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 разработке новых теоретических моделей и экспериментальных методов исследования диэлектрических характеристик рассеивающих и труднодоступных сильно поглощающих сред в терагерцовом (ТГц) диапазоне, примером которых могут служить гидратированные биологические ткани, а также установлению границ применимости ТЭС для описания таких сред. **Актуальность** данной темы не вызывает сомнений: в настоящее время ТГц диапазон нашел ряд приложений в биофотонике, медицине и других областях науки и техники. Тканевая вода делает биологические ткани сильно поглощающими в ТГц диапазоне, а их структурные неоднородности, такие как единичные клетки, их агломераты, или волокна, по размерам сопоставимы с длиной волны ТГц диапазона. Традиционные подходы к описанию ТГц диэлектрического отклика биологических тканей, рассматривающие такие среды как однородные и изотропные, не всегда применимы. В связи с этим работа, направленная на установление границ применимости теории эффективной среды (ТЭС) и разработку методов ТГц эндоскопи, является крайне востребованной.

Содержание работы и ее основные результаты. Диссертация объемом 151 страница состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 313 источников. Структура изложения логична: от теоретического анализа рассеяния на одиночных частицах и построения модели для коэффициента ослабления до создания фантомов, установления границ применимости ТЭС и разработки экспериментальных методов ТГц эндоскопии.

Глава 1 посвящена анализу различных методов описания ТГц диэлектрического отклика мягких тканей на основании допущения об их однородности и изотропности. Обсуждаются последние достижения в сверхразрешающей ТГц микроскопии, которые указывают на необходимость разработки новых моделей взаимодействия ТГц излучения с биологическими тканями, позволяющих учитывать их структурные свойства.

Также рассматриваются различные методы доставки ТГц излучения к труднодоступным образцам, например в ходе измерений *in vivo*. ТГц волноводы, основанные на различных физических принципах, сравниваются в плане пригодности для использования в качестве ТГц эндоскопов. На основании материалов первой главы формулируются цель и основные задачи диссертации.

В **Главе 2** рассматривается влияние эффектов рассеяния ТГц волн на сферических рассеивателях, окруженных поглощающей средой с использованием формализма теории рассеяния Лоренца – Ми, теории переноса излучения, ТЭС. Соискателем предлагается новая модель для эффективного коэффициента ослабления. Разрабатываются фантомы, имитирующие оптические и структурные параметры биологических тканей в ТГц диапазоне. На данных фантомах методами ТГц импульсной спектроскопии устанавливаются границы применимости ТЭС по объёмной доле и диаметру рассеивателей.

Глава 3 посвящена разработке теоретических и экспериментальных методов ТГц эндоскопии, позволяющих восстанавливать комплексный показатель преломления труднодоступных объектов или агрессивных сред. Также разрабатывается фокусирующий элемент для данного ТГц эндоскопа, экспериментальная апробация которого демонстрирует пространственное разрешение системы $\approx 0{,}2\lambda$.

Научная новизна работы заключается в впервые проведенных исследованиях границ применимости ТЭС, выведении новой математической модели ТГЦ диэлектрического отклика, учитывающей рассеяние на сферических рассеивателях в поглощающей среде, а также в разработке фантомов биологических тканей для ТГц диапазона и оригинальных методов ТГц эндоскопии, обеспечивающих количественное определение оптических параметров и субволновое пространственное разрешение.

Теоретическая значимость диссертации заключается в расширении представлений о переносе электромагнитного излучения ТГц диапазона в оптически неоднородных сильно поглощающих средах. Полученные количественные критерии применимости ТЭС позволяют обоснованно использовать простые модели эффективной среды при анализе спектров гидратированных биотканей без необходимости решения громоздких уравнений переноса излучения, а также корректно интерпретировать данные при оптическом иммерсионном просветлении тканей.

Практическая значимость состоит в создании воспроизводимых тканеимитирующих фантомов, пригодных для калибровки и тестирования систем ТГц спектроскопии и визуализации, а также в разработке прототипов химически и термически

стойких биосовместимых сапфировых ТГц эндоскопов. Предложенные устройства могут найти применение в малоинвазивной и интраоперационной медицинской диагностике, а также при неразрушающем контроле труднодоступных объектов в агрессивных средах.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются корректным применением математического аппарата и кросс-валидация данных методами ТГц эндоскопии и ТГц импульсной спектроскопии на пропускание независимо друг от друга. Основные положения работы были опубликованы в рецензируемых журналах и доложены на профильных международных и российских конференциях.

Замечания по диссертационной работе.

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

1. Одним из результатов работы является предложенная модель мнимой части эффективного диэлектрического отклика сильно поглощающих рассеивающих сред с мезомасштабными неоднородностями для предсказания оптических параметров биологических тканей в ТГц диапазоне. Однако в предложенной модели мезомасштабные однородности представлены исключительно одиночными сферическими непоглощающими объектами. Подобное допущение справедливо в первом приближении при рассмотрении биологических тканей, но не учитывает всей полноты особенности таких сред. Поэтому, считаю недостатком отсутствие рассуждений на предмет анизотропии неоднородностей, таких как форма и градиент свойств, и связи анизотропии с рассеянием ТГц излучения.
2. При построении теории переноса ТГц волн используется приближение однократного рассеяния. Это справедливо для указанных размеров и объемной доле включенных частиц. Недостатком является отсутствие обсуждений о возможных подходах к учету случаев многократного рассеяния.
3. При разработке ТГц эндоскопа были проведены экспериментальные работы по измерению показателя преломления и коэффициента поглощения. Результаты сравнивались с параметрами, измеренными при помощи импульсной ТГц спектроскопии на пропускание. Однако результаты работы эндоскопа было бы правильнее сравнивать с импульсной ТГц спектроскопией на отражение, ввиду особенностей проведения эксперимента и требований к объекту исследования.

Указанные замечания не затрагивают сути защищаемых положений и не снижают общей высокой оценки работы.

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.

Я, Яковлев Егор Викторович, 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.

_____ / Яковлев Егор Викторович

«20» ноября 2026 г.

Официальный оппонент _____ / Яковлев Егор Викторович

«20» ноября 2026 г.

кандидат физико-математических наук (01.04.07 – физика конденсированного состояния),
ведущий научный сотрудник НОЦ «Мягкая материя и физика флюидов»,
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Контактные данные:
тел: +7 (916) 505-10-85, e-mail: yakov.egor@gmail.com
Адрес места работы: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр.1,
тел: +7 (499) 263-63-91 e-mail: bauman@bmstu.ru

Подпись Яковлева Е.В. заверяю

«ВЕРНО»

СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ

АЛЕКСЮК Ж.К.

ОТДЕЛ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ЕДИНОЙ ПРИЁМНОЙ УКСИА МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА