ОТЗЫВ

ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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

Диссертационная работа Кучерявенко А.С. посвящена исследованию диэлектрических характеристик гетерогенных сред, обладающих одновременно сильным поглощением и рассеянием в терагерцовом (ТГц) диапазоне. Примером таких сред могут служить гидратированные биологические ткани, которые представляют собой сложные рассеивающие среды, где вода выступает доминирующим поглотителем, а структурные элементы (клетки, волокна) – рассеивателями. Наличие сильного рассеяния и поглощения осложняет описание диэлектрических характеристик таких сред и ставит под вопрос возможность применения для этой цели теории эффективной среды (ТЭС). Кроме того, отсутствие инструментальных решений для доставки ТГц излучения к объектам, расположенным в труднодоступных областях (в случае измерений, проводимых *in vivo*), и количественных эндоскопических методов измерения их диэлектрических характеристик существенно ограничивает развитие ТГц биомедицинской диагностики. В связи с этим, работа, направленная на установление физических границ применимости ТЭС и разработку методов ТГц эндоскопии, является, безусловно, актуальной и своевременной.

Цель работы состояла в разработке новых теоретических и экспериментальных подходов к исследованию диэлектрических характеристик рассеивающих и труднодоступных сильно поглощающих сред в ТГц диапазоне, а также установлению границ применимости ТЭС для описания таких систем. Для ее достижения был выполнен ряд задач, а именно:

- проведен теоретический анализ характера рассеяния электромагнитной волны на одиночном непоглощающем сферическом рассеивателе в поглощающей среде в зависимости от размера рассеивателя и частоты излучения;
- предложена новая модель описания эффективного диэлектрического отклика системы с множеством сферических рассеивателей в приближении однократного рассеяния;
- создана и экспериментально исследована система сферических рассеивателей в поглощающей среде с вариацией диаметров и объёмных долей включений, которая

может служить фантомом биологической ткани для ТГц диапазона электромагнитного излучения;

- на основании полученных экспериментальных данных и теоретических расчетов были установлены границы, в которых ТЭС позволяет корректно описывать диэлектрические характеристики данных сред;
- предложен новый метод ТГц эндоскопии для исследования труднодоступных областей и проведена его экспериментальная апробация.

Содержание работы и ее основные результаты. Диссертация объемом 151 страница состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 313 источников. Структура работы логична и отражает последовательное решение поставленных задач.

Глава 1 посвящена анализу различных методов теоретического описания распространения ТГц излучения в неоднородных поглощающих средах, таких как биологические ткани, а также особенностей экспериментального исследования их диэлектрических характеристик и пространственной неоднородности.

В **Главе 2** приведена адаптация формализма модифицированной теории Лоренца-Ми для описания рассеяния на одиночной частице, погруженной в поглощающую среду. На основе теории переноса излучения соискателем выведено аналитическое выражение для эффективного коэффициента ослабления системы из множества рассеивателей, измеряемого в геометрии на пропускание. Важным результатом является доказательство того, что в силу доминирующего поглощения среды, окружающей частицы, многократным рассеянием можно пренебречь вплоть до объемных долей рассеивателей $f_v \leq 0{,}2$. На основе комплекса экспериментальных данных, полученных методом ТГц импульсной спектроскопии на специально созданных фантомах, состоящих из желатиновой матрицы и микросфер SiO_2 и имитирующих биологические ткани по создаваемому диэлектрическому контрасту и размерам включений, автором установлена граница применимости ТЭС: $d \leq 0{,}47\lambda$ и $f_v \leq 0{,}2$ с точностью до 6%.

В **Главе 3** автором предложен и реализован метод количественной ТГц эндоскопии на основе анализа резонансов Фабри-Перо. Предложенный алгоритм решения обратной задачи позволяет восстанавливать как действительную, так и мнимую часть комплексного показателя преломления по сдвигу и глубине модуляции интерференционных минимумов. Использование полого антирезонансного сапфирового волновода, выращенного методом капиллярного формообразования, позволило создать прототип эндоскопа и провести экспериментальную апробацию предложенного метода как на сильно, так и на слабо поглощающих средах. Дальнейшим развитием метода ТГц эндоскопии стало дополнение

разработанного волновода сапфировой иммерсионной линзой для достижения пространственного сверхразрешения. Проведенная FDTD-оптимизация геометрии фокусирующего элемента и последующие эксперименты подтвердили достижение пространственного разрешения на уровне ≈0,19λ и ≈0,2λ, что превышает предел разрешения Аббе и является выдающимся результатом для ТГц эндоскопии.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечена корректным применением математического аппарата (модифицированной теории Лоренца-Ми, теории переноса излучения и модели Бруггемана диэлектрической проницаемости) и строгим соблюдением границ сделанных допущений. Экспериментальные данные получены с использованием известных методов ТГц импульсной спектроскопии и спектроскопии на лампе обратной волны. Важным аргументом в пользу достоверности служит перекрестная проверка: результаты, полученные разработанным методом ТГц эндоскопии, независимо верифицированы данными ТГц импульсной спектроскопии на пропускание. Основные положения работы опубликованы в рецензируемых журналах и доложены на профильных международных и российских конференциях.

Научная новизна работы заключается в создании новой модели эффективного диэлектрического отклика гетерогенных сред, экспериментальном определении границ применимости ТЭС, а также в разработке оригинальных методов ТГц эндоскопии, обеспечивающих количественное определение оптических параметров и субволновое пространственное разрешение.

Практическая значимость работы несомненна. Разработанные фантомы обладают воспроизводимыми и контролируемыми параметрами и могут использоваться как тестовые объекты для калибровки ТГц систем, для апробации новых методов ТГц визуализации и спектроскопии или в других экспериментальных целях. Разработанные методы ТГц эндоскопии открывают новые возможности для биомедицины, а также для неразрушающего контроля в материаловедении и химии.

Замечания по диссертационной работе.

Отмечая высокий научный уровень работы, следует сделать несколько замечаний и вопросов, которые носят дискуссионный характер:

1. В Главе 2 для сравнения с предложенной моделью α_{RTT} была использована модель Бруггемана. Однако для систем с матрицей и сферическими включениями классически применяется и модель Максвелла-Гарнетта. Чем обусловлен выбор именно модели Бруггемана, и проводилось ли сравнение с моделью Максвелла-Гарнетта?

2. Насколько точно удается воспроизвести дисперсионные характеристики реальной тканевой воды при использовании 15% раствора желатина в качестве модельной среды? Ведь в биотканях значительная часть воды находится в связанном состоянии с биомолекулами, что меняет её диэлектрический отклик.
3. В работе при построении модели эффективного диэлектрического отклика системы неупорядоченных сферических рассеивателей используется приближение однократного рассеяния. Почему Вы уверены, что в сильно поглощающей среде рассеяние является однократным, а не многократным? Каким образом можно разделить вклады однократного и многократного рассеяния и где лежит граница применимости такого приближения?
4. В работе для ТГц эндоскопа на основе сапфирового волновода и эффекта твердотельной иммерсии численное моделирование дает результат 0,152λ, что превышает разрешение, устанавливаемое пределом Аббе даже для системы с идеальной числовой апертурой равной 1. Достижение таких высоких значений числовых апертур в оптике является отдельной задачей, однако демонстрируемое в работе теоретическое разрешение достигает значений порядка 0,15λ, а экспериментально 0,2λ. Чем объясняется такое повышение пространственного разрешения в разработанной системе?
5. Какова чувствительность разработанного ТГц эндоскопа и какие параметры сред он позволяет количественно измерять? В каких задачах Вы видите его дальнейшее применение, и чем ограничены его возможности?

Заключение.

Диссертационная работа А.С. Кучерявенко является самостоятельным, завершенным научным исследованием, выполненным на высоком теоретическом и экспериментальном уровне. По актуальности, новизне, обоснованности научных положений и практической значимости диссертация «Теоретическое и экспериментальное исследование диэлектрических характеристик рассеивающих и труднодоступных сильно поглощающих сред в терагерцовом диапазоне» полностью соответствует требованиям постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Кучерявенко Анна Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

Доктор физико-математических наук,
доцент кафедры квантовой электроники
физического факультета федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В.
Ломоносова»

Ширшин
Евгений
Александрович

26 ноября 2026 г.

Контактные данные:
тел.: +7(910)457-12-47, e-mail: eshirshin@gmail.com
Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.03.06 – Оптика по физико-математическим наукам
Адрес места работы:
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
тел. +7 (495) 939-10-00 e-mail: info@org.msu.ru

Я, Ширшин Евгений Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.136.01 (Д002.100.02) и их дальнейшую обработку.

_____ / Ширшин Евгений Александрович
26 ноября 2026 г.

Подпись Ширшина Евгения Александровича заверяю:

И.о. декана физического факультета
федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В.
Ломоносова»,
д.ф.-м.н., профессор

Белокуров
Владимир
Викторович