

Отзыв
официального оппонента
на диссертационную работу Гавдуша Арсения Алексеевича
«Исследование комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных
сред на основе новых методов терагерцовой импульсной спектроскопии»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Диссертация Гавдуша Арсения Алексеевича посвящена разработке оригинальных методов исследования комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред с помощью терагерцовой импульсной спектроскопии. Разработанные в работе методы позволяют исследовать многослойные образцы и преодолевать программными методами неопределенность оценки их параметров, что делает возможным измерение терагерцового диэлектрического отклика биологических тканей и жидкостей, аморфных кристаллов и других специфических сред и образцов. Интерес к области терагерцовой спектроскопии обозначенных материалов связан с рядом факторов. Во-первых, комплексная диэлектрическая проницаемость конденсированных сред в терагерцовом диапазоне является одной из наиболее важных физических характеристик, которая несет информацию об их микроскопической динамике, структурных особенностях и коллективных/одночастичных возбуждениях, позволяет решать задачи идентификации веществ, разрабатывать новые методы медицинской диагностики, проводить неразрушающий контроль материалов. Во-вторых, существующие методы обработки результатов терагерцовой импульсной спектроскопии испытывают определенные трудности при проведении исследований многослойных образцов, некоторые параметры которых являются априорно неизвестными. Обозначенные факторы обуславливают актуальность тематики диссертационной работы. В теоретическом отношении значимость полученных автором результатов характеризуется косвенным подтверждением постоянства морфологии лабораторных аналогов межзвездных и околозвездных льдов, выращиваемых с использованием стандартных методик лабораторной астрофизики. Практическая значимость результатов определяется: а) разработкой методики создания образцов аналогов межзвездных льдов постоянной морфологии, подходящих для проведения терагерцовых и инфракрасных спектроскопических экспериментов; б) полученными зависимостями терагерцового диэлектрического отклика гиперосмотических агентов и их водных растворов, а также здоровых тканей мозга человека и глиом различной степени злокачественности. Кроме того, результаты диссертационной работы демонстрируют возможность использования терагерцовой импульсной спектроскопии для решения задач медицинской диагностики новообразований, в том числе интраоперационной.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемых литературных источников. В завершении глав приведены промежуточные выводы. Общий объем диссертации составляет 159 страниц (в том числе 44 рисунка, 4 таблицы и библиография из 450-и наименований).

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования. Изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В **Первой главе** рассмотрено современное состояние исследований в области терагерцовой спектроскопии конденсированных сред. Обсуждаются ключевые работы по освоению терагерцовой части электромагнитного спектра, прослежено историческое развитие соответствующей инструментально-технологической базы. Проведен анализ особенностей взаимодействия терагерцового излучения с веществом. На основании обзора

современной инструментальной базы терагерцовой техники и существующих методов решения обратных задач спектроскопии сформулированы цель и задачи диссертации.

Во **Второй главе** описывается разработанный метод восстановления комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред при обработке сигналов терагерцового импульсного спектрометра. Автором предлагается универсальный подход к формированию модели распространения терагерцовых импульсов в многослойных средах и даны примеры применения метода для решения различных задач спектроскопии конденсированных сред. Приведены методы численного решения обратной задачи восстановления диэлектрического отклика, в том числе, при необходимости, уточнения значений параметров образца в ходе обработки результатов измерений. Разработан подход к оценке точности и устойчивости решения задачи как численными, так и аналитическими методами. Также автором создан алгоритм для численного уточнения толщин слоев исследуемого образца.

В **Третьей главе** диссертации разработанные методы терагерцовой импульсной спектроскопии применяются для измерений спектров комплексной диэлектрической проницаемости ряда конденсированных сред. Последовательно описываются схемы использованных экспериментальных установок, обоснована необходимость разработки дополнительной оснастки для проведения спектроскопических экспериментов. Автором выявлены особенности терагерцового диэлектрического отклика нанопористого кремния, на основе искусственных опалов, что открывает возможности для создания новых материалов терагерцовой оптики с управляемыми оптическими характеристиками. Проведена серия измерений спектров терагерцовой диэлектрической проницаемости водных растворов гиперосмотических агентов, используемых для иммерсионного оптического просветления биотканей. Получены и проанализированы терагерцовые диэлектрические характеристики лабораторных аналогов межзвездных и околозвездных льдов углекислого газа при температуре около 15 К. Полученные результаты спектроскопии глиом мозга человека различной степени злокачественности и интактных тканей подтверждают высокий потенциал использования терагерцовых технологий в медицинской диагностике. Использование аппроксимации экспериментальных результатов с помощью моделей диэлектрического отклика позволило автору сделать вывод о природе выявленных различий и показать, что они связаны с содержанием воды в исследованных тканях.

В **Общих выводах и заключении** обобщаются результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

Полученные автором результаты опубликованы в 28 статьях в высокорейтинговых научных журналах, среди которых стоит отметить *Astronomy & Astrophysics* (квартиль по Web of Science: Q1, Impact Factor: 5.636), *Optical Materials Express* (Q1, 3.064), *Biomedical Optics Express* (Q1, 3.921), *Journal of Biomedical Optics* (Q2, 2.785). Представленные результаты также докладывались на российских и международных научных мероприятиях.

В качестве замечаний и вопросов можно привести следующие.

1) В Главе 1 (раздел 1.4) при рассмотрении различных экспериментальных установок для проведения терагерцовых измерений можно было более подробно описать методику *одновременного* определения фазы и амплитуды сигнала в экспериментах, использующих схемы с лампами обратной волны, а также привести ссылки на уже известные работы.

2) Анализ диэлектрического отклика нанопористого кремния на основе искусственных опалов выполнен автором с помощью модели Бруггемана для эффективной диэлектрической проницаемости. Насколько можно уменьшить погрешности при анализе экспериментальных результатов, если учитывать также вклад закрытых пор? Как сильно на результатах сказывается выбор модели Бруггемана, если сравнивать с анализом, который можно было бы выполнить, основываясь на более строгом соотношении Лихтенеккера?

3) В Главе 3 при изложении результатов спектроскопии лабораторного аналога межзвездного льда окиси углерода не показана особенность спектра на частоте 2,5 ТГц, о

которой автор упоминает в тексте. С чем это связано? На Рис. 3.20 приведены лишь некоторые диэлектрические характеристики исследованных образцов, соответствующие наиболее толстому образцу. Возможны ли отличия в характеристиках льда при измерениях образцов меньшей толщины? С чем связан выбор конкретных результатов измерения для отображения в диссертации и отказ от более привычного представления средних значений и соответствующей дисперсии результатов?

Приведенные выше замечания и вопросы не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, они скорее являются приглашением к проведению дальнейших исследований в рамках выбранного автором направления. Работа выполнена на высоком научном уровне и представляет оригинальные и актуальные результаты. Достоверность полученных результатов и обоснованность сформулированных выводов не вызывают сомнений.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы, положений, выносимых на защиту, новизну, теоретическую и практическую значимости.

Считаю, что диссертация Гавдуша Арсения Алексеевича «Исследование комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред на основе новых методов терагерцовой импульсной спектроскопии» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне и полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а соискатель – А.А. Гавдуш – достоин присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент – **Горшунов Борис Петрович**

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, профессор, заведующий лабораторией терагерцовой спектроскопии ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Адрес: 141701, РФ, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Тел.: +7 916 582 8501, e-mail: bpgorshunov@gmail.com

Я даю согласие на обработку персональных данных (приказ Минобрнауки России от 01.07.2015 г. № 662)

Горшунов Б. П.

24.09.2011

ПОДПИСЬ РУКИ

ЗАВЕРЯЮ:

ЗАВЕДУЮЩАЯ КАНЦЕЛЯРИЕЙ

АДМИНИСТРАТИВНОГО ОТДЕЛА

М.А. ГУСЕВА

Горшунов
