

На правах рукописи

ЧОПОРОВА Юлия Юрьевна

**ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

КНЯЗЕВ – доктор физико-математических наук,
Борис Александрович профессор. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

АНЦЫГИН – кандидат физико-математических наук,
Валерий Дмитриевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск, старший научный сотрудник.

ШКУРИНОВ – доктор физико-математических наук,
Александр Павлович Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, доцент физического факультета

ВЕДУЩАЯ – Федеральное государственное автономное
ОРГАНИЗАЦИЯ образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «_____» декабря 2015 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Терагерцовый (ТГц) спектральный диапазон, широкие исследования которого, начались сравнительно недавно, привлекает к себе внимание в связи с перспективами его использования во многих приложениях. В качестве примера можно привести системы безопасности и дистанционного контроля, биомедицинскую диагностику, исследование материалов и объектов, и прочие направления. С самого начала освоения этого диапазона стало ясно, что приборы и методы, развитые для исследований в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах, редко можно использовать без их модификации, а часто требуется разработка совершенно новых методов и устройств. Это связано как с особенностями отклика среды на ТГц излучение (из-за малой энергии фотона электромагнитное излучение взаимодействует с иными резонансами, чем более энергетичные фотоны), так и с тем, что большая длина волны (тысячи и десятки тысяч нанометров) диктует специфические требования к оптическим системам и детекторам (в частности, очень большую роль играют дифракционные эффекты). Этот диапазон лежит на границе фотоники и электроники, а, следовательно, в нем могут в равной мере использоваться приборы и методы, характерные для этих двух областей физики.

На сегодняшний день терагерцовый диапазон осваивается, главным образом, с помощью метода импульсной терагерцовой спектроскопии (ИТС), который в оригинале звучит как “time domain spectroscopy” (TDS). Очевидным достоинством этого метода является возможность прямого измерения амплитуды и фазы спектральных компонент сигнала. Однако, имеются и очевидные недостатки. Прежде всего, это – низкая эффективность преобразования светового импульса в терагерцовое излучение (10^{-6}), что в ряде случаев может ограничивать прошедший сигнал до малой величины, которую трудно измерить. Вторым недостатком является невозможность измерить сигнал в реальном времени, поскольку при технической реализации метода ИТС для регистрации временной формы импульса необходимо сканировать время задержки зондирующей части светового пучка. Третьей проблемой является, например, большое время, требуемое для получения изображения. Кроме того, имеются оптические методы, в которых использование монохроматического излучения является принципиально важным. К таким методам, например, можно отнести эллипсометрию. При исследовании сложных молекул их отклик на возбуждение монохроматическим излучением может существенно отличаться от отклика на той же частоте при возбуждении широким спектром из-за конформационных переходов и/или возбуждения комбинированных мод колебаний и вращений. Одним из важнейших направлений в области терагерцовых исследований является формирование изображений.

Терагерцовое излучение позволяет исследовать характеристики материалов, которые трудно или невозможно исследовать, используя ИК, видимое и рентгеновское излучение. Уникальным изображающим методом является терагерцовая голография, позволяющая по зарегистрированной интерференционной картине восстановить амплитудные и фазовые характеристики объекта.

Экспериментальные исследования в данной работе были выполнены, используя излучение Новосибирского лазера на свободных электронах (Новосибирского ЛСЭ) — самого мощного в мире, перестраиваемого по частоте, источника монохроматического излучения в диапазоне от 40 до 240 мкм. Развитие технологий производства компактных монохроматических источников терагерцового излучения (приведем в качестве примера квантовые каскадные лазеры) позволит использовать приборы и методы, разработанные в данной работе, на установках лабораторного масштаба, а в дальнейшем и в практических приложениях.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию новых методов исследования пространственных и спектральных характеристик конденсированных сред в ТГц диапазоне спектра — классической ТГц голографии, эллипсомерии, в том числе в элементах нарушенного полного внутреннего отражения, а также развитию методов исследования конденсированных сред с помощью пучков с орбитальным угловым моментом, до настоящего момента не использовавшиеся в ТГц спектральном диапазоне. В частности, используя их, мы впервые сформировали поверхностные плазмон-поляритоны, используемые для исследования поверхностей.

Цель работы

Целью работы являлась разработка методов исследования объектов и конденсированных сред в терагерцовом диапазоне частот, в том числе изображающих методов с высоким пространственным разрешением.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим и заключается в разработке новых для терагерцового диапазона частот методов исследования пространственных характеристик конденсированных сред, в создании соответствующей экспериментально-макетной техники и анализе экспериментальных данных.

Результаты диссертационной работы несут следующую **научную и практическую значимость:**

Апробирован новый метод оптической записи голограмм в терагерцовом диапазоне с помощью термочувствительного люминесцентного экрана, наряду с записью на матрицу микроболометров. Достигнуто

предельное пространственное разрешение изображений в осевой голографии терагерцового диапазона.

Впервые в терагерцовой области спектра разработан и применен голографический метод получения изображений сильнопоглощающих объектов в спектрометре нарушенного полного внутреннего отражения, причем с высоким временным разрешением.

Терагерцовая эллипсометрия с элементом нарушенного полного внутреннего отражения дает возможность измерять оптические константы сильно поглощающих жидкостей, в том числе биологических объектов с рекордной точностью.

Впервые получены и исследованы «бездифракционные» терагерцовые бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом, которые могут быть применены для спектроскопии киральных сред, манипуляции частицами, а также в системах коммуникации и зондирования.

Обнаруженная нами зависимость эффективности генерации поверхностных плазмон-поляритонов от направления закрученности пучка с орбитальным угловым моментом может быть использована для создания плазмонных переключателей для оптоэлектронных интегральных схем терагерцового диапазона.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Визуализация частично прозрачных в терагерцовом диапазоне трехмерных объектов в режиме реального времени методом классической голографии;
2. Измерение комплексного показателя преломления водосодержащих растворов методом эллипсометрии с модулем нарушенного полного внутреннего отражения;
3. Формирование поверхностных плазмон-поляритонов методом дифракции на краю образца бесселевым пучком с орбитальным угловым моментом;

Апробация диссертации

Материалы, на которых основана диссертация, докладывались на Международных конференциях по инфракрасным, миллиметровым и терагерцовым волнам (2011, г. Хьюстон; 2012, г. Воллонгонг; 2013, г. Майнц; 2014, г. Тусон; 2015, г. Гонгконг), на Международных конференциях по Новейшим лазерным технологиям (2013, г. Будва; 2014, г. Касси; 2015, г. Фару), на 16й Международной конференции «Лазерная оптика», (2014, г. Санкт-Петербург), на Международных конференциях «Терагерцовое излучение: генерация, детектирование и применение» (2010, г. Новосибирск, 2012, г. Москва), на Национальной конференции по использованию синхротронного излучения (2012, г. Новосибирск), на Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (2011,

г. Нижний Новгород), и опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения и изложена на 154 страницах, включая 94 иллюстрации, и содержит 149 наименований библиографии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность поставленной научной задачи, определяемая необходимостью разработки новых методов, ставятся цель и задачи диссертации.

В первой главе рассмотрен принцип работы Новосибирского ЛСЭ и перечислены основные параметры его излучения. Приведено описание методов детектирования терагерцового излучения использованных в диссертационной работе: пироэлектрического детектора, термочувствительного люминесцентного экрана и неохлаждаемого матричного микроболометрического приемника. Рассмотрены принципы работы и основные параметры данных приемников в терагерцовом диапазоне, а также представлены результаты исследований их характеристик, используя излучение Новосибирского ЛСЭ.

Важным этапом освоения любого нового диапазона электромагнитного спектра, обеспечивающим рост качества экспериментальных результатов, является разработка новых элементов для управления излучением. Приведенные в первой главе результаты исследований характеристик дифракционных оптических элементов продемонстрировали возможность формирования заданных пространственных распределений интенсивности и модового состава мощных монохроматических пучков Новосибирского ЛСЭ.

Во второй главе сформулированы общие принципы эллипсометрических исследований в ТГц диапазоне, приведен обзор существующих методов с альтернативными источниками терагерцового излучения. В основе работы терагерцового эллипсометра лежит динамическая фотометрическая схема «поляризатор-образец-анализатор» с вращающимся анализатором. Представлены результаты измерения тестовых образцов – измерения «на просвет», что соответствует измерению тестового образца с $p=1$, и кремниевого клина. Результаты измерений на тестовых образцах демонстрируют точность работы эллипсометра $\delta\Psi \leq 0.3$ и $\delta(\cos\Delta) \leq 0.01$, что позволило применить ТГц эллипсометр для изучения высушенных пленок крови на поверхности кремния (от нескольких мкм до мм). Показано, что эллипсометрия позволяет измерять одновременно

толщины пленок и их комплексный показатель преломления с точностью ± 0.05 при длине волны излучения $\lambda=147$ мкм, однако, при больших толщинах (около 10 мкм) или меньшей длине волны (около 50 мкм) она может возрасти на порядок.

Измерение комплексного показателя преломления водосодержащих растворов возможно при дополнении терагерцового эллипсометра модулем нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Анализ чувствительности эллипсометрических параметров к изменению оптических констант водных растворов, помещенных на поверхность призмы НПВО, показал, что наибольшая чувствительность достигается в диапазоне углов падения на грань образца около 33 градусов. Такой угол падения на рабочую грань легко обеспечить благодаря преломлению при использовании кремниевой 45° равнобедренной треугольной призмы и ввода излучения перпендикулярно к рабочей грани. Измерения показателя преломления тестовых жидкостей, в которых достигнута рекордная для терагерцового диапазона частот точность в определении комплексного показателя преломления водосодержащих растворов, равная 0.02 и для n , и для k , показаны на Рис. 1. Проведены первые эксперименты по исследованию форменных элементов крови, пациентов с патологией, а также у условно здоровых, обследуемых для выявления различий в оптических показателях.

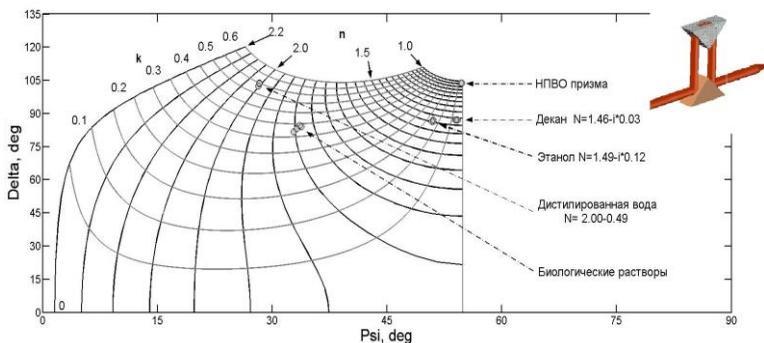


Рис. 1. Эллипсометрические измерения показателя преломления жидкостей. Координатная сетка номограмм: линии постоянного показателя преломления и постоянного показателя поглощения. Точки соответствуют экспериментальным данным для НПВО призмы в отсутствие образца, декана, этанола, дистиллированной воды и биологических образцов.

Третья глава посвящена разработке голографических методов получения изображений в ТГц диапазоне. Глава содержит теоретический обзор методов оптической записи и численного восстановления голограмм. Для реализации “классической” голографии в терагерцовом диапазоне были применены два изображающих устройства для записи голограмм:

термочувствительный люминесцентный экран и неохлаждаемый матричный микроболометрический приемник. Записанные на цифровой носитель голограммы ТГц диапазона могут быть восстановлены только численно. Изображения тестового объекта - миры, были получены численно методом расчета дифракции электромагнитной волны на записанной голограмме в плоскости действительного изображения, используя шесть численных методов восстановления голограмм: с помощью расчета дифракции на голограмме интеграла Френеля-Кирхгофа с использованием свертки и преобразования Фурье, с помощью расчета интеграла Рэля-Зоммерфельда, с помощью метода углового спектра или плоских волн, и метода суммирования сферических полей. Для удаления с изображений помех от высоких пространственных частот был использован метод аподизации голограмм.

Было показано теоретически и экспериментально, что изображения, восстановленные методом плоских волн, имеют наихудшее качество из-за наложения пространственных частот разных порядков. Если, однако, значительно увеличить эффективный размер голограммы, дополнив ее нулями, изображение успешно восстанавливается. С учетом этого, можно утверждать, что изображения амплитудных, и амплитудно-фазовых объектов приемлемого качества могут быть получены в терагерцовом диапазоне при восстановлении любым из указанных методов. Используя голограмму, записанную матричным микроболометрическим приемником при длине волны 130 мкм, методом точного вычисления интеграла Рэля-Зоммерфельда, было восстановлено действительное изображение объекта с пространственным разрешением, равным 0.2 мм (Рис. 2), близким к волновому пределу.

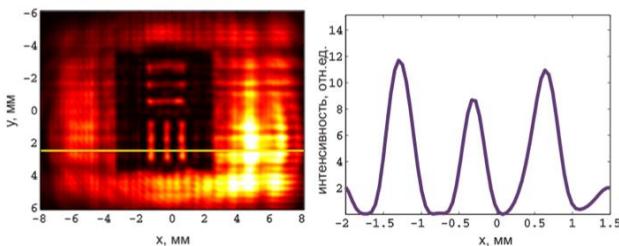


Рис. 2. Наилучшее пространственное разрешение в восстановленных изображениях. Изображение, восстановленное методом суммирования сферических полей, и сечение интенсивности вдоль линии на рисунке слева.

Метод нарушенного полного внутреннего отражения НПВО в терагерцовом диапазоне является едва ли не единственным способом оптического исследования характеристик водосодержащих растворов. Однако поглощающий объект, помещенный на поверхность призмы,

располагается в этом случае под углом к оптической оси. Поэтому формирование неискаженного изображения требует сканирования и, следовательно, не может выполняться в режиме реального времени. В диссертационной работе в качестве практического применения голографии был предложен голографический способ получения изображений объектов на поверхности призмы НПВО, с высоким временным разрешением. Голографическая запись была выполнена по схеме с опорной осевой волной. Основная часть излучения, преломляясь, взаимодействовала с объектом, формируя объектную волну. Опорная волна отражалась от передней грани кремниевой призмы и, пройдя через систему зеркал, интерферировала с объектной волной в плоскости матричного микроболометрического приемника. Используя уникальное свойство голографии, возможность восстановления из одной голограммы изображения в любой точке пространства, изображение поверхности, соответствовавшей поверхности призмы, восстанавливалось численно, используя интеграл Френеля-Кирхгофа.

В четвёртой главе изучена возможность генерации и использования терагерцовых пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ) для исследования конденсированных сред. Пучки с ОУМ были сформированы с помощью бинарных кремниевых спиральных фазовых дифракционных пластинок, освещаемых излучением Новосибирского ЛСЭ с длиной волны $\lambda = 141$ мкм, что позволило сформировать пучки с топологическим зарядом $l = \pm 1$, и $l = \pm 2$ (Рис. 3).

Поперечное распределение интенсивности сформированных пучков хорошо аппроксимируется бесселевой функцией первого рода первого порядка для $l = \pm 1$ и первого рода второго порядка для $l = \pm 2$. Мы исследовали угловой спектр полученного нами пучка, формируя его изображение в фокальной плоскости линзы. Вместо характерного для бесселевых пучков «идеального» кольца мы наблюдали в фурье-плоскости кольцо, состоящее из фрагментов спиралей. Дальнейшее исследование свойств пучков показало, однако, что степень отличия полученных нами пучков от бесселева пучка невелика. В частности, полученные пучки, также как и бесселевы пучки, являются «бездифракционными», что отличает их, например, от лаггер-гауссовых пучков. Они сохраняли амплитудное распределение интенсивности при распространении на расстояния вплоть до 160 мм (Рис. 3). Вторым уникальным свойством бесселевых пучков является свойство восстанавливать исходное распределение интенсивности после прохождения через небольшие препятствия и мутные среды. Было экспериментально показано, что полученные нами пучки обладают тем же свойством.

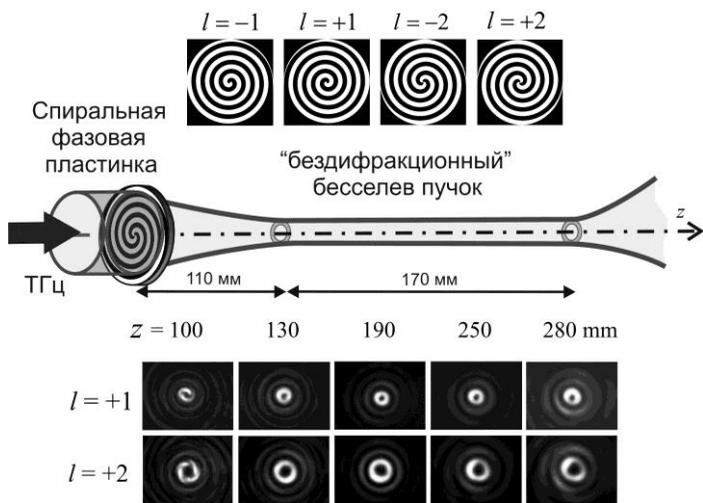


Рис. 3. Генерация терагерцовых пучков с ОУМ с помощью спиральной фазовой дифракционной пластины с топологическим зарядом $l = \pm 1$, $l = \pm 2$. Пучок с ОУМ формируется на расстоянии 110 мм и сохраняется вплоть до расстояний 270 мм от спиральной пластинки.

Для исследования характеристик терагерцовых пучков с орбитальным угловым моментом был создан комплекс методов, в основе которых лежат особенности дифракции и интерференции пучков с ОУМ, по сравнению с «незакрученными» пучками. Знак и величина топологического заряда пучка с ОУМ определялись по результату их дифракции на полуплоскости (смещение дифракционного максимума относительно оптической оси, см. Рис. 4, а) или в опыте Юнга с двумя щелями (изгиб интерференционных полос).

Характеристики закрученности пучка, а также форма волнового фронта, определялись при интерференции коллинеарных пучка с орбитальным угловым моментом и исходного гауссова пучка в интерферометре Маха-Цендера. Интерференционная картина, на расстоянии 260 мм от фазовой пластинки, имеет вид спиралей вложенных друг в друга, что не только подтверждает факт закрученности, но и указывает, на появление дифракционной расходимости пучка, обусловленной его конечным диаметром.

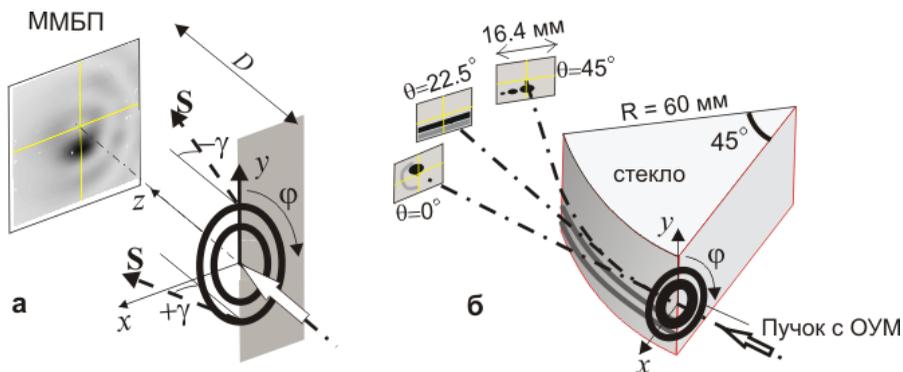


Рис. 4. (а) Дифракция пучка с ОУМ на полуплоскости. (б) Схема генерации поверхностных плазмон-поляритонов беселевым пучком с орбитальным угловым моментом.

Пучки с орбитальным угловым моментом были впервые использованы для генерации поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). Поверхностные плазмон-поляритоны формировались на образце (Рис. 4, б), представляющем собой сегмент стеклянного цилиндра, покрытого слоем золота толщиной 1 мкм и слоем ZnS толщиной 2 мкм. Плазмоны формировались методом дифракции на краю и распространялись вдоль цилиндрической поверхности. Достигнув края сегмента цилиндра, ППП трансформировались в свободную электромагнитную волну, интенсивность которой регистрировалась с помощью матричного микроболометрического приемника ($\theta = 45^\circ$). С помощью ММБП мы регистрировали также дифракцию падающего пучка на краю образца ($\theta = 0^\circ$) и радиационные потери плазмона при его движении по цилиндрической поверхности (см. Рис. 4, б, $\theta = 22.5^\circ$). Можно было ожидать, по аналогии с генерацией ППП незакрученными пучками, возникновение группы плазмонов с распределением интенсивностей симметричным относительно оптической оси. Однако неожиданно было обнаружено, что эффективность генерации поверхностных плазмонов существенным образом зависит от величины и направления топологического заряда падающего пучка. В случае пучков с $l = +1$ плазмоны генерировались только с одной стороны относительно оптической оси, а при изменении знака топологического заряда возникли на противоположной стороне. Для пучков с $|l| = 2$ тенденция сохранялась, хотя плазмоны слабой интенсивности могли возникать и на противоположной стороне. Возможным феноменологическим объяснением этого явления зависимость эффективности генерации поверхностных плазмон-поляритонов от локального направления вектора Пойнтинга (Рис. 4, а). Это явление, механизм которого еще предстоит исследовать более детально, может быть использовано, например, для

создания плазмонных переключателей в оптоэлектронных интегральных схемах.

В заключении изложены основные результаты, полученные в диссертации:

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Впервые реализованы на практике два метода записи голограмм в терагерцовом диапазоне: с помощью термочувствительного люминесцентного экрана и матричного микроболометрического приемника.
2. Показано, что, используя записанные этими приемниками голограммы, объемные изображения объектов могут быть восстановлены в виде распределения амплитуды и фазы, используя альтернативно шесть численных методов: прямое суммирование сферических полей от каждой точки голограммы, двумерное дискретное преобразование Фурье, приближение Френеля с помощью двумерной свертки, расчет интеграла Френеля-Кирхгофа с помощью двумерной свертки, расчет интеграла Рэлея-Зоммерфельда с помощью двумерной свертки, метод плоских волн (метод углового спектра). При использовании дополнительных приемов (аподизация и добавление нулей к записанной голограмме) все восстановленные изображения обладают хорошим качеством и приемлемым разрешением. При длине волны 130 мкм достигнуто рекордное, близкое к предельному для терагерцового диапазона, разрешение равное 0,2 мм
3. Впервые созданы и экспериментально апробированы две системы с использованием элемента полного внутреннего отражения для исследования сред, сильно поглощающих в терагерцовом диапазоне: голографическая система с опорным пучком и записью изображений в реальном времени и эллипсометр для измерения комплексного показателя преломления сильно поглощающих объектов.
4. Впервые сформированы и исследованы «бездифракционные» терагерцовые бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом, полученные с использованием дифракционного фазового элемента. Разработан и апробирован комплекс методов для определения топологического заряда пучка.
5. Впервые сформированы поверхностные плазмон-поляритоны терагерцового диапазона, используя пучки с орбитальным угловым моментом. Обнаружен новый эффект – зависимость эффективности генерации поверхностных плазмон-поляритонов от локального направления вектора Пойнтинга закрученного пучка.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Б. А. Князев, В. С. Павельев, В. Г. Сербо, Ю. Ю. Чопорова, Б. О. Володкин Закрученные пучки: от рентгена до радиодиапазона. // «Интерэкспо гео-сибирь». – 2015. – Т. 5, No 2.
2. A. N. Agafonov, Y. Y. Choporova, A. K. Kaveev, B. A. Knyazev, G. I. Kropotov, V. S. Paveleyev, K. N. Tukmakov, B. O. Volodkin. Control of transverse mode spectrum of Novosibirsk free electron laser radiation. // «Applied Optics». – 2015. – Т. 54, No 12. – С. 3635–3639.
3. И.А. Азаров, В.А. Швец, С.А. Дулин, С.В. Рыхлицкий, Б.А. Князев, Ю.Ю. Чопорова, В.Ю. Прокопьев, В.Н. Кручинин, М.В. Кручинина, Эллипсометр терагерцового диапазона. // ПТЭ, № 3, с. 71-78, 2015.
4. Yu. Yu. Choporova, B. A. Knyazev, M. S. Mitkov. Classical Holography in the Terahertz Range: Recording and Reconstruction Techniques // Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on. -2015. T.5, No 5, P. 836-844.
5. G.N. Kulipanov, E.G. Bagryanskaya, E.N. Chesnokov, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, Ya.V. Getmanov, S.L. Kiselev, B.A. Knyazev, V.V. Kubarev, S.E. Peltek, V.M. Popik, T.V. Salikova, M.A. Scheglov, S.S. Seredniakov, O.A. Shevchenko, A.N. Skrinsky, S.L. Veber, N.A. Vinokurov. Novosibirsk Free Electron Laser—Facility Description and Recent Experiments // Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on. -2015. T.5, No 5, 798-809
6. Yu. Yu. Choporova, I. A. Azarov, M. S. Mitkov, E. S. Baklanov, E. V. Grigorieva, V. S. Cherkassky, V. A. Shvets, B. A. Knyazev. Polarimetry at Novosibirsk terahertz free electron laser facility // 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – 2014.
7. А. Н. Агафонов, Б. О. Володкин, А. К. Кавеев, Б. А. Князев, Д. Г. Качалов, Г. И. Кропотов, В. С. Павельев, К. Н. Тукмаков, Д. И. Цыпишка, Ю. Ю. Чопорова. Фокусировка излучения лазера терагерцового диапазона (novofel) в соосный отрезок. // «Компьютерная оптика». 2014. Т. 39, No 1. С. 58–63.
8. А. Н. Агафонов, Б. О. Володкин, А. К. Кавеев, Б. А. Князев, Г. И. Кропотов, В. С. Павельев, К. Н. Тукмаков, Ю. Ю. Чопорова. Управление поперечно-модовым составом терагерцового лазерного излучения с помощью элементов бинарной кремниевой оптики // «Компьютерная оптика». – 2014. – Т. 38, No 4. – С. 763–769.
9. А. Н. Агафонов, М. Г. Власенко, Б. О. Володкин, В. В. Герасимов, А. К. Кавеев, Б. А. Князев, Г. И. Кропотов, В. С. Павельев, И. Г. Пальчикова, В. А. Сойфер, М. Ф. Ступак, К. Н. Тукмаков, Ю. Ю. Чопорова. Кремниевые дифракционные оптические элементы для мощного монохроматического излучения. // Автометрия. 2013. N2, Т 49. С. 98-105
10. Yu. Yu. Choporova, I. A. Azarov, M. S. Mitkov, E. S. Baklanov,

- E. V. Grigorieva, V. S. Cherkassky, V. A. Shvets, B. A. Knyazev. Terahertz Circular Dichroism Polarimeter with an Attenuated Total Reflection Module at Novosibirsk Free Electron Laser // 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – 2013.
11. А. Н. Агафонов, М. Г. Власенко, Б. О. Володкин, В. В. Герасимов, А. К. Кавеев, Б. А. Князев, Г. И. Кропотов, В. С. Павельев, И. Г. Пальчикова, В. А. Сойфер, М. Ф. Ступак, К. Н. Тукмаков, Е. В. Цыганкова, Ю. Ю. Чопорова. Дифракционные линзы для мощных пучков терагерцевого излучения. // Известия РАН, сер. Физическая. 2013. № 9, Т 77. С. 1330-1132
 12. А. Н. Агафонов, Б. О. Володкин, С. Г. Волоотовский, А. К. Кавеев, Б. А. Князев, Г. И. Кропотов, К. Н. Тукмаков, В. С. Павельев, Е. В. Цыганкова, Д. И. Цыпишка, Ю. Ю. Чопорова. Кремниевая оптика для фокусировки лазерного излучения терагерцевого диапазона в заданные двумерные области. // «Компьютерная оптика». – 2013. – Т. 37, No 4. – С. 464–470.
 13. Б. А. Князев, В. С. Черкасский, Ю. Ю. Чопорова, В. В. Герасимов, М. Г. Власенко, М. А. Демьяненко, Д. Г. Есаев, А. К. Никитин, Г. Н. Кулипанов, Н. А. Винокуров. Мощное монохроматическое терагерцевое излучение: метрологические аспекты. // «Научный вестник НГТУ». – 2013. – Т. 49, No 4. – С. 63–71.
 14. B. A. Knyazev, Y. Y. Choporova, V. V. Gerasimov, M. G. Vlasenko, V. S. Pavelyev, B. O. Volodkin, A. N. Agafonov, K. N. Tukmakov, A. K. Kaveev, G. I. Kropotov, E. V. Tsygankova, M. F. Stupak, I. G. Palchikova. Study of Diffractive Optical Elements Using High- Power Radiation of Novosibirsk Terahertz Free Electron Laser // 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – 2012.
 15. B. A. Knyazev, V. S. Cherkassky, Y. Y. Choporova, V. V. Gerasimov, M. G. Vlasenko, M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: comparative description of imaging techniques with examples of application. // «Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves», – 2011. – Т. 32, No 10. – С. 1207– 1222.
 16. Ю. Ю. Чопорова, М. Г. Власенко, В. В. Герасимов, Т. Н. Иргалин, Б. А. Князев, В. С. Черкасский. Запись и восстановление голограмм амплитудных объектов в терагерцевом диапазоне. // «Известия вузов. Радиофизика». – 2011. – Т. 54, No 8–9. – С. 649–655.
 17. B. A. Knyazev, V. S. Cherkassky, E. N. Chesnokov, Y. Y. Choporova, M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, V. V. Gerasimov, Y. V. Getmanov, T. N. Goryachkovskaya, E. I. Kolobanov, V. V. Kubarev, G. N. Kulipanov, L. E. Medvedev, E. V. Naumova, A. A. Nikitin, A. K. Nikitin, S. V. Miginsky, S. E. Peltek, B. Z. Persov, V. V. Pickalov, V. M. Popik, V. Y. Prinz, T. V. Salikova, M. A. Scheglov, S. S. Serednyakov, O. A. Shevchenko, A. N.

- Skrinsky, N. A. Vinokurov, M. G. Vlasenko, N. S. Zaigraevaю Novosibirsk terahertz free electron laser: Facility development and new experimental results at the user stations. // 2011 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – 2011.
18. Ю. Ю. Чопорова, М. Г. Власенко, В. В. Герасимов, Б. А. Князев, А. А. Никитин, В. С. Черкасский. Запись голограмм в терагерцовом диапазоне на лазере на свободных электронах. // «Вестник НГУ, сер. Физика». – 2010. – Т. 5, No 4. – С. 98–102.
19. B. A. Knyazev, A. L. Balandin, V. S. Cherkassky, Y. Y. Choporova, V. V. Gerasimov, M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, A. A. Nikitin, V. V. Pickalov, M. G. Vlasenko, D. G. Rodionov, O. A. Shevchenko, Classic holography, tomography and speckle metrology using a high-power terahertz free electron laser and real-time image detectors. // IEEE 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010). – 2010.

ЧОПОРОВА Юлия Юрьевна

**Применение пучков монохроматического терагерцового излучения для
исследования пространственных и спектральных характеристик
конденсированных сред**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор .10.2015 г.

Подписано в печать .10.2015 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.8 усл. печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 26

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11