такие устройства позволят существенно расширить полосу рабочих частот, уменьшить размеры и массу, реализовать гальваническую развязку, то есть не только устранить ряд ограничений традиционных источников, но и обеспечить работу в новых сложных условиях эксплуатации: мощное СВЧ-излучение, радиация, высокая температура. Принцип работы такого преобразователя заключается в том, что модулированное лазерное излучение поглощается в монослое наночастиц (НЧ), нанесенном на торец оптического волокна, что вызывает модулированное изменение их размеров и приводит к генерации акустических колебаний.

Основные трудности при создании волоконно-оптических фотоакустических преобразователей обусловлены отсутствием единых подходов к описанию физических механизмов преобразования модулированного по интенсивности оптического сигнала в акустические колебания. В литературе не приводятся связи параметров наноструктур и характеристик фотоакустических преобразователей на их основе. Формирование экспериментальных образцов в процессе поиска оптимальной наноструктуры для таких преобразователей, в отличие от компьютерного моделирования, является затратным и продолжительным процессом. В связи с этим, установление взаимосвязи параметров наноструктур в виде монослоя металлических наночастиц на оптически прозрачных подложках с выходными характеристиками волоконно-оптического фотоакустического преобразователя на их основе представляется весьма актуальным.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. «6. Электроника и фотоника», подпункт «6.6 разработка новых оптических материалов для лазеров, оптических приборов, дисплеев и другого, включая нано- и метаматериалы, фотонные и нелинейные кристаллы, жидкокристаллические материалы, полупроводниковые гетероструктуры, оптическую керамику» (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190), а также соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг.: «3. Промышленные и строительные технологии и производство: новые многофункциональные материалы, специальные материалы с заданными свойствами», «6. Био- и наноиндустрия: нанотехнологии» (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 № 166).

Диссертация выполнялась в рамках заданий 2.5.02 «Изучение процессов генерации многокомпонентных потоков реакционных частиц методами электронно-лучевого испарения или диспергирования и их плазменной активации с целью управления структурой и свойствами осаждаемых нанокompозитных слоев», 2.5.03 «Формирование мелкодисперсной конденсированной фазы металлов при воздействии на них высокоинтенсивных импульсов лазерного излучения различной длительностью», 2.5.06.1 «Изучение процессов генерации двухфазных плазменных потоков при воздействии наносекундных лазерных импульсов на благородные металлы с целью управления структурой и свойствами осажденных наноструктур» ГПНИ «Конвергенция» (2011–2015 гг.), задания 2.3.08.2 «Разработка методов формирования и модификации наноструктурированных многокомпонентных металлполимерных нанокompозитов лазерными потоками в атмосфере воздуха для использования в оптике и медицине» ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» (2011–2015 гг.), грантов Министерства образования РБ «Разработка элементной базы СВЧ диапазона на основе лазерных и наноразмерных структур» (№ 20120927, 2011–2012 гг.) и «Исследование динамики генерации лазерного диода в режиме оптической синхронизации с помощью модели эквивалентных электрических цепей» (№ 20131059, 2013 г.), международного гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований «Исследование двумерных плазмонных наноструктур для фотоакустических преобразователей» № Ф19PM-006 (№ 20191814, 2019–2021 гг.).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является установление взаимосвязи физических параметров наноструктур в виде монослоя металлических наночастиц

(материал, форма, радиус наночастиц, плотность заполнения подложки ими) на оптически прозрачных подложках с выходными характеристиками волоконно-оптического фотоакустического преобразователя на их основе. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать методику расчета оптико-акустических характеристик фотоакустических преобразователей с монослоем металлических наночастиц на оптически прозрачных подложках, учитывающую оптические, термофизические и механические свойства наноструктуры;

– определить условия, обеспечивающие наибольшую ширину полосы рабочих частот и энергетическую эффективность преобразования модулированного оптического сигнала в акустический в монослое металлических наночастиц на торце оптического волокна в различных окружающих средах;

– создать макет волоконно-оптического фотоакустического преобразователя на основе наноструктур и экспериментально исследовать его основные параметры и характеристики для подтверждения результатов теоретического исследования.

Объектом исследования диссертационной работы являются наноструктуры в виде монослоя металлических наночастиц на оптически прозрачных подложках.

Предметом исследования являются оптические, термофизические и акустические свойства таких наноструктур.

Научная новизна

1. Впервые проведено комплексное моделирование процессов в волоконно-оптическом фотоакустическом преобразователе, учитывающее оптические, термофизические и механические (акустические) свойства наноструктур в виде монослоя металлических наночастиц (Ag, Au) с радиусами 10–50 нм в различных окружающих средах на торце оптического волокна.

2. Установлены физические механизмы, определяющие связь параметров наноструктуры с выходными характеристиками волоконно-оптического фотоакустического преобразователя на ее основе, в результате чего найдены радиусы наночастиц Au и Ag, а также плотности заполнения ими торца оптического волокна для различных окружающих сред, обеспечивающие поглощение свыше 50% мощности оптического излучения.

3. Показано, что при подаче модулированного оптического сигнала мощностью 50 мВт спектральных диапазонов 405–450 нм и 510–532 нм в оптическое волокно с нанесенным на торец поглощающим монослоем наночастиц Ag и Au с рассчитанными значениями размеров и плотности заполнения подложки, обеспечивается генерация акустических колебаний с амплитудой давления до 6 МПа и частотой до 41 МГц и 37 МГц в воздухе (до 26 и 18 МГц в воде) соответственно.

4. Разработан новый метод одновременного измерения энергетической эффективности преобразования и частотной характеристики энергетического отклика волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с монослоем металлических НЧ, заключающийся в использовании математической обработки данных двух каналов, предназначенных для измерения параметров акустического и оптического сигналов. На основе данного метода создана двухканальная экспериментальная установка.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика расчета оптико-акустических характеристик (положение, ширина спектрального пика, поглощенная мощность, длительность процесса теплопередачи) волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с монослоем металлических наночастиц, основанная на последовательных вычислениях с отдельным описанием электромагнитных, термодинамических и механических процессов.

2. Анализ зависимостей поглощенной мощности, положения и ширины спектрального пика поглощения, длительности процессов теплопередачи, ширины полосы рабочих частот от радиуса наночастиц и плотности заполнения подложки ими, позволяет определить значения параметров слоя наночастиц Ag и Au, обеспечивающие рабочую полосу частот фотоакустического преобразователя до 41 и 37 МГц соответственно.

3. Для фотоакустического преобразования в монослое наночастиц Ag и Au на торце оптического волокна не требуется точного совпадения длины волны лазерного излучения и спектрального положения пика поглощения, при этом быстродействие определяется материалом и размером наночастиц, плотностью заполнения поверхности и поглощенной оптической мощностью.

4. Коэффициент обратного отражения модулированного по интенсивности лазерного излучения от монослоя наночастиц Ag и Au в составе фотоакустического преобразователя в оптическое волокно может достигать величины свыше 0,5, вследствие чего при построении фотоакустических генераторов необходимо обеспечение оптической развязки с лазерным источником.

Личный вклад соискателя

Представленные в диссертационной работе результаты получены лично соискателем и проанализированы совместно с научным руководителем К. В. Козадаевым. Научный руководитель сформулировал тематику и направление исследований. В. К. Гончаров принимал участие в обсуждении практических результатов. М. В. Пузырев оказывал помощь в синтезе наночастиц на торце оптического волокна. Остальные соавторы опубликованных работ участвовали в подготовке и проведении отдельных вспомогательных экспериментов.

Апробация диссертации и информация об использовании результатов

Основные результаты диссертационной работы представлены в 26 докладах на 18 международных научных и научно-технических конференциях и семинарах: Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания» (Могилев, 2013); International conference «Nanomaterials: applications and properties» (Lviv, Ukraine, 2014); X Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Минск, 2015); III Белорусско-Китайский молодежный инновационный форум «Новые горизонты 2016» (Минск, 2016); X Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2017); IV Белорусско-Китайский молодежный инновационный форум «Новые горизонты 2017» (Минск, 2017); XI Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Минск, 2017); Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере» (Минск, 2017); 5th Int. School and Conf. on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2018» (Saint Petersburg, 2018); 26th Int. Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (Minsk, 2018); XII Belarusian-Serbian symposium «Physics and diagnostics of laboratory and astrophysical plasmas» (Belgrade, Serbia, 2018); 9th International conference «Plasma physics and plasma technology» (Minsk, 2018); VIII Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, 2018); XI Конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (Москва, 2018); 19th Lithuania-Belarus Workshop «Advanced Microwave Devices and Systems» (Vilnius, Lithuania, 2018); 62th International conference for Students of Physics and Natural Science «Open Readings 2019» (Vilnius, Lithuania, 2019); V Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2019); XII Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Минск, 2019); и на 4 республиканских научных и научно-технических конференциях: 67-я Научная конференция студентов и аспирантов БГУ (Минск, 2010); 68-я Научная конференция студентов и аспирантов БГУ (Минск, 2011); Республиканская научная конференция студентов и аспирантов Республики Беларусь «НИРС–2011» (Минск, 2011); Республиканская научно-техническая конференция «Информационные технологии и системы: проблемы, методы, решения» (Минск, 2017).

Результаты диссертационной работы внедрены в процесс производства учебных лабораторных комплексов с цифровой обработкой и представлением результатов в РУП УНПЦ «Технолаб» и в учебный процесс на кафедре микро- и наноэлектроники БГУИР.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 36 научных работах, в том числе: 7 статей в научных изданиях, соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 4,07 авторских листа), 3 статьи в других научных изданиях, 21 статья в сборниках материалов научных конференций и 5 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка, приложения. Объем диссертации составляет 155 страниц, включая 88 рисунков на 43 страницах, 2 таблицы на 2 страницах, 2 приложения на 15 страницах и библиографический список, состоящий из 227 наименований на 18 страницах, включая список публикаций соискателя из 36 наименований на 5 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассмотрено современное состояние и тенденции развития волоконно-оптических устройств для генерации и приема ультразвука. Проведен анализ использования и методов моделирования волоконно-оптических фотоакустических преобразователей для систем технической и биомедицинской диагностики.

Существует необходимость в гибких и малых по размерам компонентах ультразвуковых систем технической и биомедицинской диагностики, к которым зачастую выдвигаются требования работы в сложных условиях эксплуатации: мощное СВЧ-излучение, радиация, высокая температура. Фотоакустические передающие и приемные устройства построены на принципе использования параметрического отклика структур, например, поглощение модулированного оптического излучения из-за эффекта теплового расширения вызывает циклы деформации поглощающего материала, порождающие акустические колебания.

Использование монослоя наночастиц благородных металлов на торце оптического волокна в качестве высокоэффективного поглотителя на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) позволяет создать ультразвуковой излучатель, в котором сочетаются уникальные свойства оптического волокна и наночастиц: компактный размер и малый вес (сотни микрон и доли грамма), высокая устойчивость к электромагнитным помехам, диэлектрическое исполнение, механическая гибкость, широкая полоса рабочих частот, высокая температурная и химическая стойкость. Созданные волоконно-оптические приемники ультразвука сравнимы или превосходят традиционные пьезоэлектрические приборы. Трудности

возникают при создании устройств для генерации ультразвука с частотами свыше нескольких мегагерц с источников с размерами менее 200 мкм.

Для работы волоконно-оптического фотоакустического преобразователя в широкой полосе частот и с высокой энергетической эффективностью преобразования модулированного оптического излучения в ультразвуковые колебания необходим тщательный подбор параметров поглощающего монослоя металлических НЧ. Однако сегодня отсутствует единая теоретическая база о методах увеличения рабочей полосы частот и энергетической эффективности фотоакустического преобразования. Существующее многообразие типов монослоев НЧ настолько велико, что проведение измерений всех возможных комбинаций параметров и выходных характеристик затруднено. Поэтому очень важна разработка и построение методики расчета оптико-акустических характеристик исследуемой наноструктуры в составе фотоакустического преобразователя.

Исходя из различных временных масштабов физических процессов в фотоакустическом преобразователе в данной главе обосновывается возможность применения последовательной методики расчета, в которой на каждом этапе можно использовать различные входные данные, а также промежуточный вывод данных моделирования. Методика расчета оптико-акустических свойств наноструктур фотоакустических преобразователей построена с использованием моделей, реализованных в программном пакете CST Microwave Studio. К достоинствам последнего следует отнести то, что он адаптирован к разномасштабным задачам, позволяет проводить высокоточные электромагнитные расчеты, оптимизирован для учета электромагнитного нагрева и возникающих при этом деформаций, позволяет проводить развертку параметров моделирования. В конце главы на основе литературного обзора формулируется цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена построению методики расчета оптико-акустических характеристик наноструктуры в составе фотоакустического преобразователя, учитывающей электромагнитные, тепловые и механические свойства, а также определению границ применимости моделей и верификации.

Методика расчета оптико-акустических характеристик наноструктуры включает в себя последовательное использование вычислительных блоков, связанных через рассчитываемые параметры, что реализуется без использования систем связанных уравнений. Такой подход применим к описанию свойств наноструктур в составе фотоакустического преобразователя в силу того, что процессы в последнем характеризуются различными, отличающимися более чем на порядок, масштабами времени: электронное поглощение (10^{-15} с); электрон-фононная термализация ($1,7 \cdot 10^{-12}$ с); диффузия тепла и механическое расширение (10^{-9} с). Для корректного решения задачи по описанию комплекса свойств фотоакустического преобразователя на основе оптоволокна с монослоем

металлических НЧ и разбиением ее на отдельные вычислительные блоки, в главе обосновывается правомерность использования приближения бесконечной периодической плоской структуры и пренебрежения механическим изменением размеров при описании электромагнитных свойств.

На рисунке 1 представлена блок-схема методики расчета оптико-акустических характеристик волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с наноструктурой в виде монослоя НЧ на торце оптического волокна в окружающей среде. В методике используются однонаправленные расчеты и реализованы последовательные вычислительные блоки, связанные через рассчитываемые характеристики. Общими для всех вычислительных блоков входными данными являются размер, форма и материал НЧ, плотность заполнения подложки ими, материалы подложки и окружающей среды.

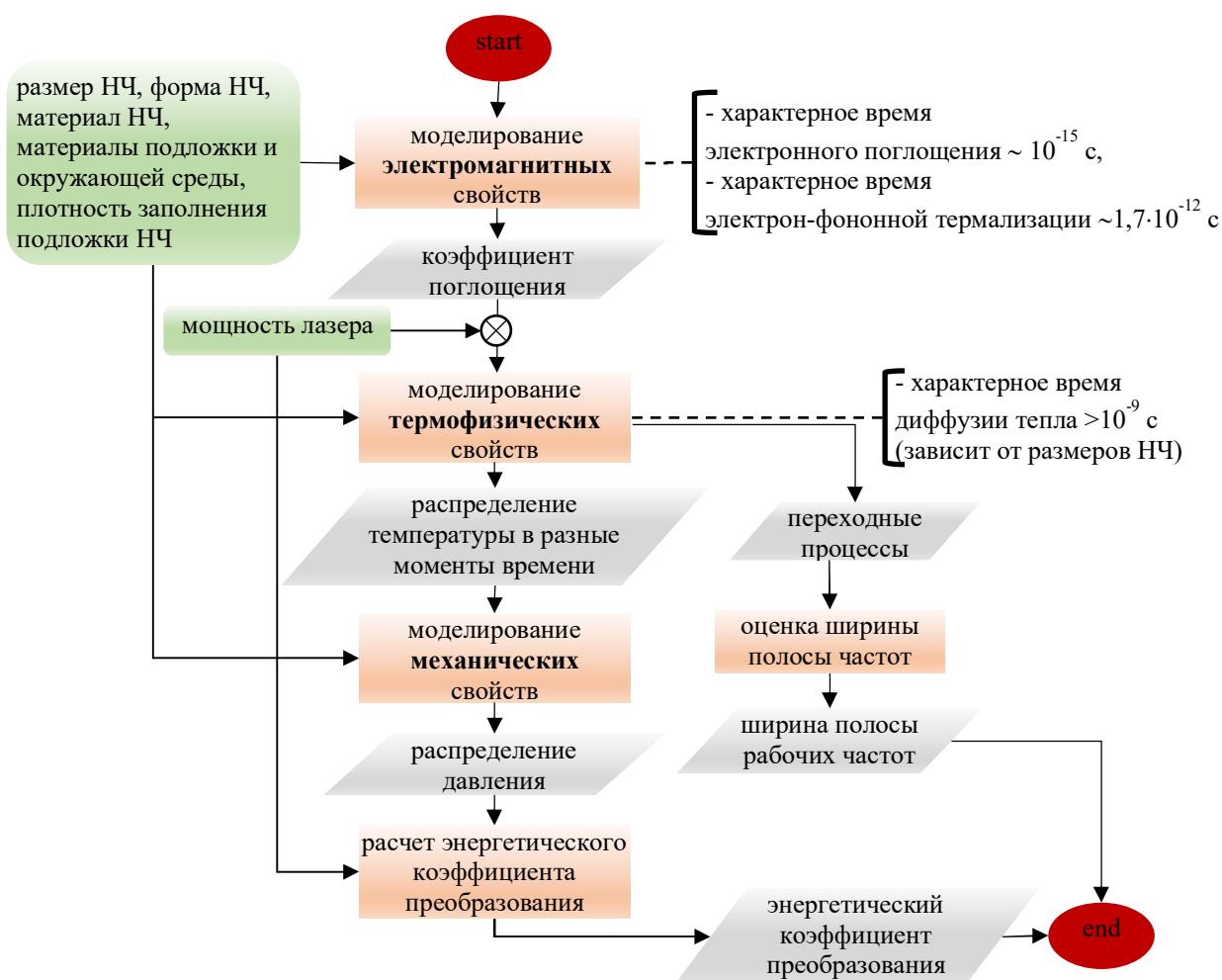


Рисунок 1. – Блок-схема методики расчета оптико-акустических характеристик волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с наноструктурой в виде монослоя НЧ на торце оптического волокна

При исследовании электромагнитных свойств наноструктур использовались результаты расчета характеристик электромагнитного поля на основе матриц S -параметров [3], причем НЧ располагаются на границе раздела соприкасающихся

параллелепипедов с окружающей средой и подложкой, основанием касаясь подложки. При моделировании тепловых свойств учитывалась объемная доля НЧ на торце оптического волокна (с длиной отрезка в несколько сантиметров) составляющая $10^{-12} - 10^{-13}$, что позволило считать оптическое волокно и окружающую среду большими тепловыми резервуарами. Рисунок 2 демонстрирует последовательность схем электромагнитного и теплового моделирования наноструктур в виде монослоя металлических наночастиц на торце оптического волокна. При моделировании электромагнитных свойств элементарная ячейка наноструктуры строится из четырех соприкасающихся параллелепипедов, два из которых состоят из материала подложки, а остальные содержат окружающую среду, что связано с лучшей сходимостью результатов моделирования.

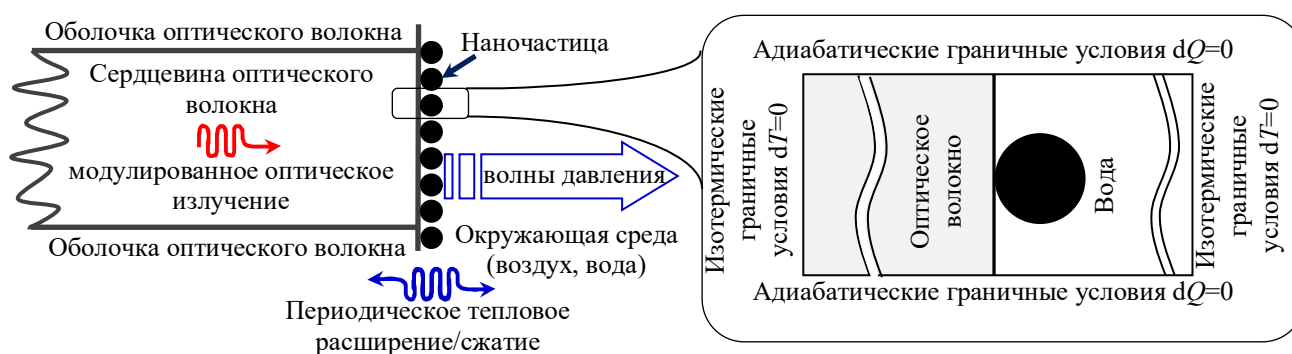


Рисунок 2. – Последовательность схем электромагнитного и теплового моделирования наноструктур в виде монослоя металлических НЧ на торце оптического волокна [7]

В случае решения задач теплопереноса в плоскостях, параллельных торцу оптического волокна, на удалении более 5 – 10 диаметров НЧ принимались изотермические граничные условия. Между НЧ вблизи оси оптического волокна отсутствует значимый теплообмен, поэтому в плоскости наноструктуры между НЧ применялись адиабатические граничные условия. При механическом моделировании наноструктуры в составе фотоакустического преобразователя задаются механические параметры окружающих сред, устанавливается неподвижная плоскость, параллельная торцу оптического волокна, а также распределения температуры [7].

Верификация результатов моделирования электромагнитных свойств с экспериментальными данными других авторов показала, что спектральное положение пика ППР в оптическом спектре может отклоняться от экспериментальных данных до 5%. Ширина оптического спектра по уровню 0,9 может оказаться занижена на величину до 30% относительно данных эксперимента, что связано с технологическими разбросами изготовления наноструктуры. В силу последнего, созданную методику в части описания спектральной ширины пика ППР можно считать моделью наихудшего случая по сравнению с экспериментом.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния материала, размеров и плотности заполнения подложки, формы НЧ, а также показателей

преломления подложки и окружающей среды на оптико-акустические характеристики наноструктуры в составе волоконно-оптического фотоакустического преобразователя. Здесь же рассчитываются диапазоны параметров, обеспечивающих поглощение более 50 % мощности оптического излучения, рассматриваются значения коэффициента обратного отражения от наноструктуры в оптическое волокно, а также оценивается величина мощности тепловыделения в наноструктуре.

Выбор металлов Au и Ag в качестве материалов НЧ связан с тем, что они наиболее устойчивы ко внешним воздействиям, а также с тем, что интенсивный максимум пика ППР для них лежит в видимом диапазоне длин волн, где работают оптические волокна. В работе не рассматриваются малые НЧ с радиусом до 5 нм, для которых некорректно использование понятия диэлектрической проницаемости.

На рисунке 3 приведена зависимость величины коэффициента поглощения наноструктуры (потерь, обусловленных тепловой диссипацией энергии падающего оптического излучения) в максимуме пика ППР от плотности заполнения подложки и радиуса сферических НЧ. Видно, что во всем исследуемом диапазоне при увеличении радиуса НЧ и плотности заполнения подложки НЧ наблюдается увеличение коэффициента поглощения в максимуме пика ППР от 0,30 до 0,65 (излучение падает со стороны НЧ) и от 0,40 до 0,65 (излучение падает со стороны подложки).

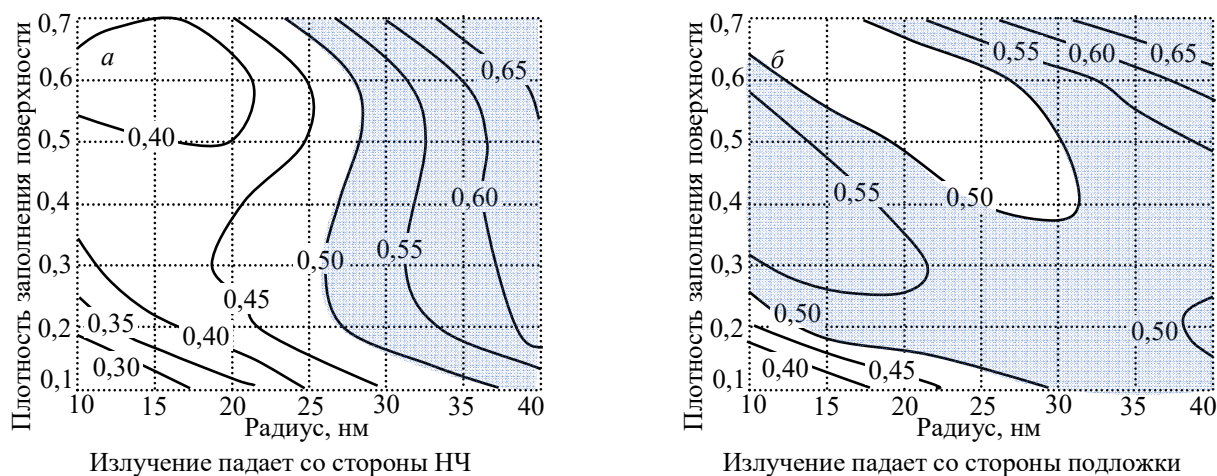


Рисунок 3. – Зависимость величины коэффициента поглощения в максимуме пика ППР от плотности заполнения подложки и радиуса НЧ для наноструктуры в виде монослоя сферических НЧ Ag

Для практических применений с целью обеспечения наибольшей величины поглощенной мощности оптического излучения (мощности тепловыделения в наноструктуре), необходимо не только достижение высокого коэффициента поглощения в пике ППР (например, свыше 50%), но и коммерческая доступность лазеров для генерации модулированного оптического излучения в требуемом диапазоне длин волн, а также возможность мультиплексирования лазеров по длине волны для увеличения интенсивности оптического сигнала (ширина пика ППР по

уровню 0,9 больше 25 нм) [2]. Пересечения множеств параметров наноструктур, для которых выполняются указанные условия, позволяют выделить области значений радиуса НЧ и плотности заполнения ими подложки (например, рисунок 3, заливка), используемые для дальнейшего расчета мощности электромагнитного нагрева наноструктуры (мощности тепловыделения). В ходе выполнения работы использовались следующие типичные параметры лазерных диодов прямой генерации: длины волн 520 нм и 445 нм и мощности 120 мВт и 1800 мВт соответственно [4]. Показано, что в случае помещения наноструктуры с НЧ Au в воду, можно достичь мощность тепловыделения более 60 мВт, в случае аналогичной структуры, но с НЧ Ag – более 400 мВт.

На рисунке 4 представлена зависимость максимальной величины коэффициента отражения от плотности заполнения подложки и радиуса НЧ для структур в виде монослоя сферических НЧ Ag на торце оптического волокна в воздухе. Независимо от того, с какой стороны падает излучение, изменение плотности заполнения подложки НЧ в диапазоне 10 – 70 % оказывает более существенное влияние на оптические свойства отражения, чем изменение радиуса НЧ в моделируемом диапазоне. При создании фотоакустических преобразователей важно учитывать величину обратного отражения от наноструктуры, которая может превышать 0,5, так как отражение лазерного излучения обратно в резонатор лазера может привести к срыву генерации в нем.

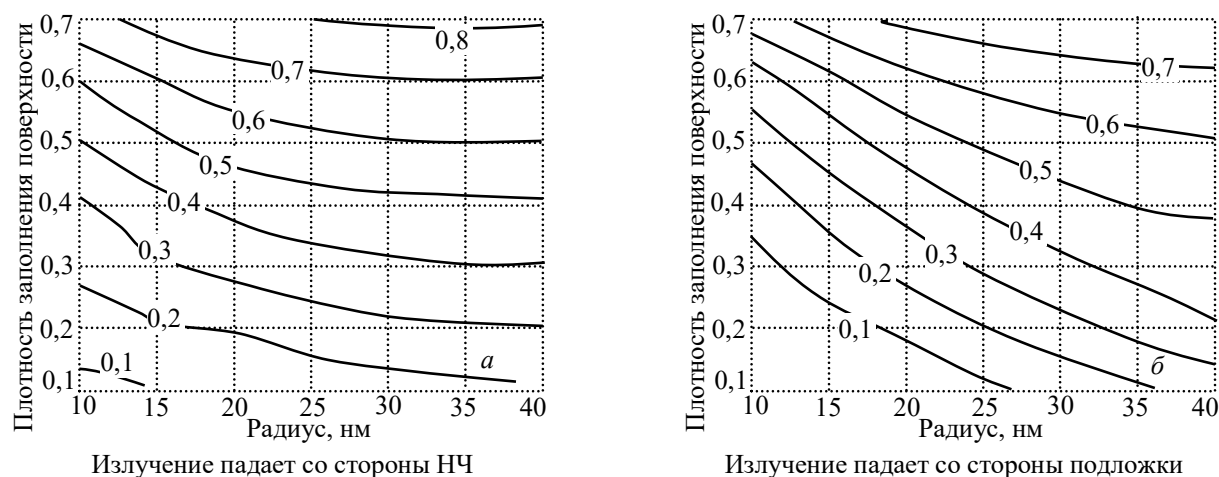
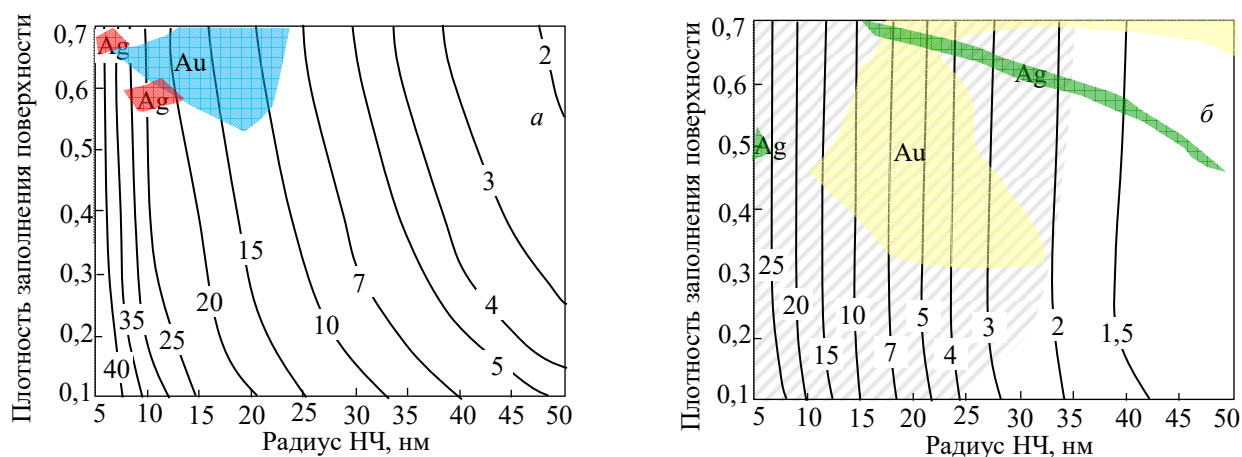


Рисунок 4. – Зависимости величины отражения в максимуме пика ППР от плотности заполнения подложки и радиуса НЧ для наноструктуры в виде монослоя сферических НЧ Ag на торце оптического волокна в воздухе

В четвертой главе рассмотрены результаты теоретического исследования тепловых и механических свойств наноструктуры, в частности, ширины полосы рабочих частот, а также оценена величина давления на выходе фотоакустического преобразователя. Приведены данные экспериментального исследования наноструктур и выходных характеристик макета волоконно-

оптического фотоакустического преобразователя. В результате моделирования электромагнитного нагрева НЧ в составе фотоакустического преобразователя установлено, что независимо от того, находится ли система точно в пике ППР или нет, имеет место практически однородное распределение мощности тепловыделения в НЧ. Данные исследования подтверждают правомерность допущения однородности тепловыделения при моделировании в рамках разработанной методики расчета для соответствующих наноструктур.

На рисунке 5 представлены результаты исследования оценки ширины полосы рабочих частот (в МГц) по уровню минус 3 дБ для фотоакустического преобразователя на основе наноструктур в виде монослоя сферических НЧ на торце оптического волокна в воздухе и воде в зависимости от плотности заполнения подложки и радиуса НЧ. Видно, что при постоянной плотности заполнения подложки наночастицами, быстродействие наноструктур уменьшается при увеличении радиуса НЧ.



сплошной заливкой показаны области поглощения свыше 50% модулированного оптического излучения, диагональная заливка – область параметров, где отсутствуют термофизические ограничения в воде

Рисунок 5. – Оценка ширины полосы рабочих частот в МГц по уровню минус 3 дБ для фотоакустического преобразователя на основе наноструктур в виде монослоя сферических НЧ на торце оптического волокна в воздухе (а) и воде (б) в зависимости от плотности заполнения подложки и радиуса НЧ [2, 4]

Наноструктуры с НЧ Au в воздухе имеют ширину полосы рабочих частот 8 – 37 МГц. Полоса частот для таких структур в воде с учетом термофизических ограничений составляет 2 – 18 МГц. Для наноструктур с НЧ Ag в воздухе ширина полосы рабочих частот лежит в диапазоне от 19 до 41 МГц, для случая использования таких структур в воде максимальная ширина полосы частот по уровню минус 3 дБ оказывается в диапазоне от 2 до 26 МГц (в небольших областях параметров наноструктур возможны термофизические ограничения).

Из анализа распределений давления в пространстве и времени установлено, что для наноструктуры в воде с радиусом НЧ Ag 30 нм и плотностью заполнения подложки 60 % эффективность фотоакустического преобразования в непосредственной близости от НЧ достигает величины $2,9 \cdot 10^{-1}$. Данная величина является оценкой для идеального случая, так как при удалении от фотоакустического преобразователя имеет место рассеяние акустических волн. В результате исследования с помощью разработанной методики установлено, что мощность акустического сигнала, распространяющегося от торца оптического волокна, может снижаться в $10^1 - 10^3$ раз при удалении от излучателя на расстояния до 2 мм, что согласуется с экспериментальными данными.

Для подтверждения основных закономерностей, полученных в результате теоретического исследования оптико-акустических характеристик устройств, созданы макеты волоконно-оптических фотоакустических преобразователей, в которых НЧ на торец оптического волокна нанесены методом атмосферного лазерного осаждения [5]. По данным растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии установлено: состав НЧ – Ag; плотность заполнения подложки – 3,8 %; средний радиус – 35 нм; гамма-распределение НЧ по размерам со среднеквадратичным разбросом 12 нм.

На рисунке 6 представлена схема установки для исследования характеристик волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с металлическими НЧ на торце оптического волокна, погруженного в жидкость [6].

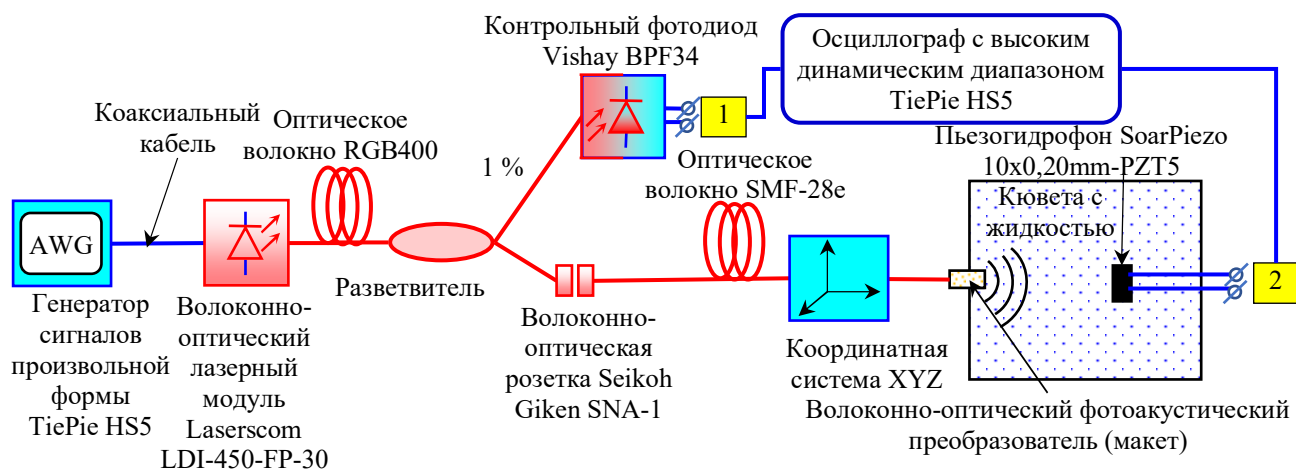


Рисунок 6. – Схема установки для исследования характеристик волоконно-оптического фотоакустического преобразователя с металлическими наночастицами Ag на торце оптического волокна, погруженного в жидкость, где 1, 2 – порты осциллографа [6]

От цифрового генератора сигналов произвольной формы в составе измерительного комплекса осциллограф-генератор подается зондирующий импульсный сигнал на лазерный диод с волоконно-оптическим выводом. Часть мощности оптического сигнала (около 1%) волоконно-оптическим разветвителем

направляется на контрольный фотодиод и регистрируется осциллографом с высоким динамическим диапазоном. Другая часть мощности поступает в отрезок оптического волокна, на поверхности которого сформированы исследуемые наноструктуры. Оптическое волокно с фотоакустическим преобразователем на торце закреплено в 3-х координатном юстировочном устройстве, которое используется для позиционирования последнего параллельно поверхности чувствительной площадки пьезогидрофона. Применение волоконно-оптического канала с высокоскоростным фотодиодом, наряду с измерением спектральной плотности мощности сигнала с гидрофона, позволяет одновременно определять энергетическую эффективность преобразования и измерять частотную характеристику энергетического отклика фотоакустического преобразователя.

На рисунке 7 изображена кривая спектральной плотности мощности выходного сигнала макета фотоакустического преобразователя в воде. Экспериментально установлен фотоакустический отклик в воде в частотном диапазоне 10 – 18 МГц при использовании узкополосного пьезоэлектрического приемника, когда в качестве источника оптического излучения использовался лазерный диод с длиной волны 450 нм и волоконно-оптическим выводом, применялись оптические импульсы с длительностью 50 нс, периодом 10 мс и с длительностями фронтов не более 12 нс. Указанные результаты соответствуют данным теоретического исследования. В рамках экспериментов по оценке выходных характеристик в сложных условиях эксплуатации макеты фотоакустических преобразователей были подвергнуты эквивалентной экспозиции ~ 800 Дж/см² на длине волны 450 нм. В результате таких исследований на поверхности устройств появились загрязнения и механические повреждения вне сердцевины оптического волокна, однако при этом искажения выходного сигнала не наблюдалось. Данные результаты могут служить в качестве демонстрации работоспособности таких преобразователей в составе экспресс-систем технической и биомедицинской диагностики [6, 30].

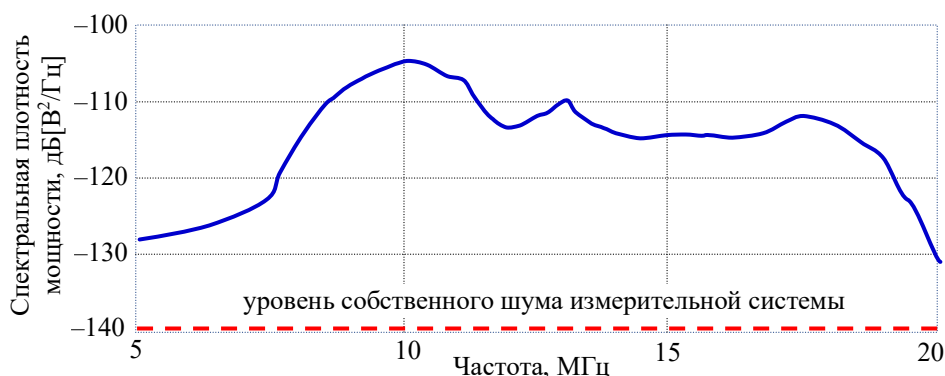


Рисунок 7. – Спектральная плотность мощности выходного сигнала макета фотоакустического преобразователя с монослоем наночастиц Ag в воде [6, 7]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Для описания фотоакустического волоконно-оптического преобразователя на основе монослоя металлических наночастиц обоснована возможность использования вычислительных блоков, связанных через рассчитываемые параметры, в результате чего предложена методика расчета оптико-акустических характеристик (положение, ширина спектрального пика и мощность поглощения, длительность процесса теплопередачи) такого типа устройств, базирующаяся на последовательных вычислениях с отдельным описанием электромагнитных, термофизических и механических процессов [2–4, 7, 9, 16, 18, 20, 21, 25–28, 33, 34, 36].

2. Анализ зависимостей поглощенной мощности, положения и ширины спектрального пика поглощения, длительности процессов теплопередачи, ширины полосы рабочих частот от радиуса наночастиц и плотности заполнения подложки ими, позволяет определить значения параметров слоя наночастиц Ag и Au, обеспечивающие рабочую полосу частот фотоакустического преобразователя до 41 и 37 МГц в воздухе соответственно [2–4, 7, 22–25, 28, 36].

3. Коэффициент обратного отражения модулированного по интенсивности лазерного излучения от монослоя наночастиц Ag и Au в составе фотоакустического преобразователя в оптическое волокно может достигать величины свыше 0,5, вследствие чего при построении фотоакустических генераторов необходимо обеспечить оптическую развязку с лазерным источником [2–4, 7, 9, 23].

4. Установлено, что изменение радиуса металлических НЧ в диапазоне 10–50 нм в составе волоконно-оптического фотоакустического преобразователя в большей степени влияет на максимальную температуру в наноструктуре, чем изменение плотности заполнения подложки в диапазоне 10–70 %, причем для наноструктур в воде при поглощенной мощности 50 мВт перегрев наступает при радиусах НЧ Au и Ag от 22 до 34 нм для различных плотностей заполнения [7, 22, 23, 25, 26, 28, 30, 33, 36].

5. Показано, что для фотоакустического преобразования в монослое наночастиц Ag и Au на торце оптического волокна не требуется точного совпадения длины волны лазерного излучения и спектрального положения пика поглощения, при этом его быстродействие определяется материалом, размерами наночастиц, плотностью заполнения поверхности ими и поглощенной оптической мощностью [2, 7, 28, 30].

6. Создана установка для измерения характеристик волоконно-оптических фотоакустических преобразователей с монослоем наночастиц, допускающая

модульное исполнение и содержащая опорный канал, построенный с использованием волоконно-оптического разветвителя и фотодиода, позволяющая одновременно определять энергетическую эффективность фотоакустического преобразования и измерять частотную характеристику энергетического отклика преобразователя в зависимости от параметров модуляции сигнала в оптическом волокне. С помощью созданной установки экспериментально измерен фотоакустический отклик в воде в частотном диапазоне 10–18 МГц, подтверждающий данные расчетов, полученных с помощью разработанной методики [1, 5–8, 10–15, 17, 19, 25, 29–32, 35].

7. Установлено, что загрязнения и механические воздействия вне сердцевины оптического волокна, а также часовое воздействие импульсного лазерного излучения с эквивалентной экспозицией ~ 800 Дж/см² на макет волоконно-оптического фотоакустического преобразователя, в котором НЧ Ag нанесены на торец оптического волокна методом атмосферного лазерного осаждения, не вызывают заметную деградацию наноструктуры, что позволяет использовать такие преобразователи неоднократно для систем технической диагностики и неразрушающего контроля высокого разрешения [5, 6, 29, 30].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенная методика расчета оптико-акустических характеристик волоконно-оптического фотоакустического преобразователя на основе монослоя металлических наночастиц на различных подложках для разных типов окружающей среды позволяет проводить численный анализ электромагнитных, термофизических и механических характеристик преобразователя. Рассчитанные зависимости выходных характеристик от параметров наноструктур в составе волоконно-оптических фотоакустических преобразователей позволят создать высокоэффективные миниатюрные источники ультразвука для современных и перспективных систем технической диагностики. Реализована установка для измерения характеристик фотоакустических преобразователей, допускающая модульное исполнение, которая позволяет одновременно определять энергетическую эффективность преобразования и измерять частотную характеристику энергетического отклика фотоакустического преобразователя в зависимости от параметров модуляции оптического сигнала для конкретных систем как технической, так и биомедицинской диагностики.

Практическая значимость полученных в диссертации результатов подтверждается актами внедрения в процесс производства учебных лабораторных комплексов с цифровой обработкой и представлением результатов в РУП УНПЦ «Технолаб» и в учебный процесс на кафедре микро- и нанoeлектроники БГУИР.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Мацкевич (Микитчук), Е. П. Особенности агрегации наночастиц серебра в коллоидных растворах, синтезированных боргидридным методом / Е. П. Мацкевич (Микитчук), С. Л. Прокопьев // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2012. – № 2. – С. 52–56.

2. Микитчук, Е. П. Моделирование оптических свойств поверхностных наноструктур для фотоакустических преобразователей / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 7. – С. 630–636.

3. Микитчук, Е. П. Сходимость результатов моделирования оптических свойств поверхностных наноструктур при использовании метода конечных интегралов / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. труд. / ред. : В. М. Самсонов, Н. Ю. Сдобняков. – Тверь, 2018. – Вып. 10. – С. 460–467.

4. Mikitchuk, A. P. Photoacoustic generation with surface noble metal nanostructures / A. P. Mikitchuk, K. V. Kozadaev // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52, № 14. – P. 1839–1842.

5. Synthesis, structural and spectral properties of surface noble metal nanostructures for fiber-optic photoacoustic generation / V. K. Goncharov, K. V. Kozadaev, A. P. Mikitchuk, M. V. Puzyrev // Semiconductors. – 2019. – Vol. 53, № 14. – P. 1950–1953.

6. Микитчук, Е. П. Характеристики волоконно-оптических фотоакустических преобразователей с монослоем металлических наночастиц для систем технической диагностики / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2020. – № 1. – С. 4–15.

7. Mikitchuk, A. Comprehensive theoretical study of optical, thermophysical and acoustic properties of surface nanostructures with metallic nanoparticles for fiber-optic photoacoustic ultrasound transducers / A. Mikitchuk, K. Kozadaev // Przegląd Elektrotechniczny. – 2020. – № 3. – P. 129–137.

Статьи в других научных изданиях

8. Микитчук, Е. П. Расчет концентрации наночастиц в коллоидном растворе / Е. П. Микитчук // Электроника инфо. – 2013. – № 3. – С. 27–29.

9. Микитчук, Е. П. Наночастицы серебра: основные свойства, применение / Е. П. Микитчук // Электроника инфо. – 2013. – № 3. – С. 36–42.

10. Атмосферное лазерное осаждение ГКР-активных коллоидов благородных металлов (Ag, Au, Pt) / В. К. Гончаров, К. В. Козадаев, К. А. Мельников, Е. П. Микитчук, А. Г. Новиков // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 5. – С. 1360–1364.

Материалы конференций

11. Микитчук, Е. П. Исследование неоднородности изображений в пространственной области / Е. П. Микитчук // Сборник работ 67-ой научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета, Минск, 17–20 мая 2010 г. : в 3 ч. / Белорус. гос. ун-т ; ред.: В. С. Повколас. – Минск, 2010. – Ч. 1. – С. 145–148.

12. Исследование поверхностного плазмонного резонанса в коллоидных растворах наночастиц золота и серебра / В. И. Шевцова, Е. П. Мацкевич (Микитчук), Е. П. Валькова, П. И. Гайдук // Сборник работ 68-ой научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета, Минск, 16–19 мая 2011 г. : в 3 ч. / Белорус. гос. ун-т ; ред.: В. С. Повколас. – Минск, 2011. – Ч. 1. – С. 216–220.

13. Микитчук, Е. П. Моделирование модуляционных характеристик инжекционных лазеров в режиме оптической синхронизации с использованием программного пакета VPI Photonics/ Е. П. Микитчук, А. А. Афоненко // Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 20–22 февраля 2013 / МГУ им. А.А. Кулешова ; редкол.: Т. Ю. Герасимова [и др.]. – Могилев, 2013. – С. 10–12.

14. Formation of Pt cone-shaped nanostructures by laser synthesis / K. V. Kozadaev, A. G. Novikau, A. P. Mikitchuk, A. N. Migutskiy // Nanomaterials: applications and properties: proc. of the Int. Conf., Ukraine, Lviv, 29 August 2014 / Sumy state univ. ; ed.: A. Pogrebnyak. – Art. № 01PISERE02.

15. Гончаров, В. К. Оценка параметров наночастиц благородных металлов по данным оптической спектроскопии / В. К. Гончаров, К. В. Козадаев, Е. П. Микитчук // Квантовая электроника: материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–13 ноября 2015 г. / РИВШ ; редкол.: М. М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2015. – С. 156.

16. Микитчук, Е. П. Управление оптическими свойствами поверхностных наноструктур серебра / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // Новые горизонты 2016: сборник материалов III Белор.-Китайск. молодежн. иннов. форума, Минск, 29–30 нояб. 2016 г. / БНТУ ; редкол.: А. Н. Стебурако [и др.]. – Минск, 2016. – С. 188–189.

17. Comprehensive optical diagnostics of laser-induced plasma objects / V. K. Goncharov, K. V. Kozadaev, A. P. Mikitchuk, A. G. Novikau // Journal of Physics: IX International conference on modern techniques of plasma diagnostics and their application. – 2016. – № 666. – P. 1–3.

18. Гончаров, В. К. Компьютерное моделирование оптических свойств пирамидальных наноструктур / В. К. Гончаров, К. В. Козадаев, Е. П. Микитчук // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы третьей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11–12 мая 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та ; редкол.: В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2017. – С. 167–169.

19. Микитчук, Е. П. Лазерный синтез наноструктурированных поглощающих сред для фотоакустических приборов / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // Новые горизонты – 2017: материалы IV Белор.-китайск. молод. иннов. форума, Минск, 2–3 ноября 2017 г. / БНТУ ; редкол.: А. И. Алдошин [и др.]. – Минск, 2017. – С. 90–92.

20. Гончаров, В. К. Влияние параметров дискретизации компьютерной модели поверхностных наноструктур серебра при моделировании их электромагнитных свойств / В. К. Гончаров, К. В. Козадаев, Е. П. Микитчук // Квантовая электроника : материалы XI Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 13–17 ноября 2017 г. / РИВШ ; редкол. : М. М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2017. – С. 210–211.

21. Микитчук, Е. П. Компьютерное моделирование оптических свойств поверхностных наноструктур с помощью матриц рассеяния для сенсорных применений / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // Информационные технологии и системы: проблемы, методы, решения (ИТС–2017) : материалы Респ. научн.-техн. конф., Минск, 23–24 ноября 2017 г. ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2018. – С. 82–85.

22. Mikitchuk, A. P. Surface metallic nanostructures for photoacoustic fiber-optic transducers / A. P. Mikitchuk, K. V. Kozadaev // Saint Petersburg OPEN 2018 : Proc. of 5th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, St. Petersburg, 2–5 April, 2018 / Academic University Publishing St. Petersburg ; ed. : Zh. I. Alferov [et al.]. – St. Petersburg, 2018. – P. 371–372.

23. Mikitchuk, A. P. Photoacoustic generation with surface noble metal nanostructures / A. P. Mikitchuk, K. V. Kozadaev // Nanostructures: Physics and Technology : Proc. of 26th International Symposium, Minsk, 18–22 June, 2018 / Academic Univ. Publishing St Petersburg ; ed. : R. Suris [et al.]. – Minsk, 2018. – P. 97–98.

24. Localized plasmon resonance in monolayers of spherical copper nanoparticles / V. K. Goncharov, K. V. Kozadaev, A. P. Mikitchuk, A. A. Harbatsevich, H. V. Harbatsevich // Physics and diagnostics of laboratory and astrophysical plasmas : Proc. of the XII Belarusian-Serbian symposium, Belgrade, Serbia, 27–31 August, 2018 / Belgrade univ. ; ed.: M. M. Kuraica [et al.]. – Belgrade, 2018. – P. 33–36.

25. Mikitchuk, A. P. Surface metallic nanostructures for photoacoustic fiber-optic transducers synthesized by laser plasma condensation / A. P. Mikitchuk, K. V. Kozadaev // Plasma physics and plasma technology : Proc. of IX Internat. Conf., Minsk, 17–21 September, 2018 ; ed.: N. V. Tarasenko [et al.]. – Minsk, 2018. – P. 378–380.

26. Гончаров, В. К. Моделирование свойств поверхностных наноструктур на торце оптического волокна для фотоакустической генерации ультразвука / В. К. Гончаров, К. В. Козадаев, Е. П. Микитчук // Актуальные проблемы физики твердого тела : материалы VIII Междунар. научн. конф., Минск, 24–28 сентября 2018 г. : в 3 т. / редкол.: Н. М. Олехнович [и др.]. – Минск, 2018. – Т. 3. – С. 73–75.

27. Гончаров, В. К. Моделирование плазмонных свойств поверхностных наноструктур металлов, синтезированных методом атмосферного лазерного осаждения / В. К. Гончаров, К. В. Козадаев, Е. П. Микитчук // Современные средства диагностики плазмы и их применение : материалы XI конф., Москва, 13–15 ноября 2018 г. / НИЯУ МИФИ ; редкол.: С.Г. Гаранин [и др.]. – Москва, 2018. – С. 16–19.

28. Микитчук, Е. П. Моделирование нестационарных температурных режимов для поверхностных наноструктур в составе комплексной модели фотоакустического преобразователя / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы пятой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16–17 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та ; редкол.: В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2019. – С. 184–186.

29. Наноструктуры на торце оптического волокна для фотоакустических преобразователей / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев, Л. А. Гаврик, Е. И. Гиршова, В. К. Гончаров, Д. В. Жигулин, И. А. Кашко, М. В. Пузырев // Квантовая электроника : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 ноября 2019 г. / РИВШ ; редкол. : М. М. Кугейко [и др.] . – Минск, 2019. – С. 161–163.

30. Микитчук, Е. П. Исследование выходного акустического сигнала макета волоконно-оптического фотоакустического преобразователя для систем технической диагностики и неразрушающего контроля / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // Квантовая электроника : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 ноября 2019 г. / РИВШ ; редкол. : М. М. Кугейко [и др.] . – Минск, 2019. – С. 164–166.

31. Properties of GaN optomechanical nanobeam cavity / K. M. Morozov, K. A. Ivanov, E. I. Girshova, A. S. Sokolovskii, A. P. Mikitchuk // Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – № 1410. – P. 1–3.

Тезисы докладов

32. Мацкевич (Микитчук), Е. П. Коллоидные растворы наночастиц серебра: формирование и исследование характеристик / Е. П. Мацкевич (Микитчук), П. И. Гайдук // Материалы Республиканской научной конференции студентов и аспирантов Республики Беларусь «НИРС–2011», Минск, 18 октября 2011 г. / Издательской центр БГУ ; редкол.: С. А. Абламейко [и др.]. – Минск, 2011. – С. 31.

33. Микитчук, Е. П. Моделирование оптических свойств монослоев наночастиц серебра на стеклянных подложках / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // XX Респ. конкурс научных работ студентов: сб. науч. ст. / М-во образ. Респ. Беларусь ; редкол.: А. Г. Захаров [и др.]. – Минск, 2014. – С. 32–33.

34. Микитчук, Е. П. Компьютерное моделирование оптических свойств поверхностных наноструктур в программном пакете CST Microwave Studio / Е. П. Микитчук, К. В. Козадаев // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере : тезисы докладов IX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 мая 2017 г. / ОИПИ НАН Беларуси : редкол.: М. Я. Ковалев [и др.]. – Минск, 2017. – С. 96–98.

35. Судникович, А. М. Сравнение и анализ методов обработки фотореалистичных изображений в учебном процессе / А. М. Судникович, Е. П. Микитчук // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации [Электронный ресурс]: электронный сборник статей I международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. / Полоцкий государственный университет. – Новополоцк, 2018. – С. 377–378. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

36. Mikitchuk, A. Thermophysical limitations for fiber-optic photoacoustic transducers based on nanostructures / A. Mikitchuk, K. Kozadaev // Open readings 2019 : book of abstracts 62th International conf., Vilnius, Lithuania, 19–22 March, 2019 / Vilnius University ; ed.: Skliutas [et al.]. – Vilnius, Lithuania, 2019. – P. 213.

РЭЗІЮМЭ

Мікітчук Алена Пятроўна
ФОТААКУСТЫЧНАЯ ГЕНЕРАЦЫЯ Ў
ВАЛАКОННА-АПТЫЧНЫМ ПЕРАЎТВАРАЛЬНІКУ
НА АСНОВЕ МОНАПЛАСТА НАНАЧАСЦІЦ СРЭБРА І ЗОЛАТА

Ключавыя словы: манапласт наначасціц, нанаструктура, аптычнае валакно, плазмонны рэзананс, фотаакустычны пераўтваральнік.

Мэта працы: усталяванне ўзаемасувязі параметраў нанаструктур у выглядзе манапласта металічных наначасціц на паверхні аптычна празрыстай падкладкі з выходнымі параметрамі валаконна-аптычнага фотаакустычнага пераўтваральніка на іх аснове.

Метады даследавання і скарыстаная апаратура: тэарэтычнае мадэляванне з дапамогай лікавай комплекснай мадэлі; эксперыментальнае вымярэнне водгуку макета фотаакустычнага пераўтваральніка з дапамогай стэнда, што змяшчае ацыллограф-генератар TiePie HS5, лазерны модуль Laserscom LDI-450-FP-30, фотадыёд Vishay BPF34, пьезагідрафон SoarPiezo 10x0.20mm-PZT5; даследаванне наначасціц на растравым электронным мікраскопе Hitachi S-4800; вывучэнне элементнага складу энэргадысперсійным спектрометры Quantex 200 з дэтэктарам Bruker SDD XFlash 5030.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: створаны комплексны метады вызначэння ўласцівасцяў валаконна-аптычных фотаакустычных пераўтваральнікаў з металічнымі наначасціцамі, які дазваляе ўсталяваць сувязь паміж параметрамі нанаструктуры з выходнымі характарыстыкамі фотаакустычнага пераўтваральніка. Прапанаваны метады вызначэння дыяпазонаў параметраў нанаструктуры на тарцы аптычнага валакна, якія забяспечваюць найвялікую працоўную поласу частотаў фотаакустычнага пераўтваральніка. Прапанаваны падыход да адначасовага вызначэння эфектыўнасці і частотнай характарыстыкі энэргетычнага водгуку пераўтваральніка ў залежнасці ад параметраў мадуляцыі аптычнага сігналу.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: створаны комплексны падыход да мадэлявання валаконна-аптычных фотаакустычных пераўтваральнікаў з металічнымі наначасціцамі дазваляе праводзіць лікавы аналіз электрамагнітных, цеплафізічных і механічных характарыстык усяго пераўтваральніка для сучасных і перспектыўных сістэм тэхнічнай дыягностыкі і неразбуральнага кантролю.

Галіна выкарыстання: сістэмы тэхнічнай дыягностыкі і неразбуральнага кантролю, сістэмы ультрагукавога кантролю ў складаных умовах (радыяцыя, высокая тэмпература).

РЕЗЮМЕ

Микитчук Елена Петровна

**ФОТОАКУСТИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ
НА ОСНОВЕ МОНОСЛОЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА И ЗОЛОТА**

Ключевые слова: монослой наночастиц, наноструктура, оптическое волокно, плазмонный резонанс, фотоакустический преобразователь.

Цель работы: установление взаимосвязи параметров наноструктур в виде монослоя металлических наночастиц на оптически прозрачных подложках с выходными характеристиками волоконно-оптического фотоакустического преобразователя на их основе.

Методы исследования и использованная аппаратура: теоретическое исследование с помощью комплексной методики расчета оптико-акустических свойств; экспериментальное измерение отклика макета фотоакустического преобразователя на основе установки, содержащей осциллограф-генератор TiePie HS5, лазерный модуль Laserscom LDI-450-FP-30, фотодиод Vishay BPF34, пьезогидрофон SoarPiezo 10x0.20mm-PZT5; исследование наночастиц на растровом электронном микроскопе Hitachi S-4800; изучение элементного состава наноструктуры на энергодисперсном спектрометре Quantex 200 с детектором Bruker SDD XFlash 5030.

Полученные результаты и их новизна: создан комплексный метод определения свойств волоконно-оптических фотоакустических преобразователей с металлическими наночастицами, позволяющий установить связь между параметрами наноструктуры с выходными характеристиками фотоакустического преобразователя. Предложен метод определения диапазонов параметров наноструктуры на торце оптического волокна, обеспечивающих наибольшую рабочую полосу частот фотоакустического преобразователя. Представлен подход к одновременному определению эффективности и частотной характеристики энергетического отклика преобразователя в зависимости от параметров модуляции оптического сигнала.

Рекомендации по использованию: созданная методика расчета оптико-акустических свойств волоконно-оптических фотоакустических преобразователей с металлическими наночастицами позволяет проводить численный анализ электромагнитных, термофизических и механических характеристик всего преобразователя для современных и перспективных систем технической диагностики и неразрушающего контроля.

Область применения: системы технической диагностики и неразрушающего контроля, системы ультразвукового контроля в сложных условиях (радиация, высокая температура).

SUMMARY

Alena P. Mikitchuk

PHOTOACOUSTIC GENERATION IN FIBER-OPTIC TRANSDUCER BASED ON SILVER AND GOLD NANOPARTICLE MONOLAYER

Keywords: monolayer of nanoparticles, nanostructure, optical fiber, plasmon resonance, photoacoustic transducer.

Research aim: to establish the relationship between parameters of nanostructures in the form of metal monolayer of nanoparticles on the optically transparent substrate with the output parameters of a fiber-optic photoacoustic transducer based on them.

Research methods and equipment: theoretical modelling using a numerical complex model; experimental measurement of the photoacoustic transducer response based on the setup containing a TiePie HS5 oscilloscope generator, Laserscom LDI-450-FP-30 laser module, Vishay BPF34 photodiode, SoarPiezo 10x0.20mm-PZT5 piezohydrophone; study of nanoparticles using Hitachi S-4800 scanning electron microscope; study of the elemental composition of the nanostructure using Quantex 200 energy dispersive spectrometer with Bruker SDD XFlash 5030 detector.

Obtained results and novelty: the complex method has been created for determining the properties of fiber-optic photoacoustic converters with metal nanoparticles, which allows to establish a relationship between the parameters of the nanostructure and the photoacoustic transducer output characteristics. A method is proposed for determining the ranges of the nanostructure parameters, it provides the largest working frequency band of the photoacoustic transducer. an approach to the simultaneous determination of the efficiency and frequency characteristics of the energy response of the converter depending on the modulation parameters of the optical signal in real time is proposed.

Application guidelines: the developed complex approach to modeling fiber-optic photoacoustic converters with metal nanoparticles allows a numerical analysis of the electromagnetic, thermophysical and mechanical characteristics of the entire converter for modern and perspective systems of technical diagnostics and non-destructive testing.

Application area: systems of technical diagnostics and non-destructive testing, systems of ultrasonic testing in difficult environment (radiation, high temperature).

