

На правах рукописи



Кучерявенко Анна Сергеевна

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕИВАЮЩИХ И
ТРУДНОДОСТУПНЫХ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД В
ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

Специальность 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Черноголовка – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

Научный руководитель:

Долганова Ирина Николаевна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории профилированных кристаллов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

Ширшин Евгений Александрович

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

Яковлев Егор Викторович

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

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского»**

Защита состоится «15» декабря 2026 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.136.01 (Д002.100.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН) по адресу: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФТТ РАН и на сайте <http://www.issp.ac.ru/main/index.php/ru/dis-council.html>.

Автореферат разослан <__> _____ 2026 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.100.02

доктор физико-математических наук



Гаврилов Сергей Сергеевич

©Кучерявенко А.С., 2026 г.

©ИФТТ РАН, 2026 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитного излучения нашел множество применений в различных областях науки и техники. Особый интерес ТГц излучение представляет для биофотоники и медицины [1,2]. Среди приложений ТГц излучения можно отметить методы диагностики злокачественных и доброкачественных новообразований различной нозологии и локализации [3,4, А1], в основе которых лежит измерение и анализ диэлектрических характеристик здоровых и патологически измененных тканей.

ТГц отклик мягких тканей в основном определяется взаимодействием излучения с тканевой водой, благодаря значительному поглощению ТГц волн жидкой водой и высокому содержанию воды в таких тканях. Аналогично жидкой воде и водным растворам, комплексная диэлектрическая проницаемость тканей в ТГц диапазоне обычно описывается суперпозицией двух или более релаксационных членов с различными временами релаксации [5]. Среди таких моделей наиболее широко применяется релаксационная модель Дебая.

Поскольку традиционные системы ТГц спектроскопии и визуализации обладают достаточно низким пространственным разрешением из-за ограничений дифракции и большой длины волны, широкое применение нашел подход, рассматривающий ткани как пространственно-однородные эффективные среды с диэлектрическими характеристиками, усредненными в некотором объеме. Данный способ описания ТГц отклика тканей становится возможен благодаря допущению об оптической изотропности и однородности мягких тканей в масштабе ТГц длин волн. Однако неоднородности многих структурных компонент тканей могут иметь размеры сравнимые с ТГц длиной волны. Они могут вызывать рассеяние ТГц волн, что будет затруднять интерпретацию измеренных данных и, таким образом, приводить к неприменимости теории эффективной среды для таких тканей.

Так, для визуализации субволновых ($< \lambda$) или мезомасштабных ($\sim \lambda$) структурных элементов в тканях применялись различные режимы сверхразрешающей ТГц микроскопии. При помощи ТГц микроскопа на эффекте твердотельной иммерсии с пространственным разрешением 0.15λ были впервые визуализированы неоднородности различных тканей человека и модельных животных [6,7,8,9], которые могут приводить к рассеянию ТГц волн. Таким образом, особенностью ТГц методов исследования гидратированных биологических тканей является наличие одновременно сильного поглощения и рассеяния на мезомасштабных неоднородностях.

В некоторой степени эффекты рассеяния ТГц волн изучались только для мутных сред с малым поглощением, что менее актуально для ТГц биофотоники, где ткани обычно демонстрируют сильное поглощение ТГц волн из-за большого

содержания воды. При этом, все вышеупомянутые результаты стимулируют дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования процессов рассеяния ТГц излучения в мягких тканях и мутных сильно поглощающих средах, включая адаптацию теории Лоренца-Ми и построение теории переноса излучения для описания взаимодействия ТГц волн с такими средами, а также использование методов ТГц спектроскопии и визуализации.

В то же время экспериментальные исследования биологических тканей зачастую осложняются отсутствием прямого доступа к ним, удаленностью объекта от экспериментальной установки или прибора, и/или необходимостью проведения измерений *in vivo*. В то время как в видимом и инфракрасном диапазонах эта проблема успешно решается с помощью использования волоконной оптики и эндоскопических систем, в ТГц диапазоне в настоящее время отсутствуют коммерчески доступные эндоскопы и остаются слабо развитыми соответствующие методы исследований [A2]. Поэтому настоящая диссертация направлена на решение указанных проблем с помощью разработки теоретических и экспериментальных методов.

Целью диссертации является теоретическое (на основе модифицированной теории рассеяния Лоренца-Ми, теории переноса излучения, теории эффективной среды) и экспериментальное (методами ТГц импульсной спектроскопии и ТГц эндоскопии) исследование диэлектрических характеристик рассеивающих и труднодоступных сильно поглощающих сред.

Для достижения сформулированной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

- Провести теоретический анализ рассеяния ТГц излучения одиночными сферическими рассеивателями субволнового и мезомасштабного размеров в сильно поглощающей среде с применением модифицированной теории Лоренца–Ми.
- Построить модель эффективного диэлектрического отклика для системы сферических рассеивателей в поглощающей среде при предположении однократного рассеяния.
- Разработать и изготовить фантомы мягких тканей с неупорядоченной системой сферических рассеивателей, окружённых сильно поглощающей матрицей.
- Провести экспериментальные исследования ТГц спектральных откликов разработанных фантомов.
- Установить границы применимости теории эффективной среды для корректного описания оптических параметров рассеивающих фантомов и мягких тканей в зависимости от относительного размера рассеивателей и их объёмной доли.

- Разработать методы ТГц эндоскопии (на основе анализа резонанса Фабри–Перо и твердотельной иммерсии) для исследования оптических параметров труднодоступных поглощающих объектов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная модель мнимой части эффективного диэлектрического отклика сильно поглощающих рассеивающих сред с мезомасштабными неоднородностями позволяет предсказывать оптические параметры гидратированных биологических тканей в ТГц диапазоне с учетом их рассеивающих свойств.
2. Теория эффективной среды в ТГц диапазоне применима для описания оптических параметров сильно поглощающих рассеивающих сред с характерными размерами рассеивателей $d \leq 0,47\lambda$ и их объемной долей $f_v \leq 0,2$ с точностью до 6%.
3. Фантом на основе микросфер SiO_2 и желатиновой матрицы имитирует оптические параметры гидратированных биологических тканей в ТГц диапазоне.
4. Разработанный метод ТГц эндоскопии на основе анализа резонанса Фабри–Перо обеспечивает количественное определение комплексного показателя преломления анализируемого вещества.
5. Разработанный метод ТГц эндоскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии позволяет исследовать мезомасштабные структуры неоднородных объектов с пространственным разрешением $0,2\lambda$.

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 работы:

Разработанная модель эффективного диэлектрического отклика сильно поглощающих рассеивающих сред с мезомасштабными неоднородностями в ТГц диапазоне, а также установленные границы применимости теории эффективной среды позволяют описывать спектральные свойства широкого круга оптически

неоднородных сред, в том числе биологических тканей, и эффекты рассеяния ТГц волн в таких средах. Результаты могут быть использованы как при решении теоретических задач, так и в практических приложениях, связанных с биомедицинскими применениями ТГц волн.

Разработанные фантомы биологических тканей, воспроизводящие их оптические параметры в ТГц диапазоне, могут быть применены для апробации новых экспериментальных методов ТГц спектроскопии и ТГц микроскопии.

Разработанные методы ТГц эндоскопии существенно расширяют возможности современных методов ТГц визуализации и спектроскопии. Они обладают высокой практической значимостью и могут быть использованы не только в биомедицине, но и для исследования мезомасштабных структур и образцов в труднодоступных местах, а также в потенциально агрессивных средах. Полученные результаты демонстрируют высокое пространственное разрешение разработанной ТГц эндоскопической системы, что делает ее применение актуальным для различных задач в области прикладной химии, промышленности и материаловедения.

Методы исследований. При решении задач диссертации применялись методы теории эффективной среды, теории переноса излучения, теории рассеяния Лоренца-Ми, ТГц импульсной спектроскопии и твердотельной иммерсионной микроскопии.

Личный вклад автора состоит в разработке и создании экспериментальных стендов и установок, подготовке и проведении экспериментальных работ, разработке теоретических моделей и проведении численного моделирования, обработке, анализе и интерпретации экспериментальных результатов. Все результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

Достоверность результатов основана на корректном рассмотрении исследуемых физических процессов, использовании правомерных допущений, корректном применении методов исследования, воспроизводимостью результатов эксперимента, а также на соответствии результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации были представлены на 9 международных научных мероприятиях, а именно: симпозиум «Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN–2022)», г. Санкт-Петербург, Россия, 27 – 30 июня 2022 г.; симпозиум «Saratov Fall Meeting 2022 (SFM'22)», г. Саратов, Россия, 26 – 30 сентября 2022 г.; конференция «The 30th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'23)» г. Самара, Россия, 18 – 21 сентября 2023г.; симпозиум «Saratov Fall Meeting 2023 (SFM'23)», г. Саратов, Россия, 25 – 29 сентября 2023 г.; конференция «Acousto-optic and Radar Methods for Information Measurements and Processing (ARMIMP'2023)», г. Суздаль, Россия, 9 – 12 октября 2023г.; симпозиум «Saratov Fall Meeting 2024 (SFM'24)», г.

Саратов, Россия, 3 – 5 октября 2024 г.; конференция «International Conference Laser Optics (ICLO'2024)», г. Санкт-Петербург, Россия, 1 – 5 июля 2024 г.; конференция «Acousto-optic and Radar Methods for Information Measurements and Processing (ARMIMP'2024)», г. Суздаль, Россия, 23 – 26 сентября 2024г.; симпозиум «Saratov Fall Meeting 2025 (SFM'25)», г. Саратов, Россия, 29 сентября – 3 октября 2025 г.;

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 научных статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК и индексируемых в международных базах данных, получен один патент РФ.

Структура диссертации. Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список сокращений и список использованных источников. Общий объем диссертационной работы составляет 151 страницы, 33 рисунка. Список литературы включает 313 источников.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, отражены личный вклад автора и результаты апробации работы.

В **главе 1** проведен анализ работ, посвященных исследованию распространения ТГц излучения в неоднородных средах, в частности, в биологических тканях. Рассмотрены методы теоретического описания характеристик таких сред и особенности их экспериментального исследования. Отдельно изучены методы измерения ТГц параметров удаленных и труднодоступных сред, в частности, особое внимание уделено существующим волноводам для доставки ТГц излучения к объекту исследования и рассмотрены перспективы их использования в качестве эндоскопов. Вместе с этим, рассмотрены вопросы создания тестовых и модельных объектов с заданными характеристиками в ТГц диапазоне, используемые для экспериментальных целей.

Раздел 1.1 посвящен ТГц диапазону электромагнитного спектра, рассмотрены его применения. Особое внимание уделено биомедицинским приложениям ТГц излучения [A1]. Выделяются основные проблемы, сдерживающие внедрение ТГц технологий в различные практические области медицины, а именно: отсутствие ТГц эндоскопов, низкое пространственное разрешение обычной ТГц оптики и приближенное рассмотрение биологических тканей в предположении их однородности и изотропности.

В **разделе 1.2** рассматривается общепринятое описание ТГц отклика мягких тканей при помощи релаксационных моделей комплексной диэлектрической

проницаемости по аналогии с водой и водными растворами. Приводятся модели диэлектрической проницаемости эффективной среды Максвелла-Гарнетта, Бруггемана и Ландау-Лифшица-Лойенги, позволяющие описать неоднородные биологические ткани как смеси двух и более компонентов. Обсуждаются последние достижения в высокоразрешающей ТГц визуализации, которые могут свидетельствовать о необходимости разработки новых подходов к описанию взаимодействия ТГц волн с тканями, учитывающих дисперсионные, абсорбционные и рассеивающие свойства компонентов ткани, а также их структурные свойства.

Раздел 1.3 содержит информацию о различных типах ТГц волноводов, пригодных для доставки излучения к труднодоступным областям. Выделяются ключевые параметры для их использования в качестве эндоскопов, а именно: потери при распространении $\leq 1 - 10$ дБ/м, дисперсия < 1 пс (ТГц см) $^{-1}$, малый внешний диаметр, биоинертность и устойчивость к стерилизации. ТГц волноводы, основанные на различных физических принципах доставки излучения, рассматриваются с точки зрения пригодности для ТГц эндоскопии. Отмечаются первые публикации по разработке ТГц эндоскопов и отсутствие методов количественного определения диэлектрических характеристик труднодоступных сред [A2].

Проблема повышения пространственного разрешения ТГц оптических систем и современные подходы к преодолению дифракционного предела Аббе обсуждаются в **разделе 1.4**. Особенно выделяется метод твердотельной иммерсии, который позволяет достигать пространственного разрешения в 0.15λ и безопасно работать с тканями, при этом обеспечивая хороший компромисс между разрешением, скоростью работы и энергоэффективностью.

Раздел 1.5 посвящен проблеме отсутствия рассеивающих фантомов для ТГц диапазона, которые бы демонстрировали воспроизводимый отклик, и имели схожие с биологическими тканями оптические параметры и размеры структурных неоднородностей. На основании материалов первой главы, в **разделе 1.6** сформулированы цель и задачи диссертации.

Глава 2 посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию влияния эффектов рассеяния ТГц волн на измеряемые оптические параметры для систем, представленных непоглощающими рассеивателями сферической формы, окруженными поглощающей средой. Используются методы теории переноса излучения, теории эффективной среды, теории рассеяния Лоренца-Ми, ТГц импульсной спектроскопии для разработки модели эффективного диэлектрического отклика сильно поглощающих рассеивающих сред с мезомасштабными неоднородностями в ТГц диапазоне. Предложен и изготовлен тканемимитирующий фантом, с его помощью проведены экспериментальные исследования эффектов рассеяния ТГц излучения.

В разделе 2.1 приводится описание теории переноса ТГц волн, построенной для группы неупорядоченных сферических рассеивателей в поглощающей среде на основе модифицированной теории однократного рассеяния Лоренца-Ми.

Измеренную интенсивность излучения, прошедшего через поглощающую среду с ансамблем из N рассеивателей (рис. 1), в дальней зоне можно представить как сумму вкладов прошедшей плоской волны и рассеянной сферической волны, за вычетом интенсивности при рассеянии и поглощении частицами [10].

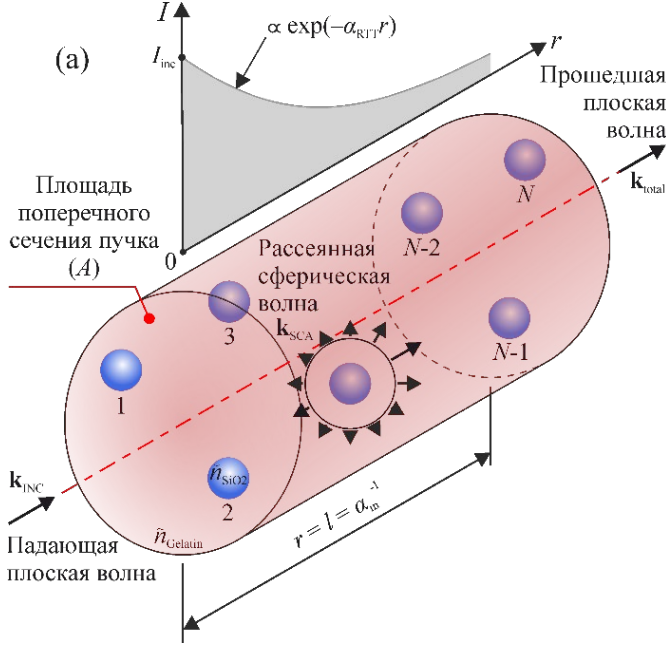


Рис. 1 – Схема распространения электромагнитного пучка через объем поглощающей среды конечного размера площадью поперечного сечения A и длиной $l \approx \alpha_m^{-1}$, заполненный ансамблем из N сферических частиц. [A3]

При этом, ТГц оптические параметры, оцененные по данным импульсной ТГц спектроскопии, описывают эффективный показатель преломления n и общие потери α_{total} двухкомпонентной среды. Малая глубина проникновения ТГц волны в поглощающую среду ($\sim \alpha_m^{-1}$, где α_m – коэффициент поглощения среды, окружающей рассеиватель), а также детектирование сигнала в дальней зоне позволяют пренебречь вкладом рассеянной сферической волны в общую измеренную интенсивность, описываемым быстро убывающим ($\sim r^{-2}$) членом. Это позволяет использовать приближение однократного рассеяния для интенсивности I , перейти от векторной формы к скалярной и ввести коэффициент экстинкции α_{RTT} для рассматриваемой геометрии измерений в рамках формализма теории переноса излучения:

$$I^{total} = \exp(-\alpha_{RTT}r) I^{inc} = \exp(-\alpha_m r) I^{inc} - \exp(-\alpha_m r) \sigma_{ext} \frac{N}{A} I^{inc} \quad (1)$$

где σ_{ext} – интегральное сечение экстинкции, полученное методами модифицированной теории Лоренца-Ми для одиночного рассеивателя.

Были использованы следующие допущения:

- количество частиц определялось по их объемной доле как $N = f_v V_{\Sigma} / V_{part}$, где $V_{part} = \pi d^3 / 6$ – объем одной частицы, а $V_{\Sigma} = Al$ – полный объем

рассеивающей среды длиной l , на который падает электромагнитный пучок с площадью поперечного сечения A ;

- из-за сильного поглощения фактическая глубина проникновения падающего пучка ограничена потерями в среде, что позволяет ограничить длину рассеивающего объема средней длиной свободного пробега $l = \alpha_m^{-1}$.

Когда при распространении ТГц пучка от источника до детектора кроме рассмотренного объема оптически неоднородной среды с длиной $l = \alpha_m^{-1}$ отсутствуют другие факторы ослабления излучения, распространение пучка после слоя среды происходит в свободном пространстве, можно сделать допущение $r \simeq l = \alpha_m^{-1}$. Тогда эффективный общий коэффициент ослабления для такой системы можно определить выражением:

$$\alpha_{\text{RTT}} = \alpha_m + \alpha_m \ln \left[1 - \frac{f_v \sigma_{\text{ext}}}{\alpha_m V_{\text{part}}} \right], \quad (2)$$

В разделе 2.2 описывается разработка рассеивающего фантома для моделирования как поглощения, так и рассеяния ТГц волн. В качестве матрицы с высоким показателем поглощения используется 15% раствор желатина. В роли рассеивателей, внедренных в поглощающую матрицу, выступают микросферы SiO_2 размерами $d = 28$ и 93 мкм [A4].

Результаты расчета параметров рассеяния на одиночном рассеивателе фантома, приведенные в разделе 2.3, демонстрируют трансформацию индикатрисы по мере увеличения отношения d/λ и отражают переход от релеевского режима рассеяния к режиму рассеяния Ми (рис. 2).

С помощью предложенной модели описания эффективного общего коэффициента ослабления (α_{RTT}) и модели Бруггемана ($\alpha_{\text{БМТ}}$), основанной на формализме теории эффективной среды, в разделе 2.4 были рассчитаны эффективные общие коэффициенты ослабления для рассмотренных сред.

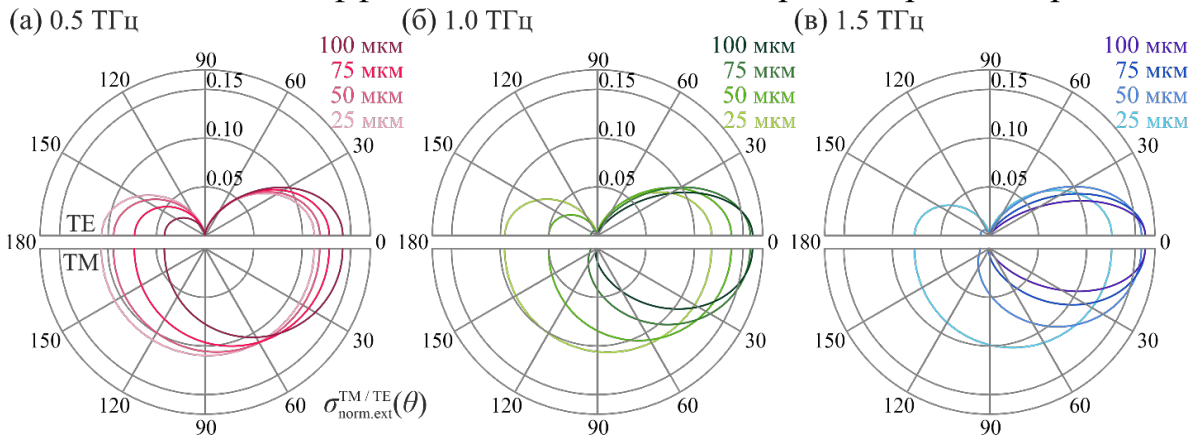


Рис. 2 – Параметры рассеяния ТГц волн на одной микрочастице SiO_2 , внедренной в желатиновую матрицу, рассчитанные аналитически с использованием теории рассеяния Ми для различных частот и диаметров частиц. (а)–(в) Нормированное дифференциальное сечение $\sigma_{\text{norm. ext}}^{\text{TE/TM}}$ для диаметров частиц $d = 25$ – 100 мкм и частот $\nu = 0,5, 1,0$ и $1,5$ ТГц, соответственно [A3].

За счет внедрения в поглощающую матрицу непоглощающих частиц потери излучения снижаются по сравнению с коэффициентом поглощения нерассеивающей среды (**рис. 3**). Для модели Бруггемана наблюдается линейный характер уменьшения коэффициента ослабления. Характер уменьшения коэффициента ослабления $\alpha_{\text{РТТ}}$ разработанной модели слабо отличается от линейного, что связано с дополнительным влиянием рассеяния излучения.

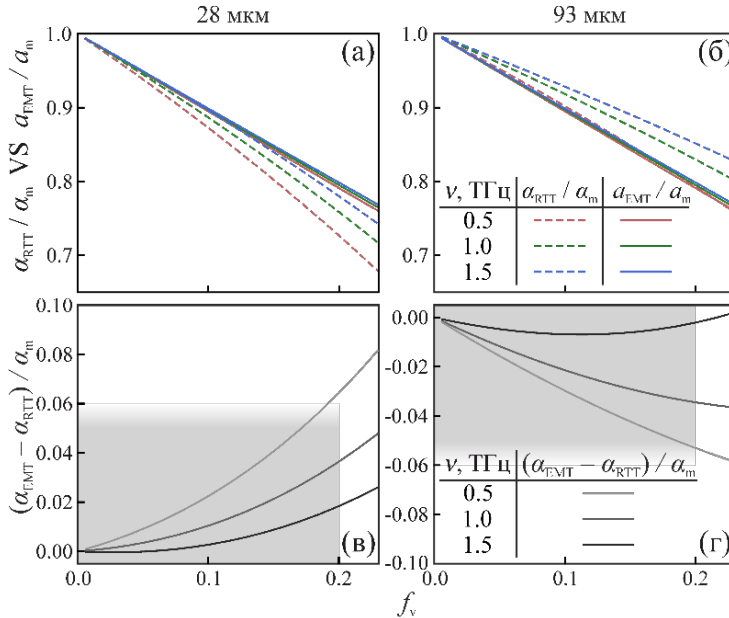


Рис.3. – (а), (б) Результаты расчета $\alpha_{\text{РТТ}}$ и $\alpha_{\text{ФМТ}}$ нормированные на α_m , как функции объемной доли f_v , на частотах $\nu = 0,5, 1,0$ и $1,5$ ТГц для диаметра частиц 28 и 93 мкм соответственно. (в), (г) Нормированное расхождение между $\alpha_{\text{РТТ}}$ и $\alpha_{\text{ФМТ}}$ на частотах $\nu = 0,5, 1,0$ и $1,5$ ТГц для диаметров 28 мкм и 93 мкм, соответственно. Заштрихованные серым области определяют пределы применимости теории эффективной среды с погрешностью $\leq 6\%$. [А3]

Сравнение значений коэффициента ослабления, полученного двумя методами, позволило установить, что:

- при малых значениях f_v теория эффективной среды и теория переноса излучения дают довольно близкие предсказания потерь в среде, в то время как при более высоких значениях f_v возникает расхождение между двумя теориями, поскольку только в $\alpha_{\text{РТТ}}$ учитываются процессы рассеяния;
- с учетом уровня допустимой погрешности 6% (согласно данным о погрешности измерения современных спектроскопических приборов для биотканей в режиме на отражение) теория эффективной среды применима для широкого диапазона объемной доли ($f_v \leq 0,2$) и мезомасштабных размеров частиц ($d \leq 0,47\lambda$). Вне этой зоны ослабление излучения и диэлектрический отклик следует оценивать на основе теории переноса излучения.

Затем, в **разделе 2.5** описываются экспериментальные исследования разработанных рассеивающих фантомов методами ТГц импульсной спектроскопии и высокоразрешающей ТГц микроскопии на основе эффекта твердотельной иммерсии. Показано, что ТГц изображения фантомов схожи с изображениями *ex vivo* молочной железы человека, представленной фиброзной соединительной тканью с жировыми клетками. Результаты ТГц спектроскопии демонстрируют, что между желатиновой матрицей и рассеивателями из SiO_2 создается диэлектрический контраст, примерно равный контрасту между

соединительной тканью и жировыми клетками. Измеренные показатели преломления и коэффициент поглощения хорошо описываются моделью Бруггемана (рис. 4).

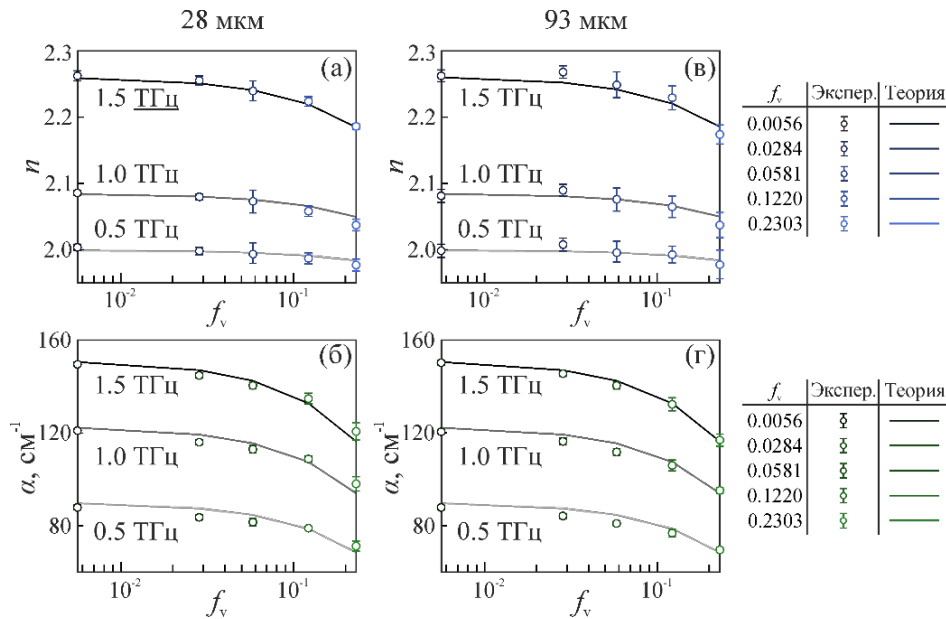


Рис. 4 – Значения n и α как функция f_v на частотах 0,5, 1,0 и 1,5 ТГц. (а), (б) результаты для частиц с диаметром 28 мкм, (в), (г) – с диаметром 93 мкм. [A3]

Далее была проведена количественная оценка расхождения между измеренными данными и предсказаниями теории эффективной среды, что позволило установить, что погрешность предсказания составляет менее 6% для рассматриваемых широких диапазонов параметров фантома ($d \leq 0,47\lambda$, $f_v \leq 0,2$) и электромагнитных частот. Экспериментальные результаты в целом согласуются с теоретическим предсказанием и позволяют определить пределы применимости теории эффективной среды для гидратированных биологических тканей в ТГц диапазоне (рис. 5).

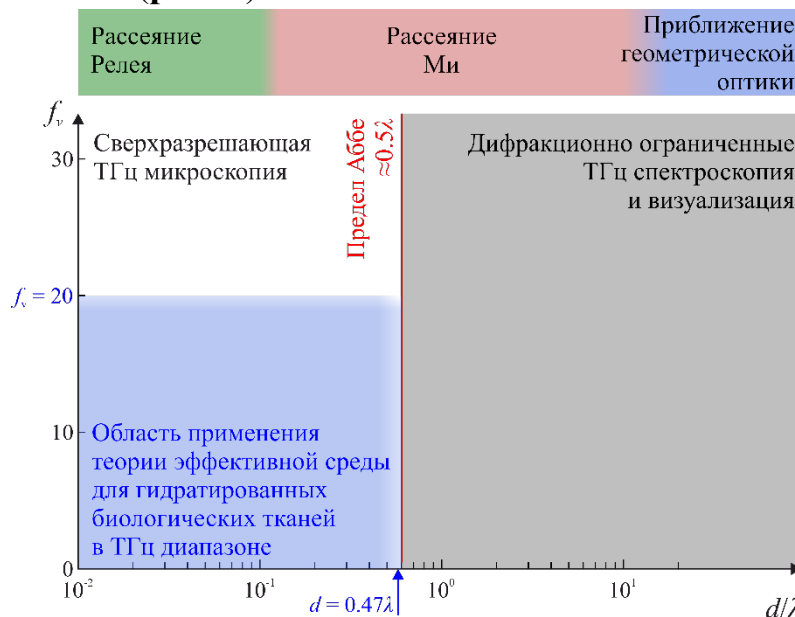


Рис. 5. – Пределы применимости теории эффективной среды в пространстве «относительный диаметр частиц d/λ – объемная доля f_v ». [A3]

В разделе 2.6 был проведен анализ полученных результатов. Выводы по второй главе представлены в разделе 2.7.

Новые теоретические и экспериментальные методы ТГц эндоскопии для исследования оптических параметров труднодоступных поглощающих объектов разрабатываются в **главе 3**.

В **разделе 3.1** описывается метод восстановления комплексного показателя преломления $\tilde{n}_s$ объекта, приведенного в плотный контакт с сапфировой пластиной с комплексным показателем преломления $\tilde{n}_w$, расположенной на выходном торце ТГц волновода с комплексным показателем преломления моды $\tilde{n}_{\text{mode}}$, где волновод с пластиной образуют эндоскоп (**рис. 6**).

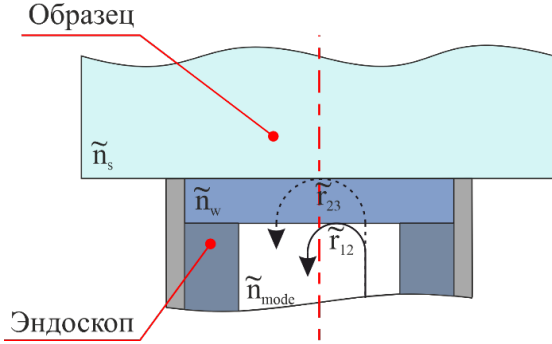


Рис. 6. – Схема измерения оптических параметров образца методом анализа резонансов Фабри-Перо [A5].

Предложенный метод основан на анализе спектров коэффициента отражения. Результирующие положения минимумов спектра $\Delta\nu_{\min}$, вызванных резонансами Фабри-Перо в плоскопараллельной пластине, и значения коэффициента отражения R_{theory} напрямую связаны с $\tilde{n}_s$ объекта, расположенного в контакте с окном [11,12] и задаются [13] следующим образом:

$$R_{\text{theory}} = \left| \frac{\tilde{r}_{12} + \tilde{r}_{23}\tilde{p}^2}{1 + \tilde{r}_{12}\tilde{r}_{23}\tilde{p}^2} \right|^2, \quad \nu_{\min} = \frac{c_0}{4dn'_w} \left[\frac{\varphi}{\pi} + (2m + 1) \right]. \quad (3)$$

Здесь d – толщина выходного окна, $m = 0, \pm 1, \pm 2$ – целое число, а коэффициенты отражения Френеля (по полю) $\tilde{r}_{12}$, $\tilde{r}_{23}$, соответствующие границам раздела эндоскоп (воздух)/окно и окно/объект, и фазовый сдвиг на границе раздела окно/объект φ определяются выражениями:

$$\tilde{r}_{12} = \frac{\tilde{n}_{\text{mode}} - \tilde{n}_w}{\tilde{n}_{\text{mode}} + \tilde{n}_w}, \quad \tilde{r}_{23} = \frac{\tilde{n}_w - \tilde{n}_s}{\tilde{n}_w + \tilde{n}_s}, \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2n'_w n''_s}{n'^2_w - n_s'^2 - n_s''^2} \right), \quad (4)$$

Параметр p определяет фазовую задержку волны в окне, полученную с использованием модифицированного закона Бугера–Ламберта–Бера [14]:

$$\tilde{p} = \exp \left(-i \frac{2\pi\nu d}{c_0} \tilde{n}_w(\nu) \right). \quad (5)$$

Для получения более точных значений $\tilde{n}_s$ записывается функционал ошибки и минимизируется с использованием метода наименьших квадратов:

$$\Phi = |R_{\text{sample}} - R_{\text{theory}}|^2, \quad R_{\text{sample}} = \frac{I_{\text{sample}}}{I_{\text{mirror}}}, \quad (6)$$

где коэффициент отражения образца R_{sample} определяется экспериментально как отношение интенсивности сигнала I_{sample} , отраженного от выходного окна в

контакте с образцом, к интенсивности сигнала I_{mirror} , отраженной от эталонного зеркала, расположенного на выходном конце эквивалентного волновода без выходного окна (рис. 7).

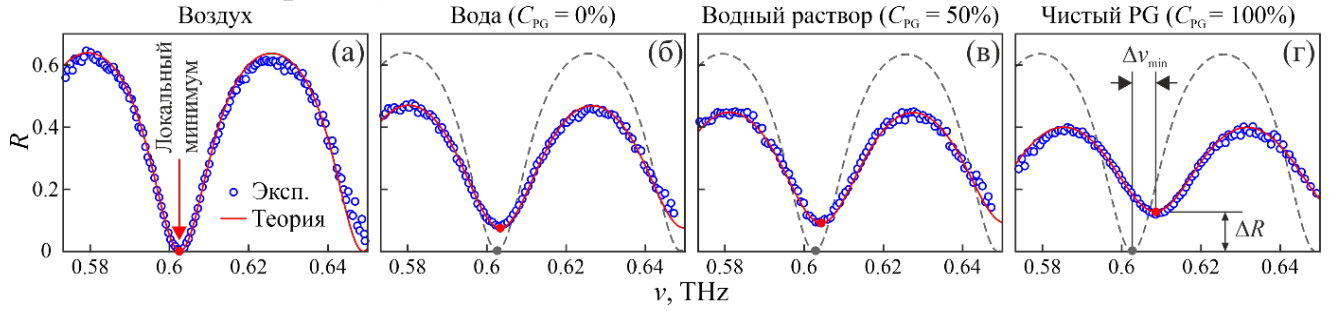


Рис. 7 – Коэффициенты отражения (по интенсивности) эндоскопа, контактирующего с (а) воздухом, (б) водой ($C_{\text{PG}} = 0\%$), (в) 50% раствором пропиленгликоля (PG) ($C_{\text{PG}} = 50\%$) и (г) чистым PG ($C_{\text{PG}} = 100\%$). [A5]

Процесс численного моделирования, оптимизации конструкции и изготовления ТГц эндоскопа на основе антирезонансного сапфирового волновода описан в **разделе 3.2**. Сапфир (монокристаллический $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) оптически прозрачен в широком спектральном диапазоне, обладает высоким показателем преломления, механической и радиационной прочностью, химической инертностью и биосовместимостью. Выращенные методом EFG (edge-defined film-fed growth) профилированные кристаллы сапфира обладают оптическим качеством поверхности, а оптимизация параметров выбранной геометрии волновода методом собственных мод позволила получить сочетание низкой дисперсии, потерь при распространении в пределах 2.5 – 3.9 дБ/м для основной моды низшего порядка [A6].

Раздел 3.3 посвящен экспериментальной проверке разработанного метода. ТГц эндоскоп в составе лабораторного стенда на основе лампы обратной волны был применен для изучения ТГц показателя преломления n и коэффициента поглощения α нескольких тестовых объектов. Для верификации результатов тестовые объекты были дополнительно исследованы при помощи импульсного ТГц спектрометра (рис. 8). Это позволило подтвердить, что разработанный ТГц эндоскоп и метод восстановления диэлектрических характеристик путем анализа резонансов Фабри-Перо позволяют с высокой точностью оценивать оптические параметры исследуемых объектов в ТГц диапазоне как в сильно ($\alpha \sim 100 \text{ см}^{-1}$), так и в слабо ($\alpha \sim 10 \text{ см}^{-1}$) поглощающих средах.

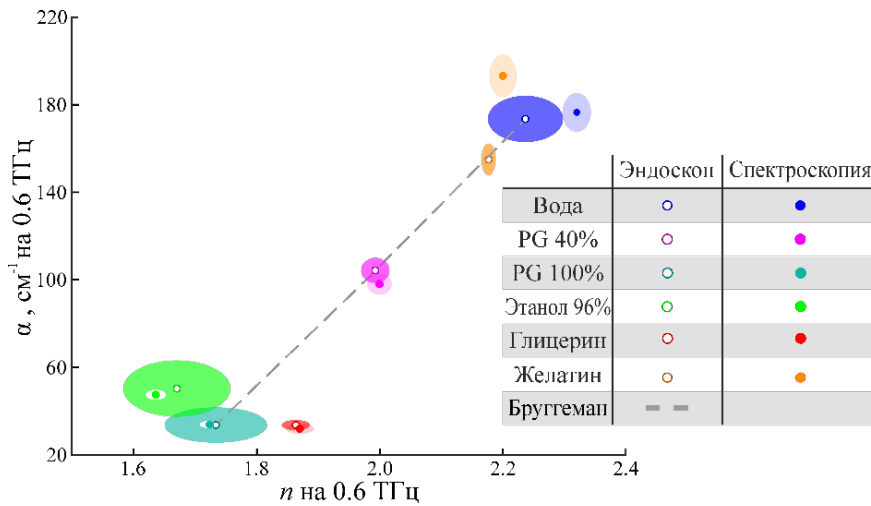


Рис. 8 – Сравнение результатов измерения α на частоте 0,6 ТГц, полученных при помощи ТГц эндоскопа и ТГц импульсного спектрометра. Маркеры соответствуют средним значениям, а эллиптические области – доверительным интервалам. [A4]

В качестве дальнейшей оптимизации ТГц эндоскопа был разработан сапфировый фокусирующий элемент, работающий на основе эффекта твердотельной иммерсии (сапфировая иммерсионная линза – СИЛ) [A6, A7], что подробно описано в **разделе 3.4**. Полученные результаты численного моделирования методом конечных разностей во временной области (FDTD) показали, что выбранная конструкция [A8] фокусирующего элемента эндоскопа (**рис. 9 (б)**) может обеспечивать субволновое ограничение поля на небольшом расстоянии позади эндоскопа ($\ll \lambda$), где фокальная плоскость почти совпадает с задней плоской поверхностью выходного окна эндоскопа.

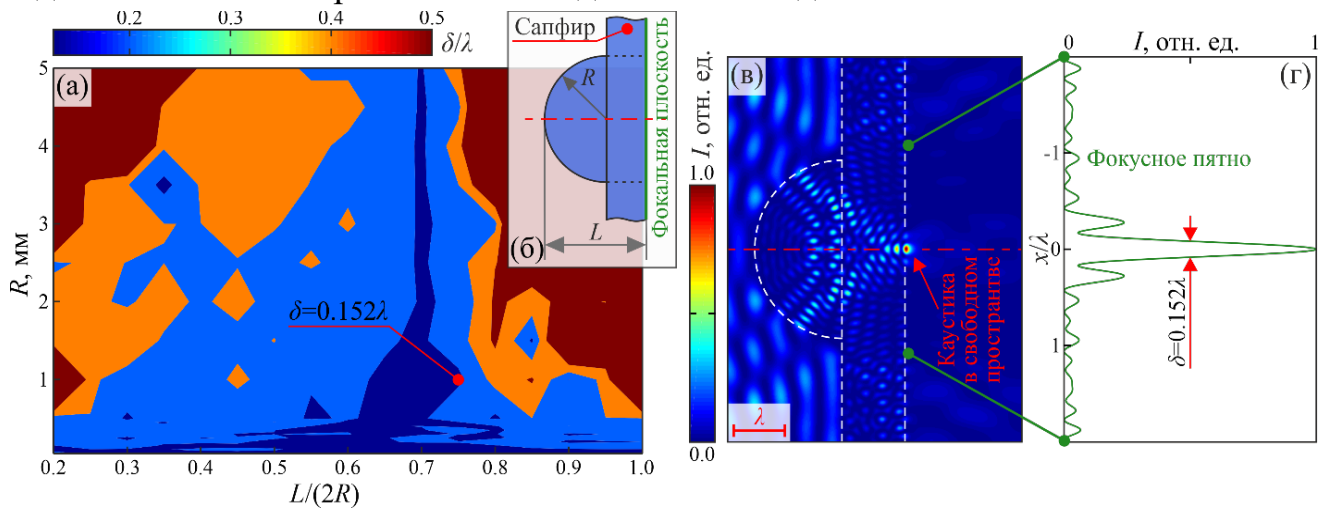


Рис. 9 – Численная оптимизация геометрических параметров СИЛ методом FDTD при $\lambda = 500$ мкм. (а) Пространственное разрешение δ как функция радиуса R и нормированной толщины $L/(2R)$. (б) Схема СИЛ с радиусом R и общей толщиной L , состоящей из полусферы и плоскопараллельной пластины. (в), (г) Интенсивность поля $I \propto |E|^2$ для СИЛ с $R = 1$ мм и $L = 1,5$ мм и фокусное пятно в свободном пространстве, соответственно. [A6]

Фокусирующий элемент с оптимизированными геометрическими параметрами был изготовлен и соединен с выходным концом сапфирового антирезонансного волновода. Экспериментальное исследование полученной конструкции продемонстрировало пространственное разрешение $\approx 0,19\lambda$ (в направлении, перпендикулярном вектору электрического поля E) и $\approx 0,2\lambda$ (вдоль

Е) (рис. 10). Наблюдаемое относительно малое расхождение свидетельствует о согласованности теории и эксперимента и, таким образом, подтверждает преимущества использования предложенной конфигурации ТГц сверхразрешающего эндоскопа.

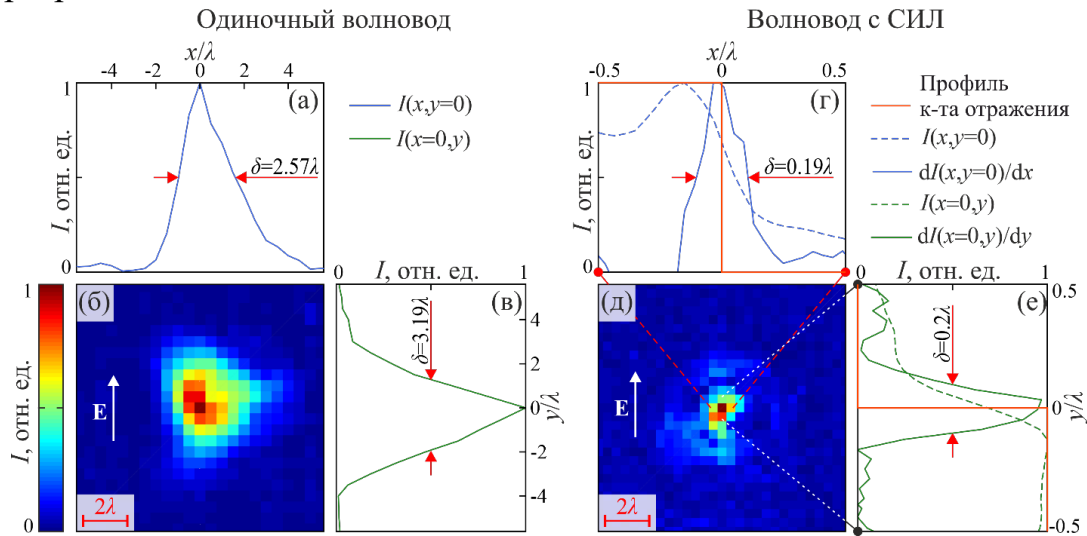


Рис. 9 – Измеренные интенсивности ТГц поля $I \propto |E|^2$ за одиночным волноводом и волноводом с СИЛ. (а)–(в) Интенсивность поля и сечения за одиночным волноводом. (д) Интенсивность поля за системой волновод–СИЛ. (г), (е) Поперечные сечения интенсивности поля и фокусные пятна за системой волновод–СИЛ. [А6]

Полученные в диссертации **основные результаты**, направленные на решение важной проблемы развития методов исследования ТГц параметров биологических тканей, в том числе, труднодоступных, с учетом поглощения и рассеяния излучения в них, сформулированы в **заключении**.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Полученные в диссертации результаты направлены на решение важной проблемы развития методов исследования ТГц параметров биологических тканей, в том числе, труднодоступных, с учетом поглощения и рассеяния излучения в них.

Основные результаты диссертации:

1. Предложена новая математическая модель описания диэлектрического отклика многокомпонентной поглощающей среды в ТГц диапазоне, позволяющая учитывать эффекты рассеяния.

2. Экспериментально изучена применимость теории эффективной среды для описания диэлектрического отклика рассеивающих сильно поглощающих сред в ТГц диапазоне. Показано, что распространение ТГц волн в таких системах с точностью 6% может быть описано при помощи теории эффективной среды в широком диапазоне размеров ($d \leq 0,47\lambda$) и объемных долей ($f_v \leq 0,2$) рассеивателей.

3. Изучен характер рассеяния ТГц излучения в неоднородных поглощающих средах. Показано, что несмотря на сильный анизотропный характер рассеяния ТГц излучения на одиночной частице с размерами, характерными для неоднородностей мягких тканей, эффектами рассеяния в таких средах можно пренебречь из-за существенного поглощения.

4. Разработан фантом биологической ткани с варьируемыми размерами и концентрациями рассеивающих включений, имитирующий структурные и оптические параметры гидратированных тканей в ТГц диапазоне. Экспериментально измерены в ТГц диапазоне оптические параметры фантомов с различными параметрами рассеивателей. Полученные значения соответствуют типичным значениям для гидратированных биологических тканей.

5. Предложен и экспериментально апробирован метод ТГц эндоскопии, основанный на анализе резонансов Фабри-Перо и позволяющий измерять ТГц комплексный показатель преломления труднодоступных объектов.

6. Предложена и экспериментально апробирована модификация ТГц эндоскопа, обладающая сверхвысоким пространственным разрешением, на основе сапфирового антирезонансного волновода, соединенного с сапфировой иммерсионной линзой. Экспериментально продемонстрировано, что пространственное разрешение такого эндоскопа достигает $\approx 0,19\lambda$ и $\approx 0,2\lambda$ (в направлении, перпендикулярном и параллельном вектору электрического поля, соответственно).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК и индексируемых в международных базах данных:

- A1. Chernomyrdin, N.V. Terahertz technology in intraoperative neurodiagnostics: A review / N.V. Chernomyrdin, G.R. Musina, P.V. Nikitin, I.N. Dolganova, **A.S. Kucheryavenko**, A.I. Alekseeva, Y. Wang, D. Xu, Q. Shi, V.V. Tuchin, K.I. Zaytsev // Opto-Electronic Advances. – 2023. – Vol. 6, № 5. – Art. 220071.
- A2. Katyba, G.M. Terahertz endoscopy of hard-to-access objects in the context of neoplasms diagnosis – A review / G. M. Katyba, N. V. Chernomyrdin, I. N. Dolganova, **A. S. Kucheryavenko**, Q. Shi, P. V. Aleksandrova, D. S. Ponomarev, S. V. Garnov, I. V. Reshetov, V. V. Tuchin, V. N. Kurlov, M. Skorobogatiy, and K. I. Zaytsev// Light: Advanced Manufacturing. – 2025. – Vol. 6. – Art. 58.
- A3. **Kucheryavenko, A.S.** Terahertz-wave scattering in tissues: Examining the limits of the applicability of effective-medium theory / A.S. Kucheryavenko, I.N. Dolganova, A.A. Zhokhov, V.M. Masalov, G.R. Musina, V.V. Tuchin, N.V.

Chernomyrdin, A.A. Gavdush, D.R. Il'enkova, S.V. Garnov, and K.I. Zaytsev // *Physical Review Applied*. – 2023. – Vol. 20. – Art. 054050.

- A4. **Кучерявенко, А.С.** Фантом мягких тканей человека для терагерцовой визуализации и спектроскопии / **А.С. Кучерявенко**, И.Н. Долганова, Н.В. Черномырдин, А.А. Гавдуш, Д.Р. Ильенкова, Д.Д. Рыбников, В.М. Масалов, В.В. Тучин, К.И. Зайцев // *Оптика и спектроскопия*. – 2024. – Т. 132, № 3. – С. 320–327.
- A5. Katyba, G.M. Terahertz refractometry of hard-to-access objects using the sapphire endoscope suitable for harsh environments / G.M. Katyba, S.P. Lebedev, **A.S. Kucheryavenko**, I.N. Dolganova, N.V. Chernomyrdin, M.G. Burdanova, I.E. Spektor, M. Skorobogatiy, V.N. Kurlov, K.I. Zaytsev // *Applied Physics Letters*. – 2024. – Vol. 124, № 24. – Art. 243703.
- A6. **Kucheryavenko, A.S.** Super-resolution THz endoscope based on a hollow-core sapphire waveguide and a solid immersion lens / **A.S. Kucheryavenko**, V.A. Zhelnov, D.G. Melikyants, N.V. Chernomyrdin, S.P. Lebedev, V.V. Bukin, S.V. Garnov, V.N. Kurlov, K.I. Zaytsev, and G.M. Katyba // *Optics Express*. – 2023. – Vol. 31, № 8. – P. 13366–13373.
- A7. **Кучерявенко, А.С.** Сочетание полого сапфирового волновода и иммерсионной линзы для ТГц эндоскопии сверхвысокого разрешения / **А.С. Кучерявенко**, В.А. Желнов, Н.В. Черномырдин, В.Н. Курлов, К.И. Зайцев и Г.М. Катыба // *Оптика и спектроскопия*. – 2023. – Т. 131, № 6. – С. 880 – 887.

Патент РФ на изобретение:

- A8. Пат. 2790924 Российская Федерация, МПК G 02 В 6/10. Волновод с субволновой фокусировкой для терагерцовой эндоскопии / **Кучерявенко А.С.**, Долганова И.Н., Катыба Г.М., Шикунова И.А., Курлов В.Н., Зайцев К.И., Черномырдин Н.В. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН). – № 2021131202; заявл. 25.10.2021; опубл. 28.02.2023, Бюл. № 7. – 11 с.: ил. 3.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang X. Biomedical Applications of Terahertz Spectroscopy and Imaging / X. Yang, X. Zhao, K. Yang [et al.] // *Trends in Biotechnology*. – 2016. – Vol. 34. – Iss.10. – P. 810-824.
2. Yan Z. THz medical imaging: from in vitro to in vivo / Z. Yan, L.-G. Zhu, K. Meng [et al.] // *Trends in Biotechnology*. – 2022. – Vol. 40. – Iss.7. – P. 816-830.

3. Zaytsev K.I. The progress and perspectives of terahertz technology for diagnosis of neoplasms: a review / K. I. Zaytsev, I. N. Dolganova, N. V Chernomyrdin [et al.] // *Journal of Optics*. – 2020. – Vol. 22. – Iss.1. – P. 013001.
4. Lindley-Hatcher H. Real time THz imaging—opportunities and challenges for skin cancer detection / H. Lindley-Hatcher, R. I. Stantchev, X. Chen [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2021. – Vol. 118. – Iss.23.
5. Smolyanskaya O.A. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids / O. A. Smolyanskaya, N. V. Chernomyrdin, A. A. Konovko [et al.] // *Progress in Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 62. – P. 1-77.
6. Chernomyrdin N.V. Reflection-mode continuous-wave 0.15λ -resolution terahertz solid immersion microscopy of soft biological tissues / N. V. Chernomyrdin, A. S. Kucheryavenko, G. S. Kolontaeva [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2018. – Vol. 113. – Iss.11. – P. 111102.
7. Chernomyrdin N.V. Terahertz Microscope Based on Solid Immersion Effect for Imaging of Biological Tissues / N. V. Chernomyrdin, A. S. Kucheryavenko, E. N. Rinskaya [et al.] // *Optics and Spectroscopy*. – 2019. – Vol. 126. – Iss.5. – P. 560-567.
8. Kucheryavenko A.S. Terahertz dielectric spectroscopy and solid immersion microscopy of ex vivo glioma model 101.8: brain tissue heterogeneity / A. S. Kucheryavenko, N. V. Chernomyrdin, A. A. Gavdush [et al.] // *Biomedical Optics Express*. – 2021. – Vol. 12. – Iss.8. – P. 5272.
9. Chernomyrdin N.V. Quantitative polarization-sensitive super-resolution solid immersion microscopy reveals biological tissues' birefringence in the terahertz range / N. V Chernomyrdin, D. R. Ilenkova, V. A. Zhelnov [et al.] // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – P. 16596.
10. M. I. Mishchenko. Far-field Lorenz–Mie scattering in an absorbing host medium: Theoretical formalism and FORTRAN program / M. I. Mishchenko, P. Yang // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2018. – Vol. 205. – P. 241-252.
11. B. Gorshunov. Terahertz BWO-Spectroscopy / B. Gorshunov, A. Volkov, I. Spektor [et al.] // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – 2005. – Vol. 26. – Iss.9. – P. 1217-1240.
12. B. P. Gorshunov. Terahertz BWO spectroscopy of conductors and superconductors / B. P. Gorshunov, A. A. Volkov, A. S. Prokhorov [et al.] // *Quantum Electronics*. – 2007. – Vol. 37. – Iss.10. – P. 916-923.
13. M. Born. Principles of Optics. 6th Edition / M. Born, E. Wolf. – Pergamon, 1980.
14. I. Pupeza. Highly accurate optical material parameter determination with THz time-domain spectroscopy / I. Pupeza, R. Wilk, M. Koch // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15. – Iss.7. – P. 4335-4350.