УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и цифровому развитию
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
д. ф.-м. н., профессор
А.А. Короновский

«18» 10 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Кучерявенко Анны Сергеевны «Теоретическое и экспериментальное исследование диэлектрических характеристик рассеивающих и труднодоступных сильно поглощающих сред в терагерцовом диапазоне», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертационной работы

Терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитного излучения обладает рядом преимуществ в медицинской диагностике. Однако биологические ткани содержат большое количество воды в своем составе, а их структурные неоднородности могут быть соизмеримы с длиной волны ТГц излучения, что делает такие среды одновременно сильно поглощающими и рассеивающими в ТГц диапазоне. Существующие подходы, описывающие ткани как однородные эффективные изотропные среды, не всегда применимы и не позволяют учитывать эффекты рассеяния. Кроме того, отсутствие коммерчески доступных ТГц эндоскопов существенно ограничивает экспериментальные исследования биологических тканей *in vivo*.

В связи с этим данная диссертационная работа, направленная на установление границ применимости теории эффективной среды и поиска новых подходов для описания ТГц диэлектрических характеристик биологических тканей, а также разработку методов ТГц эндоскопии, является крайне своевременной и востребованной.

Структура диссертационной работы и ее основные положения

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 151 странице, содержит 33 рисунка. Список используемой литературы включает 313 источника.

Материал диссертации изложен последовательно: от анализа современного состояния проблем ТГц биофотоники и теоретического обоснования процессов рассеяния в сильно поглощающих средах до разработки экспериментальных методов ТГц эндоскопии и создания тканеимитирующих фантомов.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен литературный обзор по теме исследования, приведены механизмы взаимодействия ТГц излучения с мягкими тканями, проведен анализ методов и моделей для описания их ТГц отклика. Описаны ограничения традиционных подходов, рассматривающих ткани как однородные среды и обоснована необходимость учета рассеяния на мезомасштабных неоднородностях. Отдельное внимание уделено анализу существующих типов ТГц волноводов (металлических, плазмонных, ступенчатых, антирезонансных и фотонно-кристаллических) с точки зрения их использования для ТГц эндоскопических систем и обоснован выбор профилированного сапфира в качестве материала для эндоскопии. Также рассмотрены методы преодоления дифракционного предела Аббе для повышения пространственного разрешения ТГц систем и вопросы создания фантомов биологических тканей.

Вторая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию эффектов рассеяния ТГц волн в системах, представленных непоглощающими сферическими рассеивателями в поглощающей матрице. Особую ценность представляет разработка новой математической модели эффективного коэффициента ослабления на основе модифицированной теории Лоренца-Ми для одиночной частицы в поглощающей среде и формализма теории переноса излучения, а также установление границ применимости теории эффективной среды ($d \leq 0{,}47\lambda$ и $f_v \leq 0{,}2$ с точностью до 6%). Автором разработаны и изготовлены оригинальные тканеимитирующие фантомы на основе желатиновой матрицы и микросфер SiO_2, экспериментальные исследования которых подтвердили адекватность предложенных теоретических моделей.

В третьей главе представлены разработанные методы ТГц эндоскопии для исследования оптических параметров труднодоступных поглощающих объектов. Описан метод восстановления комплексного показателя преломления на основе анализа резонансов Фабри-Перо, реализованный с помощью сапфирового антирезонансного волновода, выращенного методом EFG (edge-defined film-fed growth). Продемонстрирована работоспособность метода в средах с сильным ($\alpha \sim 100$ см$^{-1}$) и слабым ($\alpha \sim 10$ см$^{-1}$) поглощением. Дополнительно показано, что интеграция волновода с сапфировой иммерсионной линзой позволяет достичь сверхвысокого пространственного разрешения ($\approx 0{,}19\lambda$ и $\approx 0{,}2\lambda$).

Проведена экспериментальная апробация разработанных методов и устройств с использованием ТГц импульсной спектроскопии и спектроскопии на лампе обратной волны. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями и контрольными данными, что подтверждает высокую эффективность предложенных подходов для задач биомедицинской диагностики и неразрушающего контроля.

В ходе выполнения диссертационной работы соискателем был получен ряд **наиболее значимых научных результатов**:

Автором сформулирована и обоснована оригинальная математическая модель, описывающая диэлектрический отклик гетерогенных сильно поглощающих сред в ТГц диапазоне с учетом процессов рассеяния. На основе этой модели и комплекса

экспериментальных исследований установлены границы применимости теории эффективной среды: доказано, что при размерах рассеивателей $d \leq 0{,}47\lambda$ и их объемной доле $f_v \leq 0{,}2$ теория эффективной среды позволяет описыватьТГц диэлектрические характеристики гидратированных биологических тканей с погрешностью, не превышающей 6%.

Кроме того, автором изучен характер рассеяния ТГц излучения в оптически неоднородных поглощающих средах. Продемонстрировано, что, несмотря на выраженную анизотропию рассеяния на одиночных частицах (сопоставимых по размерам с неоднородностями биотканей), в масштабах всей среды вкладом рассеяния можно пренебречь ввиду доминирующего поглощения. Для проведения экспериментальных исследований соискателем создан оригинальный тканеимитирующий фантом, воспроизводящий структурно-оптические свойства биологических тканей в ТГц диапазоне, и проведены систематические измерения его оптических характеристик при варьировании размеров рассеивателей и их объёмной доли.

Автором также предложен и успешно апробирован новый метод ТГц эндоскопии на основе анализа резонансов Фабри-Перо. В отличие от существующих методов ТГц эндоскопии, предоставляющих только качественную информацию, этот метод обеспечивает количественное определение комплексного показателя преломления труднодоступных объектов. В качестве дальнейшего развития данного направления предложена и испытана конструкция ТГц эндоскопа сверхвысокого разрешения на основе эффекта твердотельной иммерсии, объединяющая сапфировый антирезонансный волновод и сапфировую иммерсионную линзу. Экспериментально подтверждено достижение субволнового пространственного разрешения порядка $\approx 0{,}2\lambda$.

Научная новизна исследования заключается в том, что:

- впервые исследованы границы применимости теории эффективной среды для описания эффективных диэлектрических
- характеристик систем неупорядоченных сферических рассеивателей в поглощающих средах в ТГц диапазоне;
- предложена новая теоретическая модель описания взаимодействия ТГц излучения для систем неупорядоченных сферических рассеивателей в поглощающих средах, позволяющая учесть эффекты рассеяния;
- разработан и апробирован новый метод изготовления рассеивающих фантомов для ТГц диапазона;
- разработаны новые методы эндоскопических исследований оптических параметров рассеивающих сред в ТГц диапазоне.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы

Предложенная модель эффективного коэффициента ослабления сильно поглощающих сред с мезомасштабными неоднородностями и установленные границы применимости теории эффективной среды позволяют описывать спектральные свойства и эффекты рассеяния ТГц волн в широком круге оптически неоднородных сред, включая биологические ткани. Полученные результаты востребованы как при решении теоретических задач, так и в биомедицинских приложениях ТГц излучения.

Созданные фантомы биологических тканей, воспроизводящие их ТГц оптические параметры, могут быть использованы для апробации новых методов ТГц спектроскопии и микроскопии.

Разработанные методы ТГц эндоскопии существенно расширяют инструментарий современной ТГц визуализации и спектроскопии. Благодаря высокому пространственному разрешению, данный метод обладает высокой практической значимостью не только для биомедицины, но и для исследования мезомасштабных структур в труднодоступных или потенциально агрессивных средах, что делает применение актуальным в прикладной химии, промышленности и материаловедении.

Замечания по диссертационной работе

При высоком научном уровне работы можно сделать следующие замечания:

1. Следует уточнить, как предложенная модель эффективного коэффициента ослабления соотносится с известными теоретическими моделями, в том числе, используемыми в рамках теории эффективной среды.
2. Желательно более явно сопоставить размеры использованных в работе рассеивателей с характерными размерами реальных мезомасштабных неоднородностей мягких тканей, а также указать, в какой степени выбранные диаметры частиц и объёмные доли соответствуют реальным тканевым структурам.
3. В работе предложен ТГц эндоскоп сверхвысокого пространственного разрешения, однако не уточнено, является ли он поляризационно-чувствительным, и не приведена количественная оценка его чувствительности как измерительной системы. Целесообразно пояснить, сохраняется ли поляризация ТГц излучения при распространении по сапфировому волноводу и фокусировке сапфировой иммерсионной линзой, а также указать, какие параметры определяют чувствительность разработанного эндоскопа.
4. В экспериментальной части работы рассеивающие фантомы исследованы для микросфер SiO_2 с диаметрами d=28 и 93 мкм. При этом не обсуждается, проводились ли исследования с более мелкими включениями и насколько выбранные размеры рассеивателей перекрывают диапазон структурных неоднородностей, характерных для реальных биологических тканей.

Однако, отмеченные недостатки не ставят под сомнение научную новизну диссертационной работы и достоверность ее выводов, а носят характер вопросов для дискуссии.

Заключение

Диссертационная работа Кучерявенко Анны Сергеевны «Теоретическое и экспериментальное исследование диэлектрических характеристик рассеивающих и труднодоступных сильно поглощающих сред в терагерцовом диапазоне», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, является законченной научно-квалификационной работой. Поставленные цели и задачи исследования достигнуты,

полученные результаты вносят значимый вклад в развитие физических основ ТГц биофотоники и методов ТГц эндоскопии.

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, перечисленным в «Положении о присуждении ученых степеней» ВАК РФ (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, ред. от 16.10.2024), а ее автор, Кучерявенко Анна Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв составлен на основе анализа диссертации и автореферата Кучерявенко А.С.

Диссертация обсуждена на расширенном заседании кафедры оптики и биофотоники ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского». Протокол № 14/26 от «16» ноября 2026 г.

Отзыв составила профессор кафедры оптики и биофотоники, д.ф.-м.н., доцент Генина Элина Алексеевна.

Заведующий кафедрой оптики и биофотоники
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.03 – Радиофизика),
профессор, член-корреспондент РАН
e-mail: tuchinvv@mail.ru
телефон: +7 (904) 241-97-10

Тучин Валерий Викторович

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Министерства науки и высшего образования (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» Минобрнауки России); 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83
+7 (8452) 26-16-96, rector@sgu.ru, www.sgu.ru

Контактные данные:
Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д.83,
Телефон: +7 (845-2) 26-16-96
e-mail: rector@sgu.ru

Подпись Тучина В.В. удостоверяю
Ученый секретарь Ученого совета
«18» ноября 2026