

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор Санкт-Петербургского
национального исследовательского
университета информационных
технологий, механики и оптики,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

В. Н. Васильев
« _____ » 2015 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации **Чопоровой Юлии Юрьевны**

на тему «Применение пучков монохроматического терагерцового излучения для исследования пространственных и спектральных характеристик конденсированных сред», представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация Ю.Ю. Чопоровой посвящена разработке методов экспериментального исследования конденсированных сред с использованием квазимонохроматического излучения терагерцового диапазона частот: методов терагерцовой голографии и терагерцовой эллипсометрии; а также развитию методов исследования с помощью пучков с орбитальным угловым моментом, до настоящего момента не использовавшиеся в ТГц спектральном диапазоне.

Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН на уникальном экспериментальном стенде с использованием квазимонохроматического излучения лазера на свободных электронах, которое может быть плавно перестроено в диапазоне длин волн 120 - 235 мкм, относящихся к ТГц диапазону частот. В работе показано, что используя ТГц излучение лазера на свободных электронах можно исследовать объекты и среды, получать их изображения и определять оптические параметры. Два разных метода исследования - голография и эллипсометрия были адаптированы для данной экспериментальной установки. В ТГц голографии автору удалось достигнуть рекордного для терагерцового диапазона пространственного разрешения в восстановленных изображениях объектов равного 0.2 мм при длине волны 0.13 мм. Для восстановления голограмм автором разработано программное обеспечение, позволяющее восстанавливать изображения, используя различные математические методы. Голографический метод визуализации объектов был впервые применен в терагерцовой области спектра для сильнопоглощающих объектов в спектрометре нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Методом эллипсометрии с блоком НПВО с рекордной для ТГц диапазона частот точностью были измерены комплексные показатели поглощения жидкостей. В работе также были получены поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) при дифракции бесселевых ТГц пучков с орбитальным угловым моментом. Причем, было выяснено, что механизм формирования плазмон-поляритонов зависит от локального направления вектора Пойнтинга.

Диссертация Ю.Ю. Чопоровой состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе описана экспериментальная станция лазера на свободных электронах Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, приемники и оптические элементы для управления ТГц излучением, используемые в работе. В главе также представлены результаты исследования характеристик кремниевых дифракционных оптических элементов, таких как делители пучка, фокусаторы, моданы и линзы Френеля, используемых для формирования заданных пространственных распределений интенсивности и модового состава мощных квазимонохроматических ТГц пучков.

Вторая глава посвящена описанию эллипсометра терагерцового диапазона, его тестированию и измерению тестовых образцов. Эллипсометр работает по схеме «поляризатор-образец-анализатор» с вращающимся анализатором. Эллипсометрические параметры вычисляются из зависимости интенсивности от азимутального положения анализатора через коэффициенты Фурье при двойной частоте. На тестовых образцах была продемонстрирована точность вычисления комплексного показателя преломления равная ± 0.05 для действительной и мнимой частей показателя преломления, на длине волны излучения 147 мкм. Показано, что ТГц эллипсометр позволяет измерять одновременно толщины пленок крови (от нескольких мкм до мм) и их показатель преломления. Для измерения комплексного показателя преломления водных растворов эллипсометр был дополнен модулем нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Анализ чувствительности показал, что оптимальный угол падения на образец составляет примерно 33 градуса. Также найдено, что ввод излучения в призму НПВО по нормали обеспечивает сдвиг фаз аналогичный четверть-волновой пластинке, причем, благодаря низкой дисперсии кремния, в широком диапазоне длин волн. Достигнута рекордная для терагерцового диапазона частот точность в определении комплексного показателя преломления водосодержащих растворов - 0.02 для действительной и мнимой частей показателя преломления.

В третьей главе описан используемый метод терагерцовой голографии, позволяющий «мгновенно» записывать голограмму в реальном времени, с последующим восстановлением изображения численными методами. Большая, по сравнению с видимым диапазоном, длина волны излучения вносит особенности в выбор оптимальных схем записи и восстановления голограмм. Голограммы в работе были записаны по осевой схеме Габора с помощью двух изображающих устройств ТГц диапазона. Запись и восстановления выполнены для длины волны излучения 130 мкм. Было продемонстрировано восстановление изображения амплитудных и амплитудно-фазовых объектов с приемлемым качеством. Показаны области применимости методов численного восстановления, для двух используемых приемников. Максимальное пространственное разрешение было получено для тестового объекта – миры, при записи на матричный микроболометрический приемник на расстоянии 33 мм и численном восстановлении методом точного вычисления интеграла Рэлея-Зомерфельда в плоскости

действительного изображения. В качестве применения голографии продемонстрировано восстановление объектов находящихся на двух разных расстояниях и для скрытых объектов. Впервые в ТГц диапазоне были получены изображения объектов на поверхности НПВО призмы методом голографии, причем с высоким временным разрешением.

В четвертой главе изучена возможность генерации и использования терагерцовых пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ) для исследования конденсированных сред и проведено исследование диэлектрических слоев с помощью квазимонохроматических бесселевых пучков с ОУМ. Пучки с ОУМ были сформированы с помощью кремниевой бинарной дифракционной пластинки. На основе особенностей наблюдаемых при дифракции пучка с ОУМ на полуплоскости, а также интерференции его с гауссовым пучком или в опыте Юнга, были предложены несколько методов регистрации топологического заряда пучка, используя интерференционные и дифракционные оптические методы. Несмотря на отличия при формировании бесселева пучка бинарным элементом были продемонстрированы уникальные свойства этих пучков: самовосстановление и бездифракционность.

В данной работе были впервые в терагерцовом спектральном диапазоне сформированы поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) с помощью бездифракционного квазимонохроматического бесселева пучка. Реализовано это было методом дифракции на краю стеклянного сегмента цилиндра с золотым покрытием и изучаемыми слоями ZnS различной толщины (толщины слоев изучаемых методом ППП, на несколько порядков меньше, чем эллипсометрическим методом). Было обнаружено, что эффективность генерации ППП не является симметричной по отношению к оптической оси и зависит от направления вектора Пойнтинга закрученного пучка. Изменение направления вращения луча приводит к исчезновению плазмонов с одной стороны и генерации их на другой. Это явление, которое еще предстоит исследовать более подробно, может быть использовано, в частности, для создания плазмонных переключателей.

Раздел "Приложение" посвящен вычислению дифракционной эффективности элементов. Основные результаты диссертационной работы резюмированы в Заключении.

Следует отметить, что диссертационная работа выполнена на достаточно высоком уровне. Полученные результаты неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и были опубликованы в ведущих научных журналах. **Достоверность** результатов, полученных в диссертации Ю.Ю. Чопоровой, подтверждается большим объемом тщательно проанализированных экспериментальных данных, которые не противоречат теоретическим положениям и результатам других авторов.

Научная новизна исследования несомненна, в частности, впервые в мире реализована установка терагерцовой голографии в реальном времени. **Среди наиболее важных новых результатов** отметим голографический метод получения изображения сильнопоглощающих объектов в спектрометре нарушенного полного внутреннего отражения; оптимизирован алгоритм восстановления изображений с максимальным пространственным разрешением. С использованием системы НПВО была продемонстрирована рекордная чувствительность эллипсометрических исследований для

изучения сильно поглощающих жидкостей. Впервые сформированны и исследованы квазимонохроматические «бездифракционные» терагерцовые бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом. Разработан комплекс методов для определения топологического заряда пучка. С помощью сформированных пучков, были впервые получены поверхностные плазмон-поляритоны, на металл-диэлектрических поверхностях. **Вышеперечисленные результаты являются новыми или пионерскими.**

Диссертация отличается большим объемом выполненной работы, ясностью изложения результатов. Тем не менее, имеется ряд замечаний к представленному в диссертации материалу.

1. Формулировки положений, представленных к защите, выбраны не совсем удачно, не до конца раскрывают значимость, и сильные стороны работы, а именно:
 - Положение 1: «Визуализация частично прозрачных в терагерцовом диапазоне трехмерных объектов в режиме реального времени методом классической голографии» без дополнительного анализа литературы, не позволяет понять, в чем основная заслуга автора, перед аналогичными работами. Главный акцент здесь следовало сделать на словах - ограничителях «в режиме реального времени».
 - Положение 2: «Измерение комплексного показателя преломления водосодержащих растворов методом эллипсометрии с модулем нарушенного полного внутреннего отражения» не содержит информации о преимуществах и сильных сторонах предложенного метода (увеличение точности на два порядка, по сравнению с существующими на данный момент методиками).
2. В своей работе, в параграфе 3.2 автор рассматривает «Цифровые методы восстановления голограмм». Однако, здесь присутствует несколько неточностей: автор рассматривает интеграл «Рэля-Зоммерфельда», и далее по тексту - «численно его можно решить через свертку...» подразумевая метод плоских волн, который тут же описан. Затем идет параграф «восстановление суммированием сферических полей», в котором утверждается, что «возможно более точное, но и гораздо более медленное восстановление через суммирование полей от каждой точки голограммы в каждую точку восстанавливаемого изображения, по правилу Гюйгенса-Френеля». Метод плоских волн действительно выводится из интеграла Рэля-Зоммерфельда, но при его численной реализации используется быстрые преобразования Фурье. Поэтому появляются ошибки численного счета, присущие этому способу вычисления интеграла Рэля-Зоммерфельда (которые диссертант и описывает далее в параграфе 3.4). Прямой же способ расчета интеграла Рэля-Зоммерфельда такой же ресурсоемкий, как рассматриваемый способ суммирования сферических полей. При этом, он обеспечивает более точные результаты, чем способ суммирования сферических полей, благодаря нормировке сферических полей, имеющейся уравнении (к сожалению, не пронумерованном) в п. 3.2.3 на стр. 74. Таким образом, полученные далее выводы несколько некорректны.
3. Небрежность в оформлении материала:
 - Порядок защищаемых положений не соответствует порядку глав в диссертации.

- В тексте диссертации встречаются места (стр. 31, 38, и 39), где, по-видимому, планировались к размещению ссылки на литературу, однако вместо номеров ссылок стоят вопросительные знаки, а сами ссылки отсутствуют.
- Уравнения не пронумерованы.
- Имеют место орфографические ошибки.

Несмотря на сделанные замечания, диссертация представляет собой законченную работу, в процессе выполнения которой получено большое количество экспериментального материала и проведен его детальный анализ. Результаты анализа находятся в соответствии с современными теоретическими представлениями. Основные выводы диссертации обладают новизной.

Автореферат и публикации по теме исследований достаточно полно отражают основное содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы Ю.Ю. Чопоровой и методы в ней разработанные **могут быть использованы** для дальнейших научных исследований в области ТГц оптики в НИУ ИТМО, МГУ им. М.В. Ломоносова, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПбГУ, ИПФ РАН и др.

Считаем, что диссертационная работа Ю.Ю. Чопоровой по своему содержанию и полученным в ходе исследований результатам удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики. Автор диссертации, Чопорова Юлия Юрьевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв подготовил

заместитель заведующего кафедры по научной работе
кафедры фотоники и оптоинформатики

Санкт-Петербургского национального исследовательского
университета информационных технологий, механики и оптики
доктор физико-математических наук, профессор

В.Г. Беспалов

Настоящий отзыв заслушан и утвержден на заседании научного семинара кафедры фотоники и оптоинформатики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики 17 ноября 2015 г., протокол № 10.

Заведующий кафедрой фотоники и оптоинформатики

Санкт-Петербургского национального исследовательского
университета информационных технологий, механики и оптики
доктор физико-математических наук, профессор

С.А. Козлов

Ученый секретарь Ученого совета Университета ИТМО
доктор технических наук, профессор



М.Я. Марусина