

**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 измерению поглощения и преломления ряда конденсированных сред с помощью терагерцовой (ТГц) импульсной спектроскопии, а также созданию оригинальных методов обработки экспериментальных данных. Предлагаемые автором решения расширяют диапазон доступных для проведения ТГц импульсной спектроскопии образцов, что позволяет исследовать биологические ткани, в том числе *in vivo*, а также многослойные образцы, толщина слоёв в которых априорно неизвестна.

Актуальность темы диссертации обусловлена большим числом ограничений, в рамках которых должны укладываться образцы и приборы современной ТГц импульсной спектроскопии. Вместе с тем, задача нахождения ТГц комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред важна для многих фундаментальных и практических приложений, среди которых идентификация веществ, медицинская диагностика, исследование динамики носителей в полупроводниках.

Диссертация содержит новые научные результаты, среди которых необходимо отметить:

– метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости многослойных образцов в ТГц диапазоне с одновременной оценкой толщины слоев, основанный на знании о положениях пиков импульсов переотражений;

– метод обработки результатов ТГц импульсной спектроскопии в экспериментальной схеме на отражение через опорное окно, с введением предварительной корректировки сигналов на основе корреляционного анализа;

– результаты систематического измерения спектров поглощения и преломления в ТГц диапазоне множества гиперосмотических агентов для ряда концентраций их водных растворов;

– результаты измерения ТГц отражения глиом мозга человека различной степени злокачественности с выявлением характерных спектральных форм, а также анализ природы полученного диэлектрического отклика с использованием моделей диэлектрической проницаемости воды;

– результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости лабораторных аналогов межзвездных и околозвездных льдов, впервые полученные в ТГц диапазоне.

Наибольшей практической значимостью из упомянутых результатов обладают результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости здоровых тканей мозга человека и глиом различной степени злокачественности. Важно, что данные измерения проведены в геометрии на отражение, это подтверждает возможность использования ТГц импульсной спектроскопии *in-vivo* и неинвазивно при медицинской диагностике.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Главы диссертации оканчиваются подведением промежуточных выводов. Результаты всех измерений приведены в конце третьей главы. Обзор литературы составляет первую главу.

Общий объем диссертации – 159 страниц (среди которых 44 рисунка, 4 таблицы и библиография из 450-и наименований).

Во **Введении** обоснована актуальность работы, на её основе сформулированы цель и задачи исследования. Изложены научная новизна, выносимые на защиту положения, перечислены методы исследования, обоснована теоретическая и практическая значимость работы. Представлены данные об апробации результатов на конференциях и об опубликовании в периодической печати. Описана структура работы.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу существующих работ и методов в области ТГц спектроскопии и обзору особенностей взаимодействия вещества с ТГц излучением. На основании этих данных сформулированы актуальные цель и задачи диссертации.

**Вторая глава** посвящена разработке физико-математических моделей для описания взаимодействия импульсов ТГц излучения с образцами нескольких различных конфигураций. В этой главе приведена разработка методов восстановления комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред при обработке сигналов ТГц импульсного спектрометра. Примеры применения универсального подхода для решения различных задач спектроскопии порождают метод одновременной оценки толщины слоев образца, алгоритм дополнительной корректировки сигналов с применением корреляционного анализа. Изложены подходы к оценке точности и устойчивости решения обратной задачи ТГц импульсной спектроскопии, на основе которых автором получен алгоритм для численного уточнения толщин слоев образца.

**Третья глава** связана с применением разработанных методов ТГц импульсной спектроскопии для характеристики ряда веществ. Измерена комплексная диэлектрическая проницаемость нанопористого  $\text{SiO}_2$  на основе искусственных опалов, выявленная зависимость диэлектрического отклика от пористости образцов показывает возможность создания новых материалов ТГц оптики с заданными оптическими характеристиками. Осуществлены измерения комплексной диэлектрической проницаемости водных растворов гипертонических агентов применяемых для иммерсионного оптического просветления биотканей. Впервые измерены ТГц оптические и диэлектрические характеристики лабораторных аналогов межзвездных и околозвездных льдов CO при температуре  $\sim 15$  К. На основании результатов спектроскопии глиом мозга человека различной степени злокачественности и интактных тканей сделаны выводы о возможности различать эти ткани по отражённому ТГц сигналу. Аппроксимация полученного диэлектрического отклика с помощью моделей Дебая и Лоренца подтверждает вывод о природе наблюдаемого контраста, ассоциируемого с содержанием и состоянием воды в исследованных биотканях.

**В Общих выводах и заключении** подведены итоги диссертационной работы.

Результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых журналах (28 статей в таких изданиях, как *Biomedical Optics Express*, *Journal of Biomedical Optics*, *Astronomy & Astrophysics*, *Optical Materials Express*) и представлены на российских и международных конференциях, что свидетельствует о высоком качестве работы.

По диссертации могут быть сделаны некоторые замечания и задан ряд вопросов.

1) Во введении про ТГц диапазон (0.1-10 ТГц) традиционно говорится, что он был ранее практически недостижим, а появление лазерно-импульсных методов (time-domain spectroscopy, ТДС) привело к его освоению. Это всё так, но ТДС надёжно характеризует спектры веществ на частотах ниже 3 ТГц, преимущества и особенности ТГц диапазона при этом в работе описываются для частот до 10 ТГц. Это важная разница частот, поскольку собственных частот и спектральных резонансов у молекул в веществах в конденсированном состоянии не наблюдается методами ТДС для частот ниже 3 ТГц. Те молекулярные резонансы о которых говорится во введении для обоснования поставленной

цели наблюдаются методами Фурье-спектроскопии и на частотах выше 5-7 ТГц, что не относится к цели работы, кроме того у ТДС метода здесь недостаточный динамический диапазон. Для работы по методам импульсной ТГц спектроскопии актуально описывать только фонные, кристаллические резонансы, как различные спектральные особенности. Вторая нестыковка частот в работе между Таблицей 2 и приведёнными графиками. При заявленном диапазоне ТДС спектрометров до 4 ТГц, большинство спектров веществ приведено до 1.5 ТГц, максимум до 2.5 ТГц.

2) Один из развитых методов – аподизация сигнала с помощью временного окна. Оправданно ли размещать центр окна (и центр измеряемой выборки) в момент прихода основного импульса (рис. 2.2)? Для ТДС сигнала в левой половине выборки при этом сигнал заведомо нулевой. (При нижней используемой частоте 0.1 ТГц, только 10 пс слева от импульса несут полезную информацию). Можно половину времени измерений сэкономить, не записывая «нули» и шум до прихода сигнала. Выгодней левый край окна размещать около главного импульса. Решалась ли задача получить наилучший спектр вещества за фиксированное время измерения? Если да, то какие оптимальные для данных спектрометров получились параметры: число усреднений, длительность выборки, толщина образца? С какой точностью совпадают Ваши данные с ранее известными в литературе (по спектру поглощения дистиллированной воды, например)? Новый метод надо подтвердить согласием результата по известным веществам.

3) При анализе измеренных спектров биотканей справедливо используется общепринятая модель ТГц спектра воды, причём известно (рис. 3.22), что ширина спектрального отклика обоих релаксационных процессов составляет около двух порядков по частоте. Измеряемый же частотный диапазон при этом захватывает только один порядок, содержащий дальнюю часть правого склона «медленной релаксации» и левую половину «быстрой» релаксации, чей вклад мал. Чувствительность в этом диапазоне к параметрам процессов не настолько высока, чтобы применять аппроксимацию по пяти переменным. Предпочтительней выделить наиболее влиятельный процесс (изменение концентрации свободной воды) и одну-две переменные (например,  $\epsilon_{\infty}$  и  $\Delta\epsilon_1$ ) и анализировать их при фиксированных остальных, менее влиятельных параметрах. Решалась ли задача расширения спектрального диапазона ТДС в низкие частоты, где чувствительность к воде и дисперсия её спектрального отклика выше?

Указанные замечания и вопросы не изменяют отличного впечатления от работы. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и гармонично сочетает разработку численных подходов с их практической реализацией при проведении ряда экспериментальных исследований. Достоверность оригинальных и актуальных результатов не вызывает сомнений.

Автореферат полностью передает содержание и результат диссертационной работы.

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 её автор – А.А. Гавдуш – достоин присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент – **Назаров Максим Михайлович**  
Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика,  
начальник лаборатории сверхсильных световых полей, подразделение НБИКС-пт, НИЦ  
«Курчатовский институт».

Адрес: 123182, РФ, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.  
Тел.: +7 499 196 95 39, e-mail: [nazarov\\_mm@nrcki.ru](mailto:nazarov_mm@nrcki.ru)

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

Назаров М. М.

22.09.2021

Подпись к. ф.-м. н.,  
Начальника лаборатории ССА  
М. М. Назарова заверяю

Главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский Институт»

\_\_\_\_\_ Еремин И.И.