

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки

«Институт физики высоких давлений

им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук»

академик РАН \_\_\_\_\_ Бражкин В.В.

«27» сентября 2021 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

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

#### **Актуальность темы исследования**

Диссертационная работа посвящена исследованию комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред, а именно, биологических тканей, гиперосмотических агентов для просветления биотканей и аморфных кристаллов, с использованием новых методов терагерцовой (ТГц) импульсной спектроскопии, связанных с уточнением или оценкой различных параметров изучаемых образцов, а также корректировкой исходных сигналов спектрометра. Комплексная диэлектрическая проницаемость, связанная с микроскопической динамикой и коллективными возбуждениями в конденсированных средах, является одной из наиболее важных физических характеристик вещества. Поскольку собственные частоты возбуждений в широкополосных спектрах жидкостей, кристаллов и биотканей могут быть найдены в ТГц области частот, ТГц спектроскопия является одним из основных инструментов исследования мягкой материи. Большинство ранее разработанных методов решения обратной задачи ТГц импульсной спектроскопии предполагает изучение образцов простой геометрии, в то время как значительная часть экспериментальных задач не может быть решена в таких условиях. Таким образом, разработка новых методов решения обратных задач ТГц импульсной спектроскопии для исследования комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред является актуальной задачей.

#### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертации является измерение комплексной диэлектрической проницаемости биотканей, гиперосмотических агентов для просветления биотканей и аморфных кристаллов с помощью новых экспериментальных методов ТГц импульсной спектроскопии, сопряженных с уточнением или оценкой априорно-неизвестных геометрических параметров изучаемых образцов и корректировкой сигналов спектрометра.

#### **Структура, содержание и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации – 159 страниц. Библиография включает 450 наименований. В автореферате перечислены основные публикации автора по теме диссертации.

Во введении приведено обоснование актуальности работы, указаны цель и задачи исследования, научная новизна, выносимые на защиту положения, методы исследования, теоретическая и практическая значимость работы. Введение завершают данные об апробации результатов и их опубликовании в научных журналах, а также охарактеризована структура работы.

Первая глава содержит литературный обзор, посвященный истории развития исследований в ТГц области спектра и современной инструментальной базе ТГц спектроскопии. Проанализированы особенности взаимодействия ТГц излучения с конденсированными средами, существующие методы ТГц спектроскопии и методы решения обратных задач ТГц импульсной спектроскопии, что позволяет сформулировать цель и задачи диссертации.

Во второй главе описана разработка новых методов восстановления комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред по результатам ТГц импульсной спектроскопии. Последовательно изложены принципы построения физико-математических моделей взаимодействия ТГц излучения с веществом, особенности решения актуальных спектроскопических задач с использованием преимуществ универсального подхода. Предложены метод одновременной оценки толщины слоев образца и его оптических характеристик, алгоритм дополнительной корректировки сигналов с применением корреляционного анализа. Проведено численное моделирование для оценки точности и устойчивости решения обратной задачи ТГц импульсной спектроскопии, выявлены характерные особенности возникающих погрешностей. Предложен алгоритм численного уточнения толщин слоев образца.

Третья глава посвящена исследованию комплексной диэлектрической проницаемости ряда конденсированных сред с помощью разработанных методов ТГц импульсной спектроскопии. Показаны схемы использованных экспериментальных установок и их параметры, а также дополнительная оснастка. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образцов из нанопористого  $\text{SiO}_2$  на основе искусственных опалов выявляет потенциал для создания новых материалов ТГц оптики с управляемыми оптическими характеристиками. Систематически исследован диэлектрический отклик водных растворов ряда гиперосмотических агентов для иммерсионного оптического просветления биотканей. Предложена методика создания образцов лабораторных аналогов межзвездных и околозвездных льдов для проведения ТГц импульсной спектроскопии, впервые получены ТГц оптические и диэлектрические характеристики льдов CO при температуре  $\sim 15$  К. Показана возможность проведения медицинской диагностики методами ТГц спектроскопии для глиом мозга человека различной степени злокачественности, сделаны выводы о природе наблюдаемого диэлектрического отклика исследованных тканей, ассоциируемого с содержанием воды в них.

В общих выводах и заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

### **Научная новизна исследования и полученных результатов**

В диссертационной работе создан метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости многослойных образцов с одновременной оценкой толщины слоев, основанный на знании о положениях пиков интерференционных импульсов, при обработке сигналов ТГц импульсного спектрометра. Схожим образом создан метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости образцов при обработке результатов ТГц



импульсной спектроскопии в экспериментальной схеме на отражение, с введением предварительной корректировки сигналов спектрометра на основе корреляционного анализа. Предложен метод оценки спектрально неоднородной погрешности восстановления комплексной диэлектрической проницаемости образцов путем проведения численного моделирования. На основании систематической погрешности восстановления диэлектрического отклика в зависимости от ошибки определения толщин слоев образца предложен метод их программного уточнения. Впервые систематически исследованы диэлектрические и оптические свойства водных растворов гиперосмотических агентов для просветления биотканей в ТГц диапазоне спектра. Продемонстрирована возможность проведения медицинской диагностики глиом мозга человека различной степени злокачественности методами ТГц импульсной спектроскопии. Впервые измерена комплексная диэлектрическая проницаемость лабораторных аналогов межзвездного и околозвездного льда CO при температуре  $\sim 15$  К.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы**

Теоретической значимостью обладает выявленная линейность роста лабораторных аналогов межзвездных и околозвездных льдов CO при постоянной температуре  $\sim 15$  К в большом диапазоне толщин, что косвенно подтверждает постоянство морфологии образцов льда, выращиваемых с использованием стандартных методик лабораторной астрофизики.

Практической значимостью при решении задачи создания новых элементов ТГц оптики обладают результаты исследования комплексной диэлектрической проницаемости нанопористого SiO<sub>2</sub> на основе искусственных опалов. Возможность использования ТГц импульсной спектроскопии при осуществлении медицинской диагностики новообразований, в том числе интраоперационной, подтверждена результатами спектроскопии глиом мозга человека различной степени злокачественности. Результаты ТГц спектроскопии водных растворов гиперосмотических агентов для просветления биотканей позволяют сформировать рекомендации по их выбору для решения различных задач биофизики.

### **Соответствие содержания диссертации заявленной научной специальности**

Диссертация полностью соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, в части формулы специальности:

«Основой специальности является теоретическое и экспериментальное исследование природы кристаллических и аморфных, неорганических и органических веществ в твердом и жидком состояниях и изменение их физических свойств при различных внешних воздействиях»;

в части областей исследования:

«Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы и дисперсные системы»;

«Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами».

### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат полностью отражает содержание, научные положения, выводы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость диссертации, содержит информацию об основных результатах и позволяет сделать заключение о научном уровне работы.

## **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, личный вклад автора**

Экспериментальные результаты получены на современном оборудовании, на основе апробированных измерительных методов. Основным методом исследования является ТГц импульсная спектроскопия. Достоверность выводов основана на соответствии результатов теоретических, численных и экспериментальных исследований.

На основе диссертации и автореферата можно сделать вывод, что численное моделирование, экспериментальные исследования, обработка их результатов и последующий анализ выполнены автором лично, либо при его непосредственном участии. В процессе работы над диссертацией разработана теоретическая физико-математическая модель взаимодействия импульсов ТГц излучения с веществом. Автор принимал участие в сборе и юстировке экспериментальных стендов на основе ТГц импульсных спектрометров для проведения измерений. Также автором программно реализованы методы обработки исходных сигналов спектрометра. Во всех случаях заимствования материалов в диссертации указаны ссылки на литературные источники.

### **Апробация работы**

По результатам диссертации опубликовано 28 работ, входящих в перечень ВАК РФ и в базы цитирования Scopus / Web of Science. Результаты докладывались на 11 научных мероприятиях (из которых 10 – международные).

### **Замечания по содержанию диссертации**

1) В Главе 2 упомянуты, но не рассмотрены подробно такие методы первичной обработки сигналов, как вейвлетная и винеровская фильтрация. Высокий потенциал их использования для подавления паразитной части исходных сигналов спектрометра мог быть рассмотрен совместно со стандартными методами аподизации, а результаты подвергнуты сравнению.

2) При разработке универсальной физико-математической модели взаимодействия импульсов ТГц излучения с многослойными образцами не приведено обобщение для произвольного числа слоев в образце. Также, проблема описания взаимодействия излучения с веществом при углах падения, отличных от нормального, может быть приведена более подробно.

3) В Главе 3 автором приведены результаты спектроскопии межзвездных и околозвездных льдов СО. Несмотря на упоминание в тексте видимости линии на 2,5 ТГц, она не показана на рис. 3.20. Также не приведены спектральные погрешности восстановления характеристик, в том числе, в зависимости от толщин исследованных льдов.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и имеют характер пожеланий.

### **Заключение по работе**

Диссертация «Исследование комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред на основе новых методов терагерцовой импульсной спектроскопии» А. А. Гавдуша является законченной, самостоятельной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком уровне. Автореферат и опубликованные работы верно отражают содержание диссертации, результаты и выводы. Представленные результаты докладывались в основном на крупных международных семинарах и конференциях.

На основании изложенного, считаем, что диссертация Гавдуша Арсения Алексеевича «Исследование комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред на

основе новых методов терагерцовой импульсной спектроскопии» по актуальности, степени научной новизны и практической значимости, объему исследований и их ценности соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию Гавдуша А. А. «Исследование комплексной диэлектрической проницаемости конденсированных сред на основе новых методов терагерцовой импульсной спектроскопии» обсужден и утвержден на заседании общепитутского семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук (заседание от 27 сентября 2021 года).

#### **Отзыв составил**

Заместитель директора по науке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук,

д.ф.-м.н.

В.Н. Рьжов

27.09.2021 г.

#### **Сведения о ведущей организации**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук»

Почтовый адрес: 108840, г.Москва, г.Троицк, Калужское шоссе, стр. 14

Телефон: 8 (495)-851-05-82

Адрес электронной почты организации: [hpp@hppi.troitsk.ru](mailto:hpp@hppi.troitsk.ru)

Адрес официального сайта организации: <http://www.hppi.troitsk.ru/>

Ученый секретарь ИФВД РАН,  
к.ф.-м.н.

Т.В. Валянская