

Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 535

ГРНТИ 29.31.15, 29.33.25, 29.35.03

Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
От имени Руководителя организации Проректор по научной работе _____/Гурбатов С.Н./ М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 6 этапа Государственного контракта
№ П385 от 11 мая 2010 г. и Дополнению от 09 марта 2011 г. № 1, Дополнению от 31
августа 2011 г. № 2

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.
Проект: Разработка высокоэффективных методов генерации терагерцевого излучения ультракороткими лазерными импульсами
Руководитель проекта: _____/Бакунов Михаил Иванович (подпись)

Нижегород
2012 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по Государственному контракту ПЗ85 от 11 мая 2010 на выполнение поисковых
научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Руководитель темы:

доктор физико-математических наук,
профессор _____ Бакунов М. И.
подпись, дата

Исполнители темы:

доктор физико-математических наук,
профессор _____ Гильденбург В. Б.
подпись, дата

кандидат физико-математических наук,
доцент _____ Жуков С. Н.
подпись, дата

кандидат физико-математических наук,
доцент _____ Захаров Ю. Н.
подпись, дата

кандидат физико-математических наук,
доцент _____ Введенский Н. В.
подпись, дата

кандидат физико-математических наук, без
ученого звания _____ Бодров С. Б.
подпись, дата

кандидат физико-математических наук, без
ученого звания _____ Царев М. В.
подпись, дата

кандидат физико-математических наук, без
ученого звания _____ Агрба П. Д.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Михайловский Р. В.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Машкович Е. А.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Семиков С. А.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Лаврентьев С. А.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Мальшев Н. К.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Горелов С. Д.
подпись, дата

Реферат

Отчет 89 с., 1 ч., 21 рис., 0 табл., 16 источн., 0 прил.

Нелинейная конверсия волн , источники терагерцового излучения , электрооптические кристаллы , оптический пробой , лазерная плазма

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 6 этапу Государственного контракта № ПЗ85 "Разработка высокоэффективных методов генерации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами" (шифр "НК-530П") от 11 мая 2010 по направлению "Оптика. Лазерная физика и лазерные технологии" в рамках мероприятия 1.2.1 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук" , направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - Разработка новых высокоэффективных методов генерации терагерцового излучения на основе нелинейного преобразования мощных ультракоротких лазерных импульсов при их взаимодействии с электрооптическими кристаллами, газовыми и плазменными средами. Использование разработанных методов для создания экспериментальных образцов компактных высокоэффективных источников терагерцового излучения.

Компьютерное моделирование, теоретический анализ, изготовление экспериментальных образцов.

Образцы электрооптического материала LiNbO₃, GaAs, GaP, кремниевые призмы. Фемтосекундный лазер "Tsunami". Фемтосекундный лазерный комплекс "Tsunami" + "Spitfire". Фемтосекундный лазерный комплекс тераваттного уровня мощности. Средства диагностики сверхкоротких лазерных импульсов. Установка для терагерцовой спектроскопии. Средства коллимации и регистрации терагерцового излучения. Средства автоматизации эксперимента National Instruments.

Сделана оценка полноты решения задач и эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем. Разработаны рекомендации по практическому использованию результатов НИР.

Разработаны рекомендации по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов.

Разработаны новые учебно-методические пособия, учебные курсы и лабораторные практикумы.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Аннотированная справка по научным результатам НИР, полученным на предыдущих этапах	8
1.1 Научные результаты, полученные на 1 этапе исследований	8
1.2 Научные результаты, полученные на 2 этапе исследований	10
1.3 Научные результаты, полученные на 3 этапе исследований	13
1.4 Научные результаты, полученные на 4 этапе исследований	15
1.5 Научные результаты, полученные на 5 этапе исследований	17
2 Аналитический отчет о проведении экспериментальных исследований	20
2.1 Генерация ТГц излучения в сэндвич-структуре при использовании оптической накачки нДж уровня энергии	20
2.2 Генерация широкополосного терагерцового излучения длинным плазменным каналом, возникающим при фокусировке в окружающий воздух мощных фемтосекундных лазерных импульсов аксиконной линзой	26
3 Отчет по обобщению и оценке результатов исследований	29
3.1 Обобщение результатов предыдущих этапов работ. Оценка полноты решения задач и эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем	29
3.1.1 Генерация терагерцовых поверхностных волн	29
3.1.2 Генерация объемного терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах с использованием сэндвич-структуры и лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивности	49
3.1.3 Разработка метода генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред	51
3.2 Разработка рекомендаций по практическому использованию результатов НИР	53

3.2.1 Оценка возможности применения схемы генерации широкополосного терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в сэндвич-структуре и применении лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивности	53
3.2.2 Оценка возможности применения метода генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред	54
3.2.3 Оценка возможности создания компактного и эффективного источника терагерцовых поверхностных плазмонов, направляемых структурированной поверхностью металла	55
3.3 Разработка рекомендаций по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов	56
3.4 Разработка учебно-методических пособий, учебных курсов, лабораторных практикумов	57
4 Публикации результатов НИР	61
Заключение	86
Список использованных источников	88

Введение

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 6 этапу Государственного контракта № ПЗ85 "Разработка высокоэффективных методов генерации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами" (шифр "НК-530П") от 11 мая 2010 по направлению "Оптика. Лазерная физика и лазерные технологии" в рамках мероприятия 1.2.1 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий" федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

По 6 этапу были запланированы следующие работы:

1. Обобщение и оценка результатов исследований.
2. Разработка рекомендаций по практическому использованию результатов НИР.
3. Разработка рекомендаций по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов.
4. Разработка учебно-методических пособий, учебных курсов, лабораторных практикумов.

Выполнение работ было направлено на достижение целей проекта - разработки новых высокоэффективных методов генерации терагерцового излучения на основе нелинейного преобразования мощных ультракоротких лазерных импульсов при их взаимодействии с электрооптическими кристаллами, газовыми и плазменными средами, а также использование разработанных методов для создания экспериментальных образцов компактных высокоэффективных источников терагерцового излучения.

1 Аннотированная справка по научным результатам НИР, полученным на предыдущих этапах

1.1 Научные результаты, полученные на 1 этапе исследований

В отчете за 1 этап представлен Аналитический обзор научно-технической литературы по выбранному направлению исследований. В Аналитическом обзоре показана актуальность разработки высокоэффективных методов генерации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами, научно-технические достижения в этой области и сформулированы ожидаемые результаты выполнения НИР. В частности, показано, что в последние годы в связи с прогрессом лазерной техники перспективным методом терагерцовой генерации стало воздействие фемтосекундными лазерными импульсами на электрооптические кристаллы [1] и газовые среды [2]. Огромное число работ посвящено исследованию возможностей повышения эффективности оптико-терагерцового преобразования (см., например, монографию [3]). Однако эффективность преобразования остается пока низкой – рекордное на сегодня значение составляет 0,1% [4].

В рамках данной НИР предложено разработать новые высокоэффективные методы генерации терагерцового излучения на основе нелинейного преобразования мощных ультракоротких лазерных импульсов при их взаимодействии с электрооптическими кристаллами, газовыми и плазменными средами. Разработанные методы предложено использовать для создания экспериментальных образцов компактных высокоэффективных источников терагерцового излучения. Разработка новых методов генерации ведется на основе оригинальных, фактически пионерских, идей, предложенных исполнителями НИР и опубликованных в ведущих международных журналах, см., например, [5-8]. Часть этих идей уже апробирована экспериментально, так например, исполнителями НИР достигнут мировой рекорд по эффективности оптико-терагерцового преобразования с помощью оригинальной сэндвич-структуры с сердцевиной из электрооптического материала, накачиваемой фемтосекундными лазерными импульсами, см. [9].

При выборе оптимального варианта направления исследований сформулированы следующие конкретные задачи НИР: 1) Создание высокоэффективных источников широкополосного терагерцового излучения на основе нелинейного преобразования

мощных фемтосекундных лазерных импульсов в сэндвич-структурах с сердцевиной из электрооптического материала. 2) Разработка принципов прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами. 3) Развитие рекордного на сегодня по эффективности метода генерации терагерцового излучения на основе оптической ректификации лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивности в электрооптических кристаллах. 4) Разработка методов генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред. Показано, что данные задачи относятся к передовым научным направлениям, активно развиваемым ведущими научными центрами мира. Коллектив НИР имеет существенный научный задел по заявленной теме, полученные предварительные результаты подтверждают перспективность намеченных работ.

На основе проведенного анализа состояния предметной области выработан План исследований.

В отчете за 1 этап также представлены результаты расчетов и математического моделирования для разработки высокоэффективного источника широкополосного терагерцового излучения на основе сэндвич-структуры с сердцевиной из электрооптического материала, накачиваемой фемтосекундными лазерными импульсами. В результате проведенного исследования показано, что структура металл–воздух–LiNbO₃–Si позволяет потенциально повысить эффективность оптико-терагерцовой конверсии в 2 раза по сравнению с ранее предложенной симметричной сэндвич структурой Si–LiNbO₃–Si [10]. Кроме того, предлагаемая структура позволяет перестраивать максимум спектр генерации путем изменения ширины воздушного зазора между металлом и нелинейным материалом. При этом возможно повышение в 3,5-4 раза спектральной плотности потока энергии терагерцового излучения в интервале 0,5-1,5 ТГц.

В отчете приведены результаты расчетов и математического моделирования по разработке экспериментального образца для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами. В результате данного исследования построена теория недавно предложенного метода оптико-терагерцовой конверсии – генерации терагерцовых поверхностных плазмонов на

микроструктурированной (в данной работе – гребенчатой) поверхности металла при сканировании фемтосекундными лазерными импульсами нанесенной на поверхность полоски электрооптического материала. Показано, что картина поля излучения существенно зависит от ориентации полоски относительно бороздок гребенки. Изменяя угол между полоской и бороздками, можно эффективно управлять длительностью, видом осциллограммы и спектром генерируемых волновых пакетов поверхностных плазмонов, в частности, варьировать положение максимума спектра в интервале 2,5–5 ТГц. Показано также, что энергия генерируемых волновых пакетов достигает максимума при угле для любой ориентации полоски, $^{\circ}$ –70 $^{\circ}$ падения лазерного пучка в 60 оптимальная же (в смысле максимума энергии) глубина бороздки зависит от ориентации. По сравнению с рассмотренным в [11] случаем ориентации полоски поперек бороздок энергетическая эффективность оптико-терагерцовой конверсии может быть увеличена примерно на порядок за счет выбора ориентации полоски вдоль бороздок. Исследованный в работе метод прямой оптической генерации терагерцовых поверхностных плазмонов перспективен для целей поверхностной терагерцовой спектроскопии.

1.2 Научные результаты, полученные на 2 этапе исследований

На 2 этапе проводились расчеты и математическое моделирование процессов генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности, а также процессов оптико-терагерцового преобразования при лазерном пробое сплошных и нанодисперсных сред. Для проведения этих исследований были разработаны и внедрены новые аналитические методы математического моделирования нелинейных волновых процессов, а также новые численные методы распараллеливания расчетов на современных многопроцессорных вычислительных кластерах.

В результате проведенных исследований разработана теория генерации терагерцовых волн фемтосекундным лазерным импульсом с наклонным фронтом интенсивности, распространяющимся через электрооптический кристалл, имеющий типичную для экспериментов форму призмы. Разработанная теория учитывает переходные процессы на входной границе кристалла и, как следствие, позволяет описывать динамику формирования терагерцового поля в кристалле. В качестве

важного параметра процесса формирования терагерцового поля в теории впервые введена новая характерная длина - длина поперечного сноса (transverse walk-off length), учитывающая неколлинеарность распространения лазерного импульса накачки и пакета генерируемых терагерцовых волн. Показано, что в ряде случаев именно эта длина является определяющей для оценки эффективности оптико-терагерцового преобразования. Также впервые выяснена структура терагерцового поля, генерируемого лазерным импульсом с наклонным фронтом интенсивности в электрооптическом кристалле. Показано, что терагерцовое поле состоит из ближнего поля, синхронизированной волны, черенковского конуса и переходного излучения. Определены пространственные области локализации этих полей. Разработанная теория применена для анализа двух типичных экспериментальных ситуаций – возбуждения кристалла LiNbO_3 импульсами титан-сапфирового лазера (с длиной волны 0.8 мкм) при комнатной и криогенной температурах, а также для изучения перспективности новой, предложенной участниками проекта, схемы оптико-терагерцового преобразования – возбуждения кристалла GaAs на длинах волн 1.8 и 3.5 мкм. Рассчитаны параметры лазерного импульса (поперечный размер, угол наклона фронта интенсивности, длительность импульса) и размеры кристаллов, которые максимизируют терагерцовый выход. Показано, что эффективность оптико-терагерцового преобразования в GaAs может быть существенно выше, чем в обычно используемом кристалле LiNbO_3 , что, однако, требует применения более толстых кристаллов.

В ходе расчетов и математического моделирования процессов оптико-терагерцового преобразования при лазерном пробое сплошных и нанодисперсных сред исследован эффект преобразования спектра оптического излучения при ионизации атомного кластера ультракороткими лазерными импульсами. Данный эффект обусловлен возбуждением собственных дипольных колебаний кластера передним фронтом лазерного импульса. Частота колебаний растет во времени по мере увеличения плотности плазмы, а их амплитуда сохраняется достаточно высокой даже после прохождения импульса через кластер. Высвечивание собственных колебаний из нестационарного плазмоида порождает свободное электромагнитное излучение с изменяющейся во времени частотой. Таким образом, возбуждение свободных плазмонных колебаний ультракоротким лазерным импульсом при ионизации газового

кластера приводит к увеличению передаваемой образующейся плазме энергии и сильному изменению спектра рассеянного излучения.

Исследовано также явление возбуждения низкочастотного (на терагерцовых частотах) остаточного тока в плазме, создаваемой при ионизации газа интенсивным предельно коротким (в несколько колебаний светового поля) лазерным импульсом циркулярной поляризации. Показано, что данное явление играет важную роль в процессе оптико-терагерцового преобразования, поскольку остаточный ток служит начальным толчком к возникновению поляризации в нестационарном плазменном образовании и к возбуждению в нем свободных колебаний, частоты которых определяются плотностью и геометрическими размерами плазмоида, а также частотой столкновений электронов с тяжелыми частицами и в широкой области параметров лазерного импульса и давлений ионизируемого газа лежат в терагерцовом диапазоне частот. На основе полуклассического подхода разработана аналитическая модель и получены приближенные аналитические формулы, позволяющие определить зависимость плотности остаточного тока от параметров лазерного импульса (интенсивности, длительности, длины волны) и потенциала ионизации атомов газа, с которым взаимодействует лазерный импульс. Проведенные численные расчеты по исследованию зависимости эффективности возбуждения остаточного тока от длительности и пиковой интенсивности лазерного импульса показали хорошее совпадение с результатами аналитического исследования. Исследованы спектрально-угловые и амплитудные характеристики терагерцового излучения, генерируемого остаточными токами, при различной геометрии плазменного образования.

Важным результатом 2 этапа является разработка оригинальных подходов к решению точных трехмерных уравнений Максвелла для описания электромагнитных полей в плазме и в окружающем пространстве и к решению трехмерного нестационарного уравнения Шредингера для квантовомеханических расчетов процессов ускорения электронов и возбуждения электронных токов в нестационарной лазерной плазме. Разработаны также уникальные методы распараллеливания расчетов на современных многопроцессорных вычислительных кластерах.

1.3 Научные результаты, полученные на 3 этапе исследований

В результате проведенных исследований на 3 этапе разработана оптимальная конструкция и технология изготовления экспериментального образца высокоэффективного источника широкополосного терагерцового излучения на основе сэндвич-структуры, состоящей из тонкой (толщиной 30 мкм) пластины стехиометрического ниобата лития (LiNbO_3) легированного около 1% моль MgO , приклеенной к основанию призмы из высокоомного кремния. Особенности технологии изготовления сэндвич-структуры состоят в определенной последовательности полировки и шлифовки граней пластины ниобата лития, а также в использовании прозрачного в терагерцовом диапазоне клея для склеивания пластины с кремниевой призмой. Изготовлен экспериментальный образец сэндвич-структуры. Разработана оптическая методика проверки качества сэндвич-структур и проведена проверка качества изготовленной структуры.

На основе теоретических результатов, полученных на 2-ом этапе данного проекта, разработан экспериментальный образец гребенчатой металлической поверхности для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов фемтосекундными лазерными импульсами. Параметры гребенчатой структуры (ее период, высота и ширина гребней) выбирались близкими к оптимальным теоретическим и, в то же время, удовлетворяющими условию технологической реализуемости на доступном оборудовании. По разработанным эскизам в НПП «Салют» (Нижний Новгород) были изготовлены экспериментальные образцы металлических структур методом фрезеровки с последующей химической полировкой. Изготовленные образцы имеют толщину 2 мм и размеры микроструктурированной поверхности $2 \times 2 \text{ см}^2$. Микроструктура состоит из прямоугольных бороздок глубиной 30 и 50 мкм с отношением ширины бороздки к периоду структуры 0,5. Период микроструктуры составляет 300 мкм. Для целей оптико-терагерцовой конверсии к боковой грани микроструктурированного образца прикреплен кристалл ниобата лития кристаллографической ориентации $\langle 001 \rangle$ с полированным верхним торцом (для облучения лазером), выступающим на $\sim 0,2$ мм над микроструктурированной поверхностью.

Модернизация испытательного стенда для терагерцовых исследований (терагерцового спектрометра) была направлена на создание условий для проведения

экспериментов по генерации и детектированию терагерцовых поверхностных плазмонов. В своем первоначальном виде стенд был рассчитан только на работы по оптической генерации и регистрации объемного терагерцового излучения. В ходе модернизации в оптическую схему установки была включена дополнительная вращающаяся подвижка для крепления и ориентации волноведущей (микроструктурированной) поверхности, а также три экрана на высокоточных, управляемых с компьютера, моторизованных подвижках – для дифракционного возбуждения терагерцовых плазмонов на поверхности, контроля локализации полей плазмонов вблизи поверхности и вывода плазмонов с поверхности.

В ходе разработки методики экспериментальных исследований по генерации терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности, прежде всего, были изучены возможности создания таких импульсов с помощью дифракционных решеток. Исследованы варианты отражательной решетки и решетки на пропускание, найдена практически важная связь угла падения исходного (с прямым фронтом интенсивности) импульса на решетку и периода решетки, обеспечивающая заданный угол наклона фронта интенсивности дифрагированного импульса.

Проведен расчет расплывания импульса с наклонным фронтом при его распространении в кристаллах LiNbO_3 и GaAs в результате действия факторов угловой дисперсии (зависимости угла дифракции от частоты) и материальной дисперсии кристалла. Показано, что в LiNbO_3 из-за необходимости в большом угле наклона фронта лазерного импульса (около 60 градусов для достижения синхронизма между импульсом и терагерцовой волной) основной причиной расплывания импульса является угловая дисперсия. В частности, спектрально ограниченный лазерный импульс с начальной длительностью 50 фс расплывается до 100 фс на расстоянии около 150 мкм. Этот эффект необходимо учитывать при проведении эксперимента по генерации терагерцового излучения. В GaAs , где требуются меньшие углы скоса (около 13 градусов при накачке на длине волны 1,8 мкм), доминирующим механизмом расплывания лазерного импульса является материальная дисперсия. В частности, импульс с начальной длительностью 50 фс расплывается до 100 фс на расстоянии около 3 мм. Использование импульсов большей длительности приводит к увеличению длины дисперсионного расплывания. При этом, однако, пропадают

высокочастотные составляющие спектра, участвующие в нелинейном преобразовании (терагерцовой генерации), и эффективность преобразования уменьшается. Выяснено, что для эффективной терагерцовой генерации в LiNbO₃ импульсами титан-сапфирового лазера (длина волны 0.8 мкм) оптимальная длительность импульса составляет 200 фс, а при накачке GaAs на длине волны 1.8 мкм – 100 фс.

Показано, что охлаждение кристалла LiNbO₃ с комнатной температуры до 10 К на порядок повышает эффективность оптико-терагерцового преобразования. Эффективность преобразования в кристалле GaAs при комнатной температуре примерно вдвое меньше, чем в охлажденном LiNbO₃, однако возможности управления частотой генерируемого терагерцового излучения путем изменения угла наклона фронта интенсивности лазерного импульса в GaAs существенно шире.

Разработана схема экспериментальной установки по генерации широкополосного терагерцового излучения скошенными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах, даны рекомендации по ее настройке.

1.4 Научные результаты, полученные на 4 этапе исследований

На 4 этапе исследований была разработана методика экспериментальных исследований по генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред. Предложена экспериментальная схема, в которой движущийся со сверхсветовой скоростью (большей скорости света в вакууме) фронт ионизации создается при наклонном падении лазерного импульса на плоскую поверхность твердотельного образца или на газовую струю. Показано, что за сверхсветовым фронтом возбуждаются быстрые волны поляризации, которые излучают электромагнитную энергию через поперечные границы образовавшейся плазмы под углом к направлению распространения фронта (вытекающие волны). Данная схема существенно отличается от ранее рассмотренных схем, основанных на преобразовании электростатических полей при их взаимодействии с одномерными ионизационными фронтами, где излучение происходит в направлении распространения ионизационного фронта.

На основе точных решений уравнений Максвелла исследовано преобразование однородного электростатического поля при его взаимодействии с движущимся ионизационным фронтом. Разработан подход, позволяющий рассчитывать спектр

генерируемого терагерцового излучения в зависимости от параметров ионизационного фронта и образующейся за ним плазмы. Показано, что характеристики генерируемого излучения сильно зависят как от скорости распространения ионизационного фронта (определяемой углом падения лазерного импульса на поверхность), так и от поперечных размеров образующейся плазмы, что создает дополнительные возможности для управления спектром генерируемого излучения.

Экспериментально исследована генерация терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в сэндвич-структуре, состоящей из кремниевой призмы, тонкого (толщиной 30 мкм) слоя ниобата лития, регулируемого по ширине воздушного зазора и металлической подложки. В качестве лазерной накачки использовалось излучение титан-сапфирового лазера с центральной длиной волны 800 нм, частотой повторения 1 кГц и энергий в импульсе до 2 мДж. Длительность лазерного излучения накачки изменялась в пределах от 50 фс до 400 фс путем введения частотной модуляции различного знака. Генерируемое терагерцовое поле измерялось методом электрооптического стробирования, а энергия излучения с помощью калиброванной ячейки Голея.

В результате исследований показано, что для эффективной генерации терагерцового излучения достаточно лишь малой доли энергии лазерной накачки – порядка 10 мкДж. Установлено, что при уменьшении ширины воздушного зазора между металлической подложкой и пластиной ниобата лития более эффективно генерируются низкочастотные компоненты терагерцового спектра. Такое изменение спектра наблюдалось при изменении зазора в диапазоне от 20 до 0 мкм, при этом энергия терагерцового импульса увеличивалась на 10-20%. Эффект увеличения энергии терагерцового излучения обусловлен меньшим поглощением низкочастотных компонент терагерцового излучения в ниобате лития. При ширине воздушного зазора более 20 мкм форма спектра и энергия терагерцового излучения не зависят от ширины зазора.

Обнаружено, что использование частотно-модулированных лазерных импульсов с определенным знаком частотной модуляции позволяет увеличить эффективность оптико-терагерцовой конверсии в 2 раза в отсутствие насыщения эффективности. Данный эффект обусловлен уменьшением длительности лазерного

импульса при его распространении внутри кристалла за счет компенсации материальной дисперсии ниобата лития изначально введенной частотной модуляцией.

В результате исследований достигнута рекордная на сегодня в мире эффективность оптико-терагерцового преобразования 0.25% при использовании лазерных импульсов с энергии 15-25 мкДж и длительностью 50-200 фс.

Продемонстрированная схема генерации сохраняет работоспособность и высокую эффективность при использовании современных волоконных лазерных систем с энергий в импульсе порядка 1-10 мкДж, обладающих малой стоимостью по сравнению с титан-сапфировой лазерной системой.

1.5 Научные результаты, полученные на 5 этапе исследований

На 5 этапе были проведены экспериментальные исследования по прямому нелинейно-оптическому возбуждению терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами, обработаны экспериментальные данные.

В ходе экспериментального исследования источника терагерцовых поверхностных плазмонов были получены локализованные терагерцовые поверхностные волны, направляемые микроструктурированной поверхностью металла. Были экспериментально определены оптимальные параметры оптической накачки для наиболее эффективного возбуждения терагерцовых плазмонов. Была проведена экспериментальная оптимизация терагерцовой накачки микроструктурированной поверхности металла (подобраны оптимальные условия возбуждения плазмонов при дифракции на близко расположенном лезвии). Была измерена локализация терагерцовых плазмонов.

Проведены экспериментальные исследования по генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности, обработаны экспериментальные данные.

Исследована генерация терагерцового излучения высокоэнергетичными лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности в кристалле LiNbO_3 при криогенных температурах. Исследовано влияние длительности лазерного импульса и длины кристалла на энергию генерируемого ТГц излучения. Показано, что

независимо от температуры кристалла эффективность резко насыщается при определенной интенсивности оптической накачки (на уровне несколько десятков ГВт/см²) зависящей от длины кристалла и длительности импульса. На больших длинах кристалла (~ 1 см) наблюдалось падение эффективности при большой энергии накачки (более 1-2 мДж). При комнатной температуре и малой энергии лазерного импульса генерируемая ТГц энергия не зависит от длины кристалла и длительности импульса в диапазоне 150-300 фс. При криогенном охлаждении, когда уменьшаются поглощение ТГц излучения в кристалле, более эффективная генерация достигается при длине кристалла ~ 1 см и длительности импульса около 250фс, что согласуется с ранее развитой теорией. Максимальная эффективность около 0.2 % была достигнута при криогенном охлаждении ~77 К, длительности импульса ~150 фс и длины кристалла ~ 5 мм.

Проведены экспериментальные исследования по генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред, обработаны экспериментальные данные.

Показано, что зависимость эффективности генерации от величины напряженности внешнего электрического поля определяется способом фокусировки ионизирующего оптического излучения. При использовании сферических линз эффективность генерации терагерцового излучения возрастает с увеличением напряженности электрического поля более чем на два порядка. В случае аксиконных линз реакция на приложенное внешнее поле практически отсутствует.

Сопоставлены результаты экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования при исследовании генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре с металлической подложкой. Исследован вопрос повышения эффективности генерации терагерцового излучения путем использования фемтосекундного лазерного излучения инфракрасного диапазона. Испытана установка генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре фемтосекундными лазерными импульсами инфракрасного диапазона

Сопоставлены результаты экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами. Проведена

корректировка разработанной документации, по скорректированной документации изготовлен и испытан экспериментальный образец.

Сопоставлены результаты экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования при исследовании генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности. Предложена схема визуализации поперечного распределения мгновенной интенсивности ТГц пучка.

2 Аналитический отчет о проведении экспериментальных исследований

2.1 Генерация ТГц излучения в сэндвич-структуре при использовании оптической накачки нДж уровня энергии

На предыдущих этапах проекта была продемонстрирована высокая ($> 0.1\%$) эффективность генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами с использованием сэндвич-структуры, состоящей из тонкой пластины LiNbO_3 (35 мкм) и кремниевой призмы, при условии, когда лазерное излучение фокусируется в слой цилиндрической линзой. При этом энергия лазерного излучения составляет несколько мкДж. Однако типичная энергия лазера без усилителя составляет несколько нДж. Поэтому для увеличения интенсивности оптического излучения в кристалле LiNbO_3 при использовании в качестве оптической накачки задающего генератора необходимо дополнительно сфокусировать оптический пучок.

На данном этапе проекта проведено теоретическое и экспериментальное исследование возможности эффективной терагерцовой генерации в сэндвич-структуре при использовании малоэнергичной лазерной накачки и двумерной фокусировкой накачки в слой LiNbO_3 (LN).

В эксперименте использовалась схема генерации представленная на рисунке 2.1.1. Слой кристалла стехиометрического LiNbO_3 легированного 2 мольных % Mg толщины 35 мкм (вдоль оси x) с поперечными размерами $10 \times 10 \text{ мм}^2$ (в (y, z) плоскости) была соединена с прямой призмой (с прямоугольным треугольником в основании) из высокоомного кремния срезанной под черенковским углом 41° . В качестве оптической накачки использовался титан-сапфировый лазер (длина волны 800 нм, длительность импульса 100 фс, энергия импульса 8 нДж, и частота повторения 80 МГц). Пучок накачки (диаметр ~ 1 мм) был сфокусирован на входную грань полоски LN. Было предложены две схемы фокусировки. В первой схеме лазерный импульс был сфокусирован парой цилиндрических линз. Одна из линз с фокусным расстоянием 75 мм использовалась для фокусировки пучка в размер ~ 30 мкм (FWHM) вдоль оси x а другая с фокусным расстоянием 150 мм фокусировала пучок в размер ~ 50 мкм вдоль оси y . Во второй схеме, лазерный импульс был

сфокусирован в круглое пятно размером ~ 25 мкм с помощью одной сферической линзой с фокусным расстоянием 50 мм. Оптическая ось кристалла LN ориентирована в y направлении, и поляризация пучка накачки выставляется параллельно этой же оси. Лазерный импульс распространяется в по полоске LN в $+z$ направлении с групповой скоростью V и испускает терагерцовое черенковское излучение в кремниевую призму. Для измерения временной формы терагерцовых импульсов использовалась схема электрооптического стробирования с использованием кристалла ZnTe толщиной 2 мм. Для сбора терагерцового излучения для схемы электрооптического стробирования использовалась пара параболических зеркал (одно цилиндрическое а другое сферическое). Терагерцовая энергия была измерена калиброванной ячейкой Голя расположенной на расстоянии 1 см от выходной поверхности кремниевой призмы.

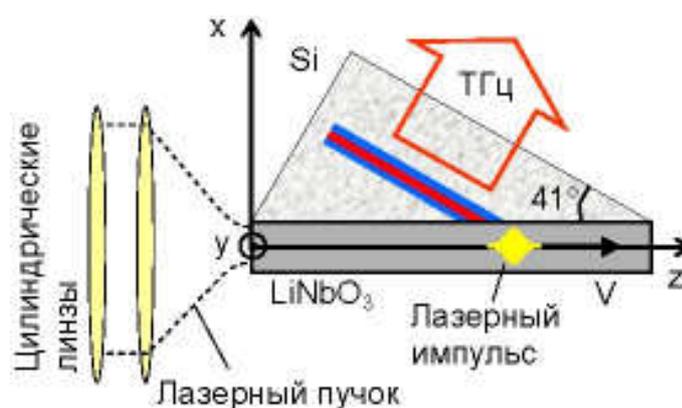


Рисунок 2.1.1 – Схема генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре при использовании лазерной накачки с малой энергией в импульсе

На рисунке 2.1.2 показано пространственное распределение электрического поля E_y , рассчитанное в фиксированный момент времени в двух плоскостях сэндвич-структуры. В расчётах предполагается длительность лазерного импульса $\tau_{FWHM} = 100$ фс, поперечный размер пучка вдоль оси y $\ell_{FWHM} = 50$ мкм, и энергия импульса накачки $W_{opt} = 8$ нДж. В плоскости $y = 0$ (см. рисунок 2.1.2(a)), угол раскрытия черенковского конуса в кремнии около 41° . Постепенно спадающие осцилляции в распределении поля поперёк черенковского конуса могут быть вызваны многократными переотражениями генерируемых в пластинке LiNbO₃ терагерцовых

волн на границе пластинки. Из-за полного внутреннего отражения на границе LN-воздух терагерцовое поле испытывает быстрое экспоненциальное затухание в воздухе. В плоскости $z = 8.75$ мм (т.е., 1.15 мм позади лазерного импульса с центром при $z = 9.9$ мм) (см. рисунок 2.1.2(b)), распределение поля излучения на черенковском конусе сильно неоднородно: поле сконцентрировано в верхней части конуса и падает на границу Si-воздух ($x \approx 1.1$ мм на рисунке 2.1.2(b)) под маленькими углами.

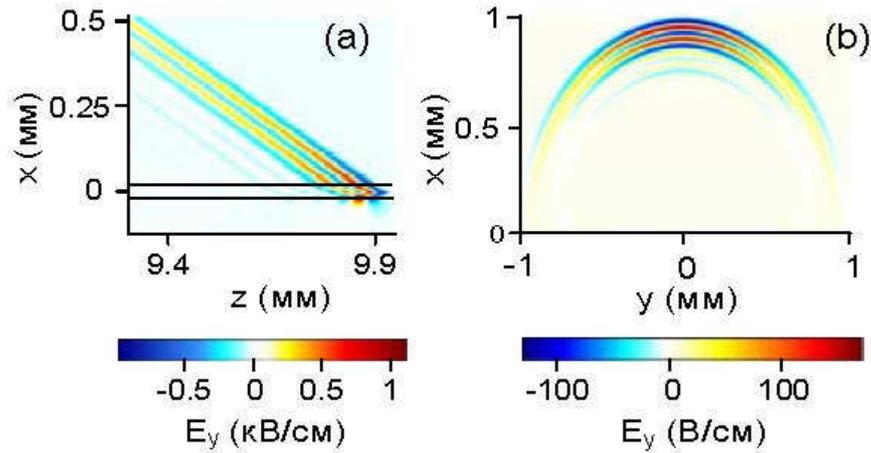


Рисунок 2.1.2 – Моментальные снимки электрического поля E_y в плоскости (a) $y = 0$ и (b) $z = 8.75$ мм для $\tau_{\text{FWHM}} = 100$ фс, $\ell_{\perp\text{FWHM}} = 50$ мкм, и $W_{\text{opt}} = 8$ нДж. Центр лазерного импульса находится на $z = 9.9$ мм. Границы полоски LN показаны на (a) горизонтальными линиями.

На рисунке 2.1.3(a) показана спектрально-угловая плотность терагерцовой энергии для тех же τ_{FWHM} и $\ell_{\perp\text{FWHM}}$, что и на рисунке 2.1.2. Пиковое значение достигается при $\theta = 0^\circ$ и $\omega/(2\pi) \approx 2$ ТГц. Ширина пика вдоль оси θ растёт с уменьшением ℓ_{\perp} и равна $\sim 50^\circ$, $\sim 85^\circ$, и $\sim 100^\circ$ для $\ell_{\perp\text{FWHM}} = 100, 50,$ и 25 мкм, соответственно (рисунок 2.1.3(b)). Для фиксированной энергии оптического импульса ℓ_{\perp} не влияет на максимальное значение w при $\theta = 0^\circ$. По существу даже при $\theta \approx 50^\circ$ (на половине максимума для $\ell_{\perp\text{FWHM}} = 25$ мкм) угол падения в кремнии равен только 12.9° , т.е. в основном меньше чем критический угол полного внутреннего отражения (17°) и угла Брюстера (16.3°).

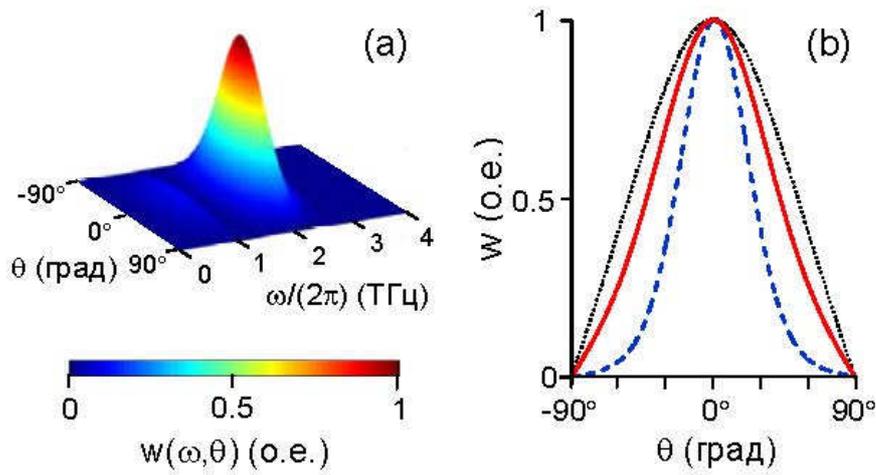


Рисунок 2.1.3 – (а) Спектрально-угловая плотность терагерцовой энергии $w(\omega, \theta)$ (относительные единицы) для $\tau_{\text{FWHM}} = 100$ фс и $\ell_{\text{DFWHM}} = 50$ мкм. (б) $w(\omega, \theta)$ (относительные единицы) как функция θ на частоте максимума спектрально-угловой плотности $\omega/(2\pi) \approx 2$ ТГц для $\tau_{\text{FWHM}} = 100$ фс и $\ell_{\text{DFWHM}} = 100$ мкм (штрихованная кривая), 50 мкм (сплошная кривая), и 25 мкм (точечная кривая).

Согласно расчетам полная терагерцовая энергия импульса составляет $W \approx 3.6$ пДж для $\tau_{\text{FWHM}} = 100$ фс, $\ell_{\text{DFWHM}} = 50$ мкм, и $W_{\text{opt}} = 8$ нДж. Соответствующая эффективность конверсии $W/W_{\text{opt}} \sim 4.5 \times 10^{-4}$. Однако на практике не всю энергию, излучённую в интервале $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ возможно собрать. Исходя из наших экспериментальных условий углы приёма ячейки Голея лежат в диапазоне $-15^\circ < \theta < 15^\circ$. Это уменьшит измеряемую энергию до $W \approx 1$ пДж и эффективность конверсии до $\sim 10^{-4}$. Тем не менее, прогнозируемая эффективность остаётся на два порядка больше, чем максимальные оценки эффективности для кристалла ZnTe возбуждаемого титан-сапфировым лазером с теми же τ_{FWHM} и W_{opt} . Уменьшение ℓ_{DFWHM} до 25 мкм не сильно изменяет прогнозируемую эффективность.

На рисунке 2.1.4 показаны форма терагерцового сигнала $E_y(t)$ в воздухе около центра выходной поверхности кремниевой призмы (при $y = 0$, $z = 7.2$ мм, и $x = 2.5$ мм) и соответствующий спектр. Нуль в спектре при $\omega \approx 1.2$ ТГц можно объяснить деструктивной интерференцией терагерцовых волн излучаемых к кремниевой призме от полосы LN непосредственно и после отражения на границе LN-воздух.

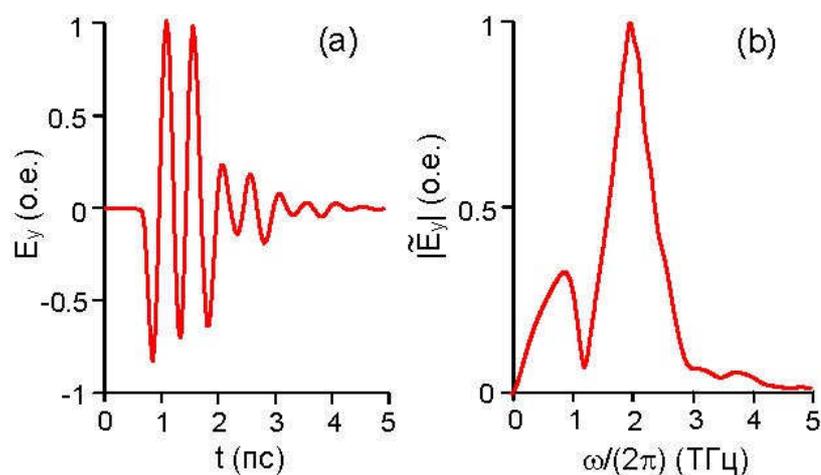


Рисунок 2.1.4 – (а) Теоретические осциллограммы электрического поля $E_y(t)$ в воздухе около центра выходной поверхности призмы. (б) Соответствующий спектр.

Экспериментальные результаты показаны на рисунках 2.1.5 и 2.1.6. На рисунке 2.1.5(а) показана средняя терагерцовая мощность сгенерированная сэндвич структурой как функция мощности оптической накачки. Для сравнения измерена терагерцовая мощность от того же лазера в 2 мм кристалле ZnTe. В эксперименте с кристаллом ZnTe, лазерный импульс был сфокусирован сферической линзой с фокусным расстоянием 50 мм в круглое пятно. Потом, используя Z-scan технику, проводился поиск максимального значения терагерцовой мощности для каждого значения оптической мощности. Согласно рисунку 2.1.5(а), максимальная терагерцовая мощность для схемы с одной линзой в ~ 1.5 раза больше, чем для схемы с двумя линзами и в ~ 150 раз больше, чем для схемы с кристаллом ZnTe. Эффективность конверсии доходит до 0.8×10^{-4} и 5×10^{-5} для схемы с одной и двумя линзами, соответственно (рисунок 2.1.5(б)). Эти данные хорошо согласуются с нашими теоретическими оценками.

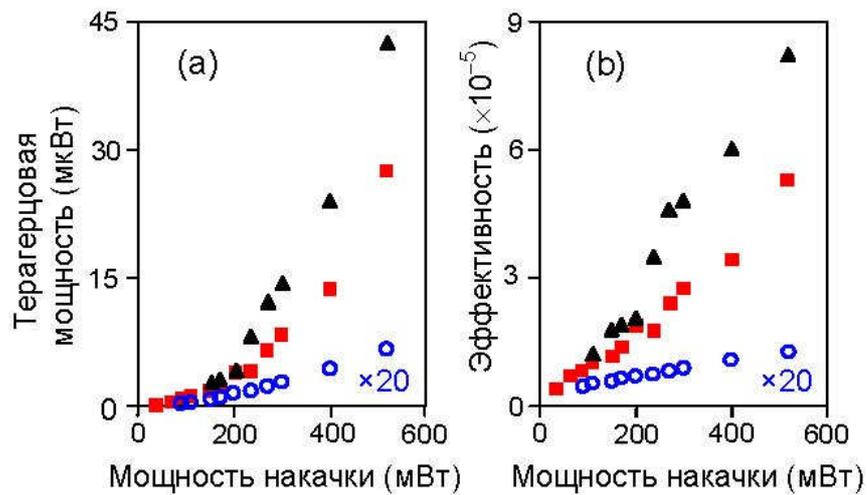


Рисунок 2.1.5 – (a) Терагерцовая мощность генерируемая в сэндвич структуре в схемах с двумя (квадраты) и одной линзой (треугольники) и в кристалле ZnTe 2 мм толщины (круги) от мощности оптической накачки. (b) Соответствующая эффективность оптико-терагерцовой конверсии. Значения для ZnTe отложены с множителем 20.

Форма терагерцового сигнала, которая была измерена в эксперименте, и соответствующий спектр показаны на рисунке 2.1.6, и хорошо сходятся с теоретическими прогнозами на рисунке 2.1.4. Отношение сигнал/шум в частотной области можно оценить в ~ 50 dB.

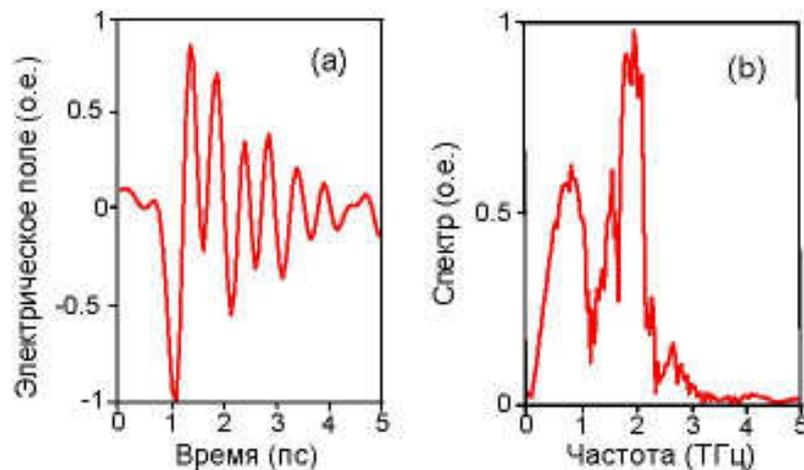


Рисунок 2.1.6 – Форма терагерцового сигнала измеренная экспериментально (a) и соответствующий спектр (b).

2.2 Генерация широкополосного терагерцового излучения длинным плазменным каналом, возникающим при фокусировке в окружающий воздух мощных фемтосекундных лазерных импульсов аксиконной линзой

В результате выполнения НИР был произведен расчет ускорения электронов и возбуждения низкочастотных терагерцовых токов в плазме оптического разряда. Была исследована генерация широкополосного терагерцового излучения длинным плазменным каналом, возникающим при фокусировке в окружающий воздух мощных фемтосекундных лазерных импульсов аксиконной линзой. Генерация вызывается возбуждением импульса тока пондеромоторной силой позади сверхсветового ионизационного фронта. Было показано что частота, отвечающая максимуму спектра излучения, определяется частотой столкновений электронов и почти не зависит от максимальной плазменной частоты.

Указанная закономерность подтверждаются результатами численных симуляций динамики поля и плазмы при ионизации окружающего воздуха лазерными импульсами, сфокусированной аксиконной линзой и экспериментальными результатами [12]. В численных симуляциях используются формулы для скорости ионизации атомов азота и кислорода. Расчёты проводятся в широкой области значений длительности $30 \text{ фс} < \tau_p < 100 \text{ фс}$, энергии лазерного импульса $0.5 \text{ мДж} < W_L < 5 \text{ мДж}$, угла фокусировки $3^\circ < \theta < 15^\circ$, частоты столкновений электронов $10^{12} \text{ с}^{-1} < \nu < 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Характерный поперечный размер плазмы и величина её максимальной плотности сильно зависят от τ_p , W_L и ν , однако найденный численно спектр терагерцового излучения слабо зависит от этих параметров и его форма близка к форме, описываемой полученными формулами. Заметим, что часто в численных счётах наблюдается в спектре излучения также слабый максимум на частоте порядка , которая составляет несколько терагерц. Рисунок 2.2.1 показывает результаты численных расчётов, сопоставленные с результатами эксперимента. Как мы можем видеть, спектр и эффективность генерации терагерцового излучения, полученные в численных расчётах и эксперименте, находятся в хорошем согласии друг с другом.

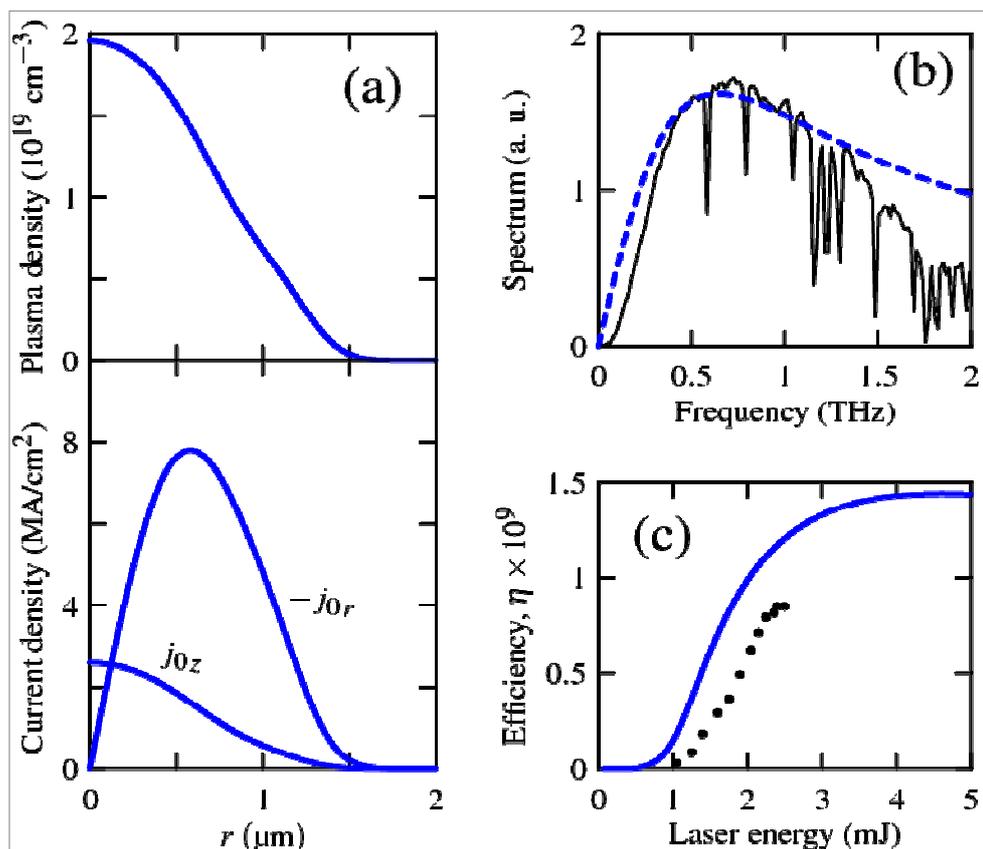


Рисунок 2.2.1 — Рассчитанные профили (а) плотности плазмы $N(r)$ и (б) плотности тока $j(r)$, генерируемые на сверхсветовом ионизационном фронте лазерным импульсом, сфокусированным в окружающий воздух аксиконной линзой. В расчётах используются соответствующие эксперименту значения параметров: длительность $\tau_p = 50$ фс, энергия $W_L < 2,5$ мДж, угол фокусировки $\theta = 15^\circ$ и частота столкновений $\nu = 5 \times 10^{12} \text{ c}^{-1}$. (с) Соответствующие этим параметрам рассчитанные (пунктир) и полученные в эксперименте (сплошная кривая) спектры терагерцового излучения. (д) Рассчитанные (сплошная кривая) и полученные в эксперименте (точки) зависимости эффективности генерации терагерцового излучения от энергии в лазерном импульсе при фиксированных остальных параметрах.

Был также рассмотрен вклад в терагерцовое излучение, даваемый наложением внешнего статического электрического поля E_e . Максимально возможный вклад от внешнего поля в излучаемую энергию $W_0 \sim E_e^2 a^2 L$. Однако он на 1 — 2 порядка меньше чем W_0 при ионизации воздуха атмосферного давления вследствие больших внутренних потерь в плазменном канале. Таким образом, при , радиусе $a \sim 1$ мкм и длине $L \sim 1 — 10$ см плазменного канала, создаваемого лазерным импульсом,

сфокусированным аксиконом с углом фокусировки $\theta \sim 7^\circ$, и энергией в лазерном импульсе около 1 мДж эффективность вынужденной генерации составляет около $10^{-11} — 10^{-10}$, что значительно меньше найденной эффективности самоиндуцированной генерации (10^{-9}). Это объясняет отсутствие наблюдаемого отклика в детектируемом терагерцовом излучении на наложение внешнего электрического поля в эксперименте [12]. В случае филаментации лазерного импульса радиус плазменного канала примерно на 1–2 порядка больше при той же его длине, чем в случае аксиконной фокусировки. Это и ведёт к большому отклику, наблюдаемому в экспериментах, в терагерцовой эмиссии от лазерно-плазменной филаменты.

3 Отчет по обобщению и оценке результатов исследований.

3.1 Обобщение результатов предыдущих этапов работ. Оценка полноты решения задач и эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем

3.1.1 Генерация терагерцовых поверхностных волн

Актуальность разработки методов генерации терагерцовых поверхностных волн связана с перспективами практических приложений таких волн для спектроскопии и сенсорики биологических тканей и макромолекул, кристаллических материалов, взрывчатых и других веществ. При анализе тонких пленок и сверхмалых количеств вещества для того, чтобы обеспечить необходимую чувствительность, требуется сконцентрировать терагерцовое излучение в малой (с микронными или даже субмикронными размерами) области пространства. В силу локализации поверхностных волн их характеристики чрезвычайно чувствительны к состоянию границы.

В данной НИР был разработан метод прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов (ПП) на микроструктурированной поверхности металла [6]. Суть метода состоит в возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами нелинейного поляризационного источника, движущейся вдоль волноведущей поверхности со сверхсветовой скоростью и излучающего терагерцовые поверхностные волны за счет эффекта Черенкова. В качестве нелинейной среды для создания поляризационного источника может выступать полоска нелинейного материала, нанесенная на волноведущую поверхность, или нелинейный кристалл, прижатый к торцу волноведущей структуры. В данном методе, в отличие от стандартных схем ввода излучения в открытые волноведущие структуры, не требуется внешний терагерцовый источник и отсутствуют неизбежные при вводе потери.

На предыдущих этапах данной НИР была разработана полная теория предложенного в работе [6] метода генерации терагерцовых ПП для произвольной ориентации скорости сверхсветового нелинейного источника (нелинейной полоски) относительно бороздок гребенчатой структуры. Исследована структура полей и спектрально-угловое распределение энергии генерируемых ПП для различных

ориентаций скорости источника. Найдены условия (параметры гребенчатой структуры, угол падения лазерного импульса), обеспечивающие максимальную эффективность оптико-терагерцовой конверсии.

Рассматриваемая схема оптической генерации терагерцовых ПП представлена на рисунке 3.1.1.1. На гребенчатую поверхность металла (с бороздками прямоугольного сечения ширины a , глубины h и периодом d) нанесена полоска электрооптического материала. В отличие от работы [6], полоска ориентирована под произвольным углом γ к бороздкам структуры. Сфокусированный вдоль оси x фемтосекундный лазерный импульс падает на полоску в плоскости y, z под углом α и создает световое пятно, движущееся вдоль оси z со сверхсветовой скоростью $V = c/\sin\alpha$ ($V > c$). Наводимая в области пятна в результате выпрямления оптического поля нелинейная поляризация служит источником черенковского излучения в виде объемных (уходящих от поверхности металла) и поверхностных терагерцовых волн.

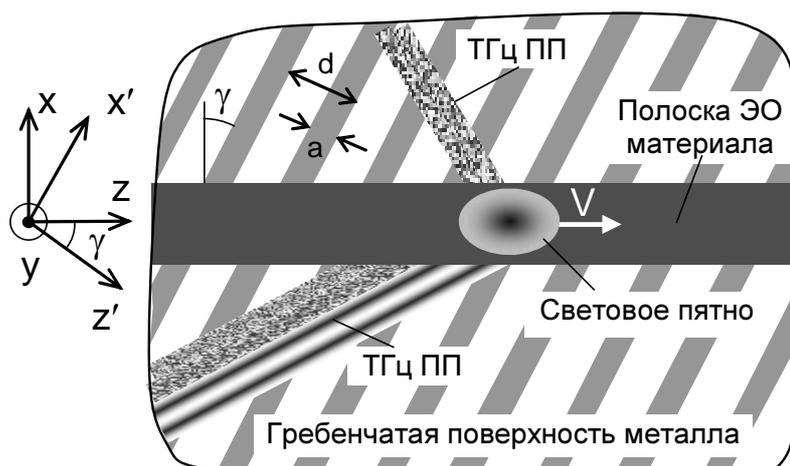


Рисунок 3.1.1.1 – Схема генерации. Световое пятно, создаваемое наклонно падающим фемтосекундным лазерным импульсом, движется со скоростью $V > c$ вдоль полоски электрооптического (ЭО) материала, нанесенной на гребенчатую поверхность металла. Наводимая в пятне нелинейная поляризация возбуждает асимметричный конус терагерцовых ПП. Ориентация полоски относительно бороздок гребенки задается углом γ .

В последующем анализе металл полагается идеальным проводником. Толщина нелинейной полоски и ее ширина считаются малыми по сравнению с длиной

терагерцовой волны, так что влиянием полоски на генерируемые терагерцовые волны можно пренебречь. Глубина проникновения лазерного излучения в материал полоски предполагается малой по сравнению с толщиной полоски, что характерно для случая, когда энергия кванта лазерной накачки превышает ширину запрещенной зоны материала полоски (полупроводника). Так, например, глубина проникновения излучения титан-сапфирового лазера (с длиной волны 800 нм) в GaAs составляет около 1 мкм. Мы ограничимся исследованием стационарного режима генерации в бесконечно длинной структуре, не рассматривая переходные процессы в начале и в конце полоски.

В рамках указанных приближений была записана наводимая в полоске нелинейная поляризация, а для расчета терагерцовых полей \mathbf{E} и \mathbf{V} , возбуждаемых движущейся нелинейной поляризацией были использованы уравнения Максвелла. Следуя разработанному в работах [6, 12] подходу, полученная система уравнений была решена методом преобразования Фурье, а решения полученных уравнений записаны в виде суперпозиции s - и p -поляризованных волн для полупространства $y > 0$ и в виде фундаментальной моды гребенчатой структуры для бороздок структурированной поверхности при $y < 0$. Полученные решения были сшиты граничными условиями. В результате были найдены амплитуды волн и выражения для полей в виде интегралов Фурье. Методом контурного интегрирования в комплексной плоскости были найдены поля поверхностных волн, получены асимптотические выражения для полей. Исследованы зависимости парциальной и стационарной частоты ПП от угла распространения при различных направлениях движения нелинейного источника (см. рисунок 3.1.1.2).

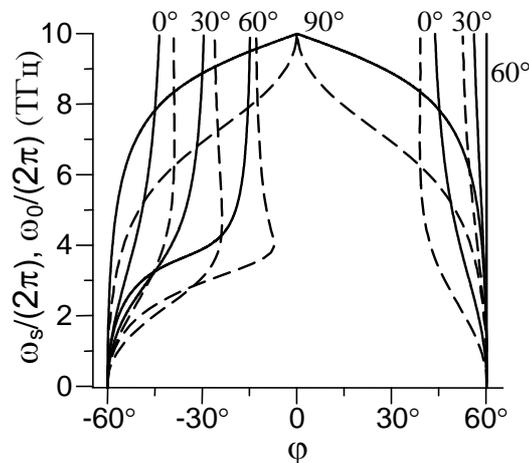


Рисунок 3.1.1.2 – Зависимости парциальной частоты поверхностных

плазмонов $\omega_s(\varphi)$ (сплошные кривые) и стационарной частоты поверхностных плазмонов $\omega_0(\varphi)$ (пунктирные кривые) при $a/d = 0.5$, $h = 15$ мкм, $\beta = 1.15$ ($\alpha = 60^\circ$) и $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

Показано, что изменяя ориентацию движения нелинейного источника относительно бороздок гребенчатой структуры, можно эффективно управлять видом генерируемого волнового пакета терагерцовых ПП.

Для того, чтобы оптимизировать параметры структуры с целью увеличения эффективности генерации терагерцовых ПП, было проведено исследование энергии и спектральной плотности энергии терагерцовых ПП в зависимости от параметров задачи. Было показано, что вклад p -поляризованных полей доминирует в основной части спектра в широком интервале значений параметров. Также было показано, что значение угла α , при котором достигается максимум энергии W_{\pm} , практически не зависит от ориентации нелинейной полоски (угла γ) и составляет $\alpha \approx 60^\circ - 70^\circ$. Оптимальное (в смысле максимума W_{\pm}) значение глубины бороздки h оказывается приблизительно одним и тем же, $h \approx 15$ мкм, для углов $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$. Для $\gamma = 90^\circ$ энергия W_{\pm} возрастает с увеличением h . Увеличение h , однако, ведет также к уменьшению предельной частоты $\pi c / (2h\sqrt{1-\beta^{-2}})$, ограничивающей сверху спектр генерируемых частот. При сближении предельной частоты с максимумом спектра (что имеет место при $h > 40$ мкм) можно ожидать нарушения использованного в расчетах одномодового приближения.

На рисунке 3.1.1.3 показана спектральная плотность энергии при различных углах ориентации полоски $\gamma = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ и оптимальных значениях параметров α и h (для $\gamma = 0^\circ$ соответствующий график приведен в работе [6]). Как следует из рисунка 3.1.1.3(а), с увеличением угла γ эффективность генерации терагерцовых ПП возрастает (для $\gamma = 90^\circ$ – примерно на порядок по сравнению с $\gamma = 0^\circ$, ср. с [6]), а максимум генерируемого спектра энергии сдвигается от 2.5 ТГц к 4.7 ТГц. При этом уменьшается масштаб локализации ПП над волноведущей поверхностью (рисунок 3.1.1.3(б)).

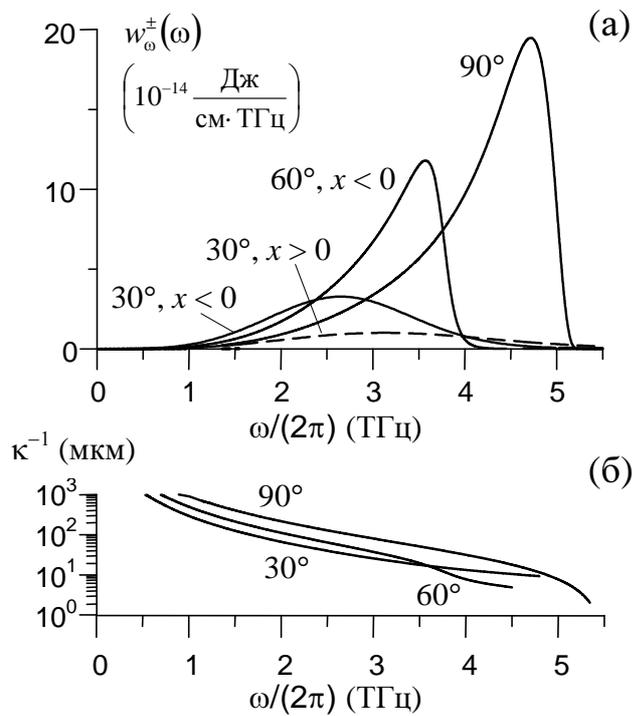


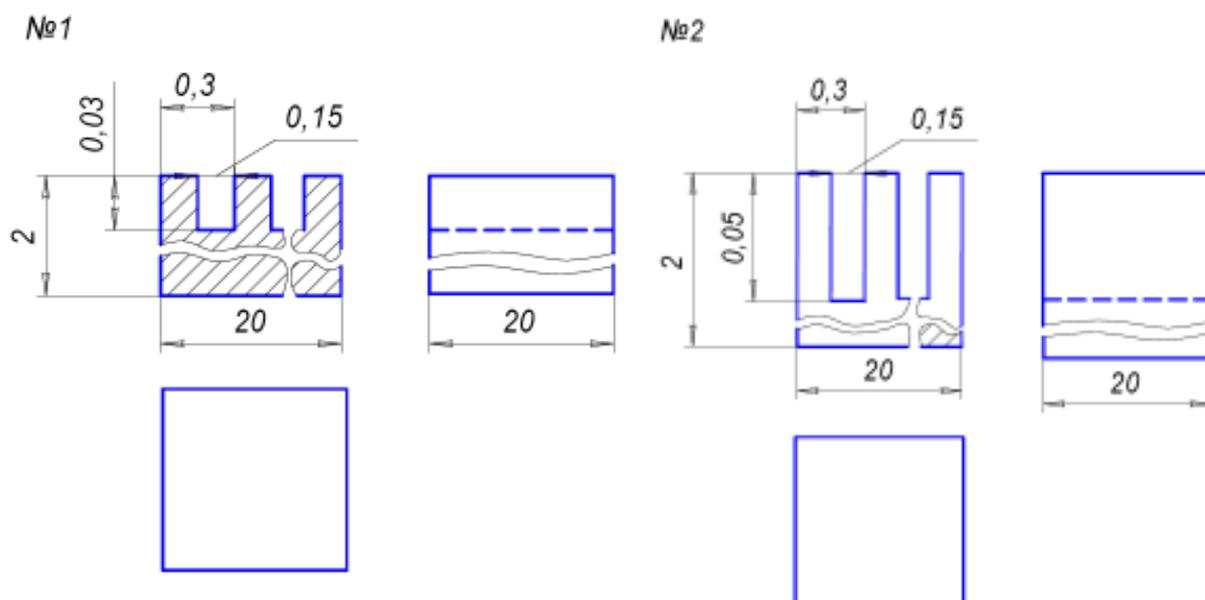
Рисунок 3.1.1.3 – Спектральная плотность энергии (а) и частотная зависимость масштаба локализации ПП κ^{-1} (б) при $a/d = 0.5$, $\gamma = 30^{\circ}$, 60° , 90° и оптимальных параметрах α и h : $\alpha = 60^{\circ}$, $h = 15$ мкм при $\gamma = 30^{\circ}$, 60° и $\alpha = 70^{\circ}$, $h = 40$ мкм при $\gamma = 90^{\circ}$. Параметры накачки – $\tau_{\text{FWHM}} = 150$ фс, $\ell_{\perp\text{FWHM}} = 30$ мкм, $I_0 = cE_0^2/(8\pi) = 50$ ГВт/см².

Таким образом, на предыдущих этапах НИР построена теория недавно предложенного метода оптико-терагерцовой конверсии – генерации терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной (в данной работе – гребенчатой) поверхности металла при сканировании фемтосекундными лазерными импульсами нанесенной на поверхность полоски электрооптического материала. Показано, что картина поля излучения существенно зависит от ориентации полоски относительно бороздок гребенки. Изменяя угол между полоской и бороздками, можно эффективно управлять длительностью, видом осциллограммы и спектром генерируемых волновых пакетов поверхностных плазмонов, в частности, варьировать положение максимума спектра в интервале 2.5–5 ТГц. Показано также, что энергия генерируемых волновых пакетов достигает максимума при угле падения лазерного пучка в 60° – 70° для любой ориентации полоски, оптимальная же (в смысле максимума энергии) глубина бороздки зависит от ориентации. По сравнению с

рассмотренным в [6] случае ориентации полоски поперек бороздок энергетическая эффективность оптико-терагерцовой конверсии может быть увеличена примерно на порядок за счет выбора ориентации полоски вдоль бороздок.

Далее в ходе выполнения НИР был подготовлен и создан экспериментальный образец для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами.

На основании выполненных на первом этапе НИР расчетов были выбраны оптимальные с точки зрения эффективности генерации терагерцовых поверхностных плазмонов параметры структуры: глубина бороздок $h = 30\text{--}50$ мкм и отношение ширины бороздок к периоду структуры $a/d = 0,5$. Период структуры, в соответствии с разработанной теорией, должен быть много меньше длин волн возбуждаемых плазмонов (100 – 300 мкм). Для простоты изготовления, был выбран период структуры 300 мкм. Габаритные размеры металлического образца, на котором вырезается микроструктура, были выбраны, с одной стороны, из соображений удобства закрепления необходимых элементов у поверхности, а с другой стороны, из соображений компактности. Оптимальными размерами было принято считать размеры 2×2 см². Толщина металлического образца (2 мм) была выбрана исходя из удобства закрепления в оптической схеме. Эскизы экспериментальных образцов микроструктурированной металлической поверхности приведены на рисунке 3.1.1.4. Экспериментальный образец микроструктурированной металлической поверхности был изготовлен по данным эскизам в НПП «Салют» (Нижний Новгород) методом фрезеровки с последующей химической полировкой в количестве пяти штук.



Размеры в мм.

Рисунок 3.1.1.4 – Эскизы экспериментального образца микроструктурированной металлической поверхности.

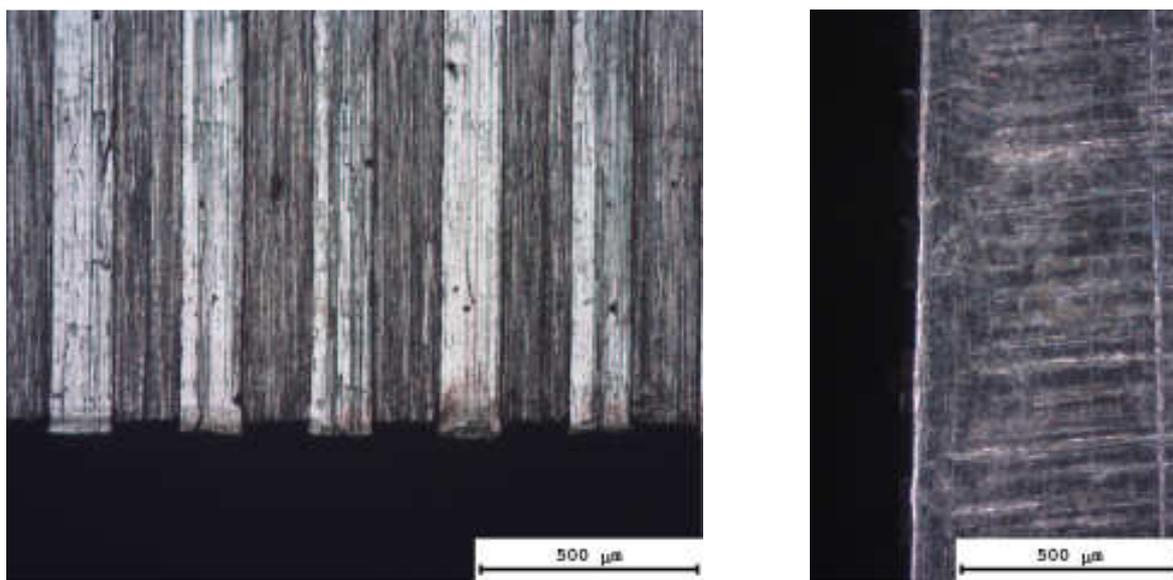


Рисунок 3.1.1.5 – Микрофотографии экспериментального образца: вид сверху (слева) и вид с торца (справа).

На рисунке 3.1.1.5 представлены микрофотографии одного из образцов, сделанные оптическим микроскопом с пятидесятикратным увеличением. Фотография сверху сделана в светлом поле, фотография с торца – в темном поле. Видны канавки гребенчатой структуры.

Для создания нелинейного источника по методу [6, 13], разработанному в ходе выполнения 1ого этапа Проекта, к боковой грани структурированной поверхности (на рисунке 3.1.1.4 сверху справа) был прикреплен кристалл LiNbO_3 $\langle 001 \rangle$ с полированным верхним торцом. При этом верхний срез кристалла на $\sim 0,2$ мм выступал над микроструктурированной поверхностью. Являясь прозрачным в ближнем ИК диапазоне, кристалл LiNbO_3 при его освещении через верхний торец лазерными импульсами титан-сапфирового лазера (800нм) позволяет создать движущийся над поверхностью нелинейный поляризационный источник терагерцовых плазмонов. Эффективный размер источника составляет порядка 0,2 мм по высоте (выступающая часть кристалла).

На третьем этапе НИР была проведена модернизация испытательного стенда для терагерцовых исследований. Общая схема испытательного стенда изображена на рисунке 3.1.1.6. Данная экспериментальная установка построена по широко распространенной схеме, в которой генерация терагерцовых импульсов осуществляется методом оптического выпрямления, а регистрация – методом электрооптического стробирования (electro-optic sampling). В качестве кристалла генератора ("Г" на рисунке 3.1.1.6) применяется кристалл ZnTe $\langle 110 \rangle$ толщиной 2 мм. В качестве накачки использовались импульсы фемтосекундной лазерной системы Tsunami с центральной длиной волны 800 нм, шириной спектральной полосы 13 нм и энергией 10 нДж. Длительность импульсов составляла 90 фс. Терагерцовое излучение из кристалла генератора с помощью двух параболических зеркал (числовая апертура первого зеркала 1.4, второго - 0.7) фокусировалось в кристалл детектора Д. Между параболическими зеркалами был помещен исследуемый образец, в нашем случае – экспериментальный образец микроструктурированной поверхности металла. Линейно (вертикально) поляризованный пробный лазерный пучок (разделение лазерного пучка на пучок накачки и пробный пучок осуществляется делителем, см. рисунок 3.1.1.6) проходил через отверстие во втором зеркале и также фокусируется в кристалл Д. Задержка времени прихода пробного импульса в кристалл варьируется в широком интервале путем изменения оптического пути пробного луча в линии задержки на основе уголкового отражателя, закрепленного на моторизованном прецизионном координатном столике. Изменение (с некоторым шагом) времени прихода пробного импульса в кристалл детектора позволяло измерять электрическое поле терагерцового

импульса с разрешением по времени, т.е. фактически снимать осциллограмму терагерцового поля. В качестве детектора в эксперименте использовался кристалл ZnTe толщиной 1 мм. После прохождения пробным пучком кристалла детектора, его поляризация с помощью четвертьволновой пластинки переводилась в близкую к круговой, после чего пробный пучок разделялся (с помощью призмы Волластона П-2, рисунок 3.1.1.6) на два пучка со взаимно перпендикулярной поляризацией, которые затем детектируются кремниевыми фотодиодами. Разность сигнала с двух диодов равна нулю в отсутствие терагерцового поля в кристалле детектора и некоторой конечной величине при наличии поля. Нестабильность поляризации в пробном пучке ведет к появлению шумов, которые примерно на три порядка превышают величину полезного сигнала, связанного с изменением поляризации из-за наличия терагерцового поля. Для устранения этого фактора помех применяется модуляция (прерывание) пучка накачки с частотой около 1550 Гц (с помощью механического прерывателя М на рисунке 3.1.1.6) и синхронное (на частоте модуляции) детектирование разностного сигнала с фотодиодов синхронным усилителем SR-830. Детектирование терагерцовых импульсов осуществляется сфокусированным до 50 мкм пробным лазерным импульсом. Диаметр перетяжки терагерцового пучка в фокусе второго параболического зеркала составляет, по оценкам, 130 мкм (для 3 ТГц) и более (для меньших частот).

В рамках третьего этапа НИР в существующую оптическую схему для генерации терагерцового излучения был внесен ряд изменений. Модернизация коснулась части схемы между параболическими зеркалами (эта часть схемы показана на рисунке 3.1.1.7). Между параболическими зеркалами на вращательной подвижке установлена микроструктурированная поверхность (МП). В перетяжку терагерцового излучения для возбуждения поверхностных волн установлен экран на моторизованной подвижке (L_1). На краю микроструктурированной поверхности для вывода излучения установлен второй экран на моторизованной подвижке (L_2). Между экранами 1 и 2 для контроля локализации терагерцового излучения установлен экран (L_3).

Перемещение экранов L_1 , L_2 , L_3 , размещенных на моторизованных подвижках, ведется с компьютера через блок управления шаговыми двигателями подвижек. Благодаря моторизованному перемещению можно контролировать зазоры между

лезвиями и микроструктурированной поверхностью с высокой точностью (шаг подвижки 1,25 мкм).

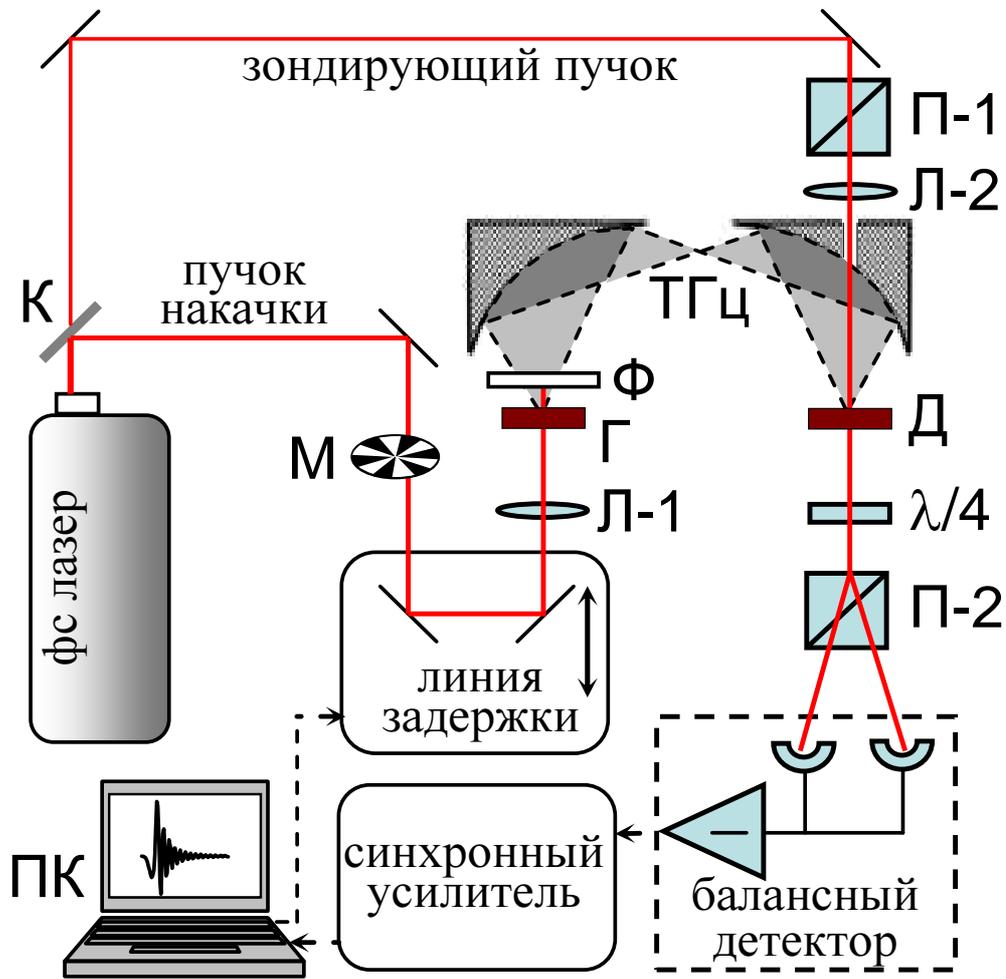


Рисунок 3.1.1.6 – Схема испытательного стенда для терагерцовых исследований.

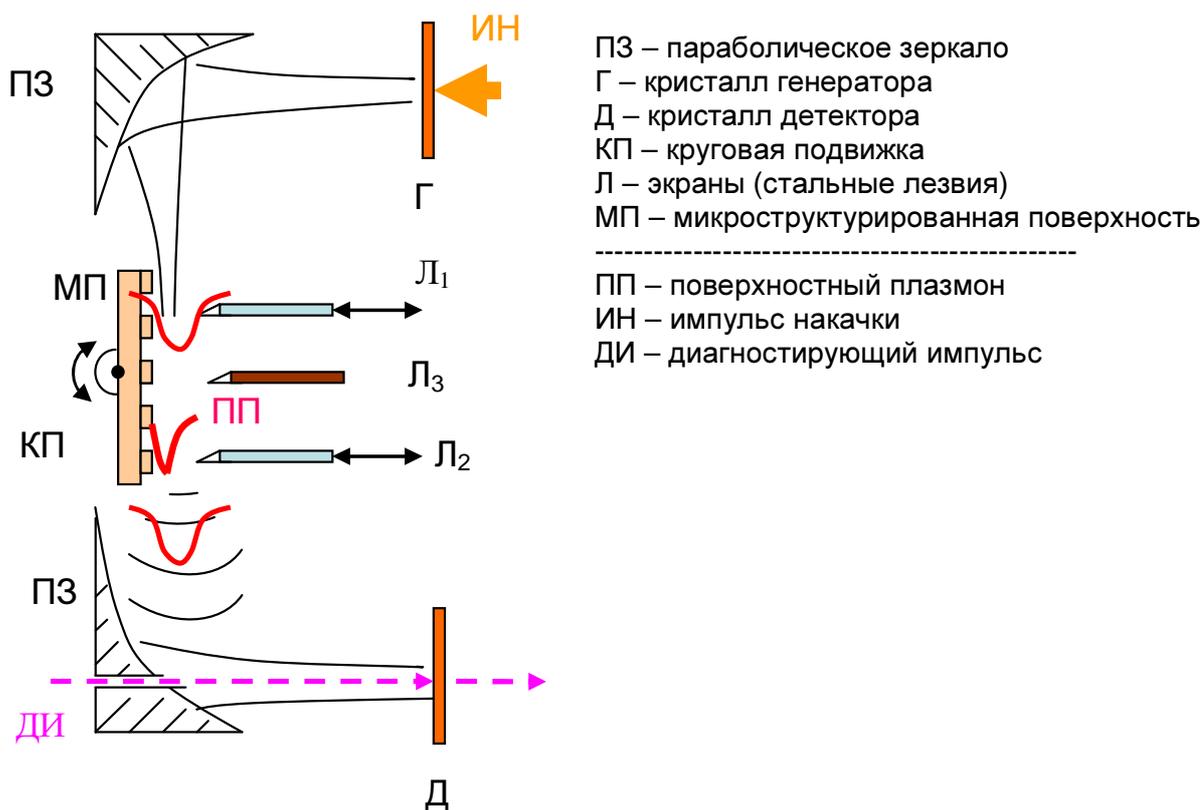


Рисунок 3.1.1.7 – Схема модернизированной части испытательного стенда для терагерцовых исследований.

На пятом этапе НИР были проведены исследования экспериментального образца для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами.

При этом в дополнение к уже созданным образцам микроструктурированной поверхности (тип 1) были созданы новые образцы (тип 2), изготовленные методом фотолитографии и травления на дюралюминиевой подложке размером 10x10x3 мм. Данная структура имела период 110 мкм, ширину канавок 30 мкм, глубину канавок 10 мкм (рисунок 3.1.1.8).

Было проведено экспериментальное исследование возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов, направляемых поверхностью типа 2, и их области локализации вблизи поверхности. Для генерации терагерцовых поверхностных плазмонов был использован метод, являющийся стандартным методом возбуждения терагерцовых поверхностных волн: накачка волноведущей структуры излучением внешнего источника свободной распространяющегося терагерцового излучения [14-

16]. При этом необходим некоторый элемент, позволяющий преобразовать свободно распространяющуюся волну в поверхностную волну, имеющую большее значение волнового числа. В качестве такого элемента в случае терагерцовых волн может выступать, например, расположенная вблизи волноведущей поверхности призма с высоким показателем преломления [15] или лезвие [14, 16], благодаря дифракции на кромке которых становится возможным возбуждение волн с большим, чем вакуумное, волновым числом. Недостатком такого метода является низкая (не превышающая нескольких процентов) эффективность преобразования объемной волны в поверхностную.

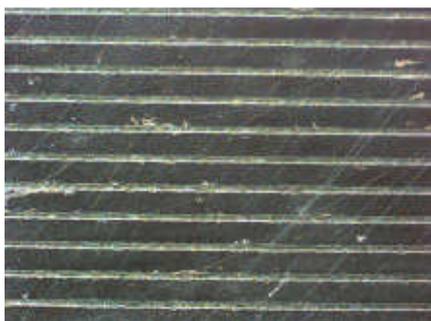


Рисунок 3.1.1.8 – Микрофотографии экспериментального образца для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов (тип 2).

В качестве первого приближения и для исследования волноведущих свойств экспериментального образца было решено использовать стандартный метод возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов с помощью дифракции. В качестве источника свободно распространяющегося терагерцового излучения был использован волновод типа «сэндвич-структура» (рисунок 3.1.1.9). Такой волновод был предложен и успешно применен участниками проекта для генерации объемного терагерцового излучения с рекордной эффективностью [10, 9].

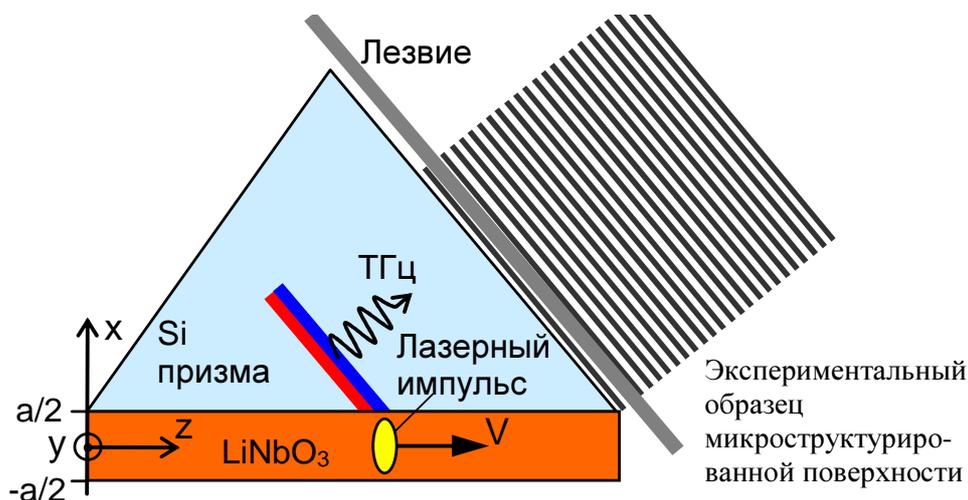


Рисунок 3.1.1.9 – Схема генерации терагерцовых поверхностных плазмонов: фемтосекундный лазерный импульс, сфокусированный в линию, распространяется в слое LiNbO_3 и излучает черенковский клин терагерцовых волн в кремниевую призму. На выходной грани призмы с помощью дифракции на лезвии осуществляется трансформация объемного терагерцового излучения в поверхностные терагерцовые волны, направляемые микроструктурированной металлической поверхностью.

При достижении волной края волноведущей поверхности происходит ее срыв с поверхности и трансформация с объемную волну, после чего ее можно продетектировать любым из стандартных способов. В настоящем эксперименте для детектирования волны использовался оптоакустический приемник (детектор Голея) и схема электрооптического детектирования. Для контроля локализации волны вблизи волноведущей поверхности использовалась система лезвий, установленных на микрометрических трансляторах [12]. Генерирующая структура рисунка 3.1.1.9 обозначена С на рисунке 3.1.1.10. Цилиндрическая линза Ц-1 служит для фокусировки лазерного пучка в вертикальном направлении (плоскость рисунка горизонтальна) до размера $\sim 50\text{--}100$ мкм (на входной грани сэндвич-структуры). Цилиндрическая линза Ц-2 служит для ввода пучка в плоский волновод, образованный слоем ниобата лития и кремниевой призмой. Контроль эффективного ввода лазерного излучения в волновод осуществляется с помощью системы переноса изображения (линза Л-1, десятикратное увеличение) и CCD камеры. Сэндвич-структура была закреплена на пятикоординатной микрометрической подвижке (три

угла поворота и трансляция в горизонтальной плоскости) для обеспечения эффективного ввода оптического излучения. Прохождение оптического излучения контролировалось по виду пучка на камере и по проходящей мощности излучения (измеряемой с помощью пироэлектрического измерителя мощности, не показан на рисунке 3.1.1.10). Величина прохождения $\sim 50\%$ является показателем хорошего ввода излучения (20% потери на отражение, 30% - на рассеяние на дефектах и поглощение). Гребенчатая структура закреплялась на отдельной четырехкоординатной микрометрической платформе (два угла поворота и трансляция в вертикальной плоскости). Для настройки генерации поверхностных волн гребенчатая структура поддвигалась к сэндвич-структуре до касания по всей длине. Высота положения гребенчатой структуры подбиралась таким образом, чтобы центр оптического пучка совпадал с верхней гранью структуры (настройка по CCD камере). Плотность прилегания гребенчатой поверхности к сэндвич-структуре контролировалась по мощности терагерцового излучения (свободно распространяющегося) из кремниевой призмы (с помощью ячейки Голэя, Г на рисунке 3.1.1.10). Уменьшение терагерцового выхода указывало на микронный сдвиг сэндвич-структуры гребенчатой поверхностью (величина сдвига оценена по оптическому изображению пучка на выходе волновода). Таким образом, с помощью оптического и терагерцового детектирования было с микронной точностью обеспечено требуемое взаимное расположение сэндвич-структуры и волноводящей поверхности.

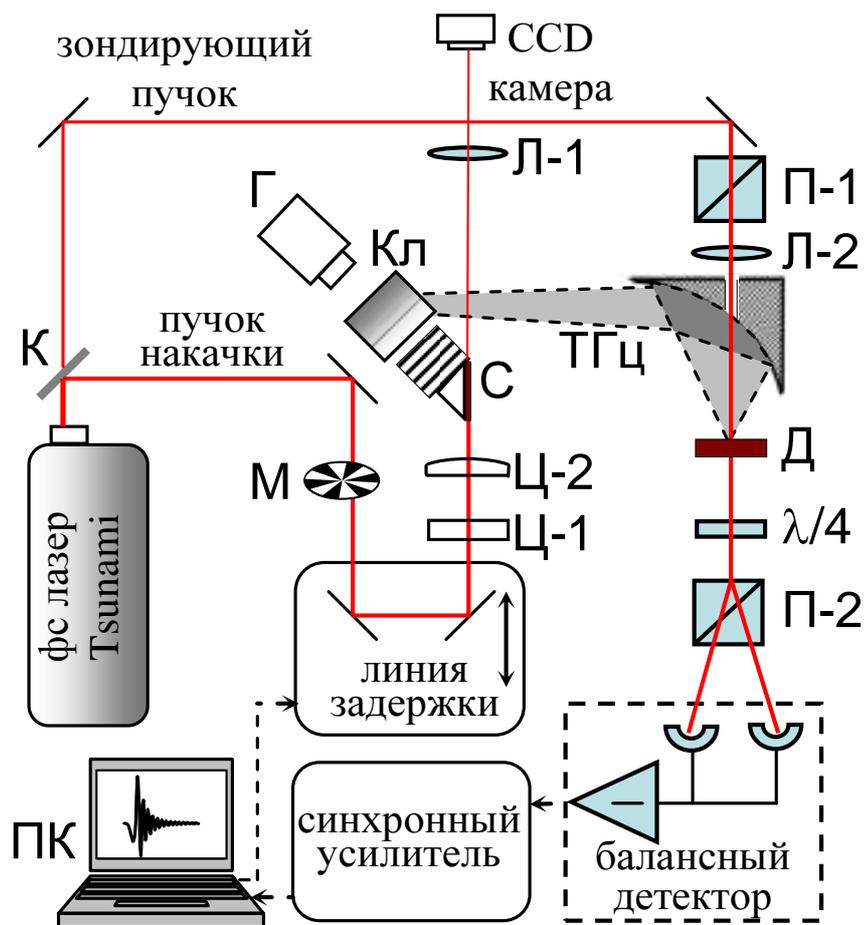


Рисунок 3.1.1.10 – Схема экспериментальной установки.

К – светоделительный клин

М – механический прерыватель

Ц-1 – цилиндрическая линза $f=150\text{мм}$

Ц-2 – цилиндрическая линза $f=70\text{мм}$

С – генерирующая структура

Л-1 – линза $f=100\text{мм}$ системы переноса изображения

Г – детектор Голея

Кл – система коллимации терагерцового излучения

П-1 – поляризатор (призма Глана)

Л-2 – линза $f=150\text{мм}$

П-2 – поляризатор (призма Волластона)

Д – кристалл детектора

$\lambda/4$ – четвертьволновая пластинка

ПК – персональный компьютер

Детектирование поверхностной волны осуществлялось с помощью ячейки Голэя с кремниевым фильтром (помещалась в терагерцовый пучок, ТГц на рисунке 3.1.1.10).

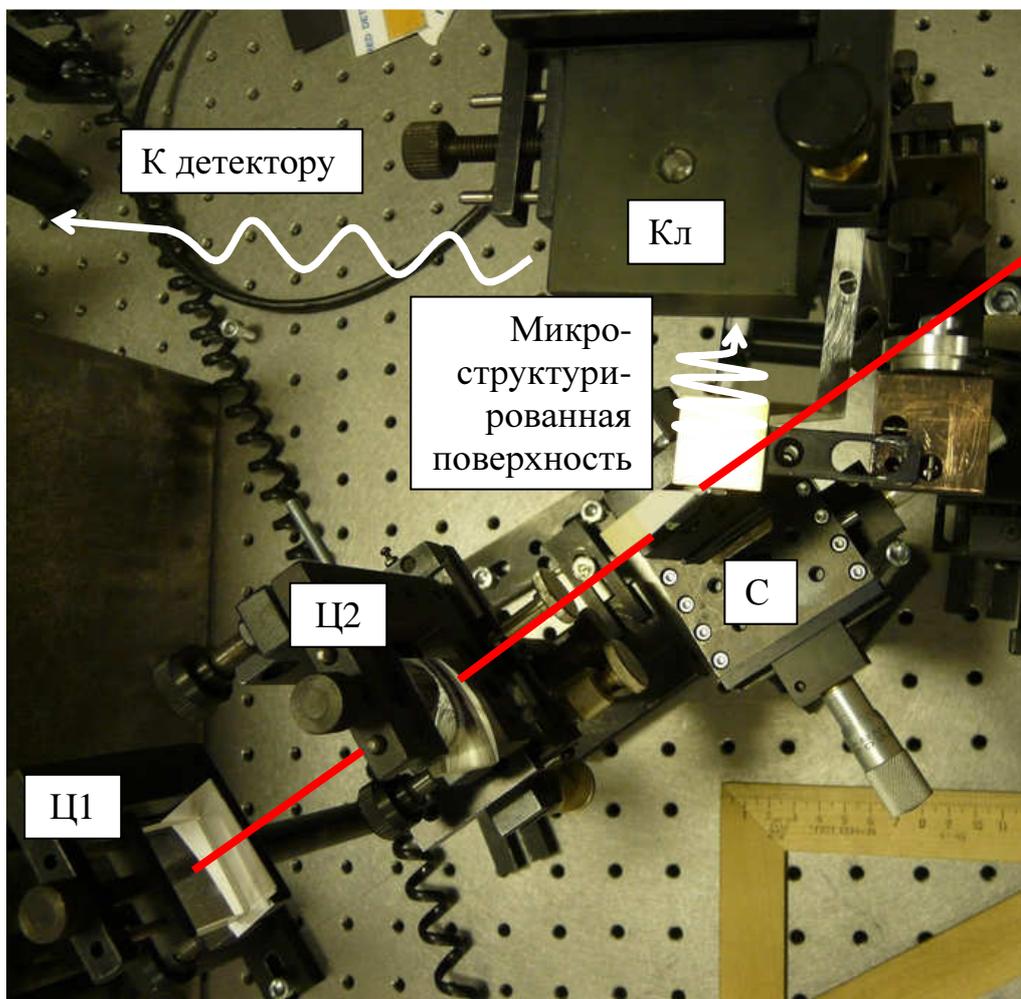


Рисунок 3.1.1.11 – Фотография центральной части экспериментальной установки (вид сверху). Обозначения элементов соответствуют схеме рисунка 3.1.1.10. Прямой жирной линией показан ход лазерного пучка, волнистой линией – ход терагерцового пучка. Светлый квадрат – микроструктурированная поверхность. Система лезвий отсутствует на фотографии.

Далее было выполнено экспериментальное определение оптимальных параметров оптической накачки для максимальной эффективности генерации терагерцовых поверхностных плазмонов. Данное исследование заключалось в

экспериментальной оптимизации ввода излучения в волновод сэндвич-структуры. Были подобраны такие параметры оптической накачки, как ширина пучка и положение фокуса в горизонтальном направлении (регулируется положением линзы Ц-2), ширина пучка в вертикальном направлении (регулируется положением линзы Ц-1). Процедура оптимизации проводилась в три этапа: 1) настройка фокусировки Ц-2 2) варьирование положения сэндвич-структуры и максимизация терагерцового сигнала с ячейки Голея 3) настройка фокусировки Ц-1 и максимизация терагерцового сигнала. Положение фокуса Ц-2 определялось с помощью системы переноса изображения. Путем продольного перемещения линзы Ц-2 достигалась минимальная ширина изображения пучка на камере, т.е. фокус Ц-2 помещался в плоскость, сопряженную плоскости матрицы. Затем с помощью тонкой проволоки, расположенной в пучке, определялось положение этой плоскости. Сэндвич-структура помещалась в фокус, а затем при визуальном наблюдении прохождения излучения через сэндвич-структуру проводилась оптимизация прохождения путем подстройки положения структуры (система переноса изображения в этом случае перестраивалась на выходную грань сэндвич-структуры). На втором этапе оптимизация проводилась по величине терагерцового сигнала с выхода сэндвич-структуры (из кремниевой призмы). На третьем этапе в пучок помещалась линза Ц-1. По максимуму терагерцового сигнала настраивалось положение фокуса линзы (при визуальном контроле прохождения излучения накачки).

Наконец, была измерена локализация поверхностных плазмонов. На рисунке 3.1.1.12 показана схема оптимизации возбуждения поверхностных плазмонов и измерения их области локализации. Эксперимент по оптимизации возбуждения был выполнен с целью увеличения эффективности ввода свободно распространяющегося терагерцового излучения в поверхностную волну. Для этого лезвие L_2 (см. рисунок 3.1.1.12) выставлялось на высоту h_2 порядка нескольких сотен микрометров над микроструктурированной поверхностью, а высота h_1 лезвия L_1 измерялась от нуля до одного-двух миллиметров.

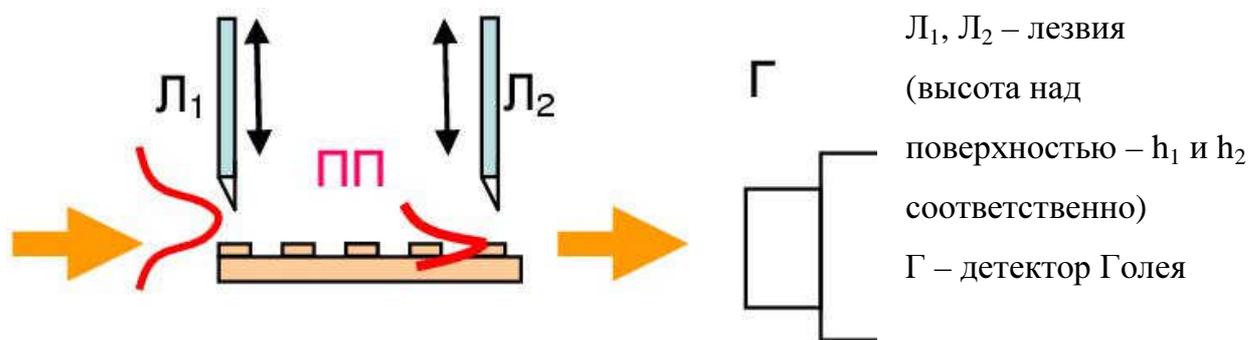


Рисунок 3.1.1.12 – Схема оптимизации возбуждения и измерения области локализации ПП.

В результате проведенных измерений было установлено, что оптимальное возбуждения поверхностных плазмонов происходит при h_1 около 600 мкм. В результате измерения области локализации было определено, что наибольшая мощность сосредоточена в плазмонах с областью локализации 700-800мкм.

Таким образом, в ходе экспериментального исследования источника терагерцовых поверхностных плазмонов были получены локализованные терагерцовые поверхностные волны, направляемые микроструктурированной поверхностью металла. Были экспериментально определены оптимальные параметры оптической накачки для наиболее эффективного возбуждения терагерцовых плазмонов. Была проведена экспериментальная оптимизация терагерцовой накачки микроструктурированной поверхности металла (подобраны оптимальные условия возбуждения плазмонов при дифракции на близко расположенном лезвии). Была измерена локализация терагерцовых плазмонов.

На пятом этапе НИР было проведено сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования

Было проведено сравнение теоретической эффективности предложенного метода генерации терагерцовых поверхностных плазмонов с соответствующей экспериментально измеренной величиной. Для этого была выполнена оценка эффективности генерации терагерцовых поверхностных плазмонов с помощью экспериментального образца для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами. Измерения проводились с помощью калиброванной ячейки Голя (чувствительности ячейки Голя к терагерцовому сигналу составила 5,8 кВ/Вт при измерениях на синхронном

детекторе). Полученное максимальное значение сигнала для терагерцовых поверхностных плазмонов соответствует терагерцовой средней мощности порядка 110 нВт при мощности накачки 0,8 Вт. Таким образом, эффективность возбуждения составляла величину до $1,4 \cdot 10^{-7}$. Данное значение эффективности учитывает потери на вывод излучения из волноведущей структуры с помощью дифракции на лезвии. Соответствующее теоретическое значение эффективности составляет величину $1,0 \cdot 10^{-6}$, что в 7 раз превышает экспериментальное значение эффективности. Такое отличие может быть связано с потерями терагерцовых поверхностных плазмонов при распространении по волноведущей поверхности, а также с неполным сбором излучения для детектирования. Отличие теоретического и экспериментального значения эффективности терагерцовой генерации на один порядок величины является типичным в практике создания импульсных терагерцовых источников [9].

Также на пятом этапе была выполнена корректировка разработанной документации по результатам исследований и испытаний. По скорректированной документации был изготовлен экспериментальный образец микроструктурированной поверхности металла более высокого качества.

Скорректированная документация для экспериментального образца была разработана исходя из возможностей эрозионного станка, с помощью которого удалось изготовить экспериментальный образец микроструктурированной поверхности металла более высокого качества. Диаметр проволоки эрозионного станка – 4 мкм – позволял изготовить гребенчатую структуру с шириной канавок 20 мкм, глубиной 40 мкм и периодом 60 мкм. Эскиз экспериментального образца представлен на рисунке 3.1.1.13, микрофотографии образца – на рисунке 3.1.1.14.

№1

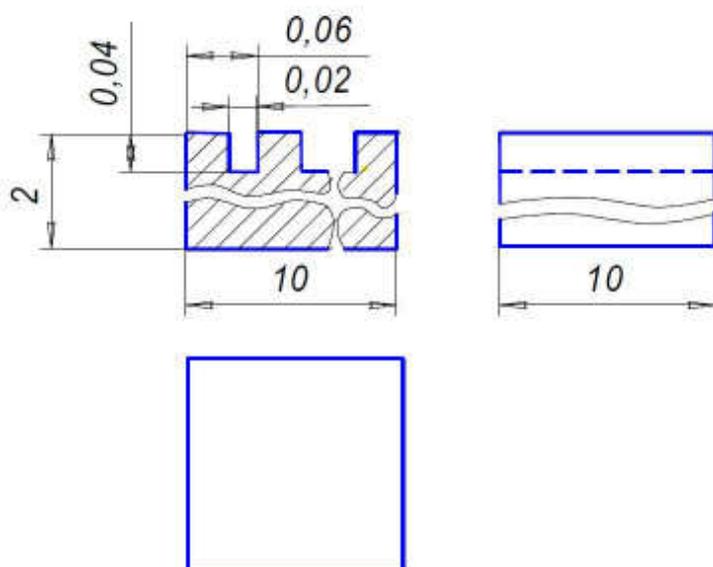


Рисунок 3.1.1.13 – Скорректированный эскиз экспериментального образца для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами

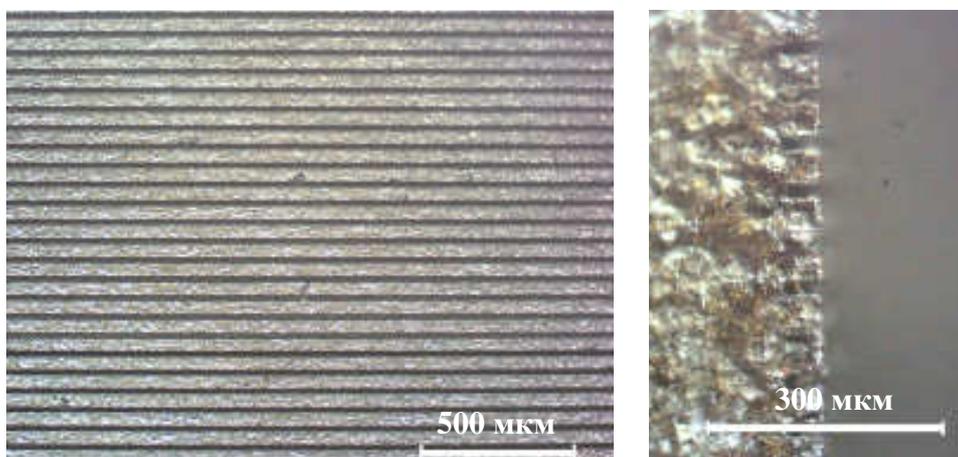


Рисунок 3.1.1.14 – Микрофотографии изготовленного по скорректированной документации экспериментального образца для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами. Слева: вид сверху, справа: вид сбоку.

3.1.2 Генерация объемного терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах с использованием сэндвич-структуры и лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивности

В ходе выполнения предыдущих этапов проекта были проведены комплексные экспериментальные и теоретические исследования по генерации объемного терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах с использованием сэндвич-структуры и лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивности. В обеих схемах были разработаны теоретические модели, описывающие характеристики генерируемого терагерцового излучения и предсказывающие подбор оптимальных параметров лазерной накачки и размеров определенных электрооптических кристаллов.

Проведены экспериментальные исследования данных схем с использованием электрооптического кристалла LiNbO_3 . Преимущество данного кристалла являются большая квадратичная нелинейность в терагерцовом диапазоне, большая оптическая стойкость и относительно малым многофотонным поглощением для оптического излучения накачки на длине волны более 800 нм. Недостатки: во-первых, двукратное различие показателя преломления для оптического и терагерцового излучений, во-вторых, сильное поглощение терагерцового излучения, например, для 1ТГц около 10 см^{-1} .

Проведенные экспериментальные исследования дали хорошее совпадение с теоретическими расчетами для обеих схем генерации в режиме, когда оптическое излучение распространяется в электрооптических кристаллах без существенных нелинейных искажений. Экспериментально продемонстрированы предельные режимы генерации терагерцового излучения при больших интенсивностях лазерного излучения.

Идея использования сэндвич структуры для генерации ТГц излучения в электрооптическом кристалле LiNbO_3 заключается в следующем. Если лазерный импульс сильно сфокусировать в кристалл LiNbO_3 (в размер меньше длины волны терагерцового излучения), то наводимая лазерным импульсом нелинейная поляризация будет излучать электромагнитный импульс пикосекундной длительности в виде черенковского конуса или, при фокусировке оптического импульса в линию, в виде черенковского клина. Такой импульс является

широкополосным импульсом терагерцового излучения. Для того, чтобы терагерцовое черенковское излучение не поглощалось в кристалле LiNbO_3 , вывод излучения можно организовать через материал со слабым поглощением в ТГц диапазоне, например кремний. Поскольку сфокусированное лазерное излучение испытывает сильное дифракционное расхождение, то для увеличения длины эффективного взаимодействия оптического излучения с кристаллом было предложено использовать тонкий слой ниобата лития. Таким образом, используя тонкую (~ 50 мкм) пластину LiNbO_3 и располагая кремний на боковой, например верхней, поверхности пластины LiNbO_3 можно эффективно преобразовывать лазерное излучение в терагерцовое. Дополнительным элементом данной структуры является металлическая подложка, которая может располагаться на небольшом расстоянии от нижней поверхности слоя LiNbO_3 . При распространении лазерного импульса в слое ниобата лития и генерации терагерцового черенковского клина (или конуса) одна (верхняя) часть клина высвечивается в кремниевую призму сразу, вторая часть (нижняя) отражается от границы нижнего слоя LiNbO_3 , а затем высвечивается в призму. Две эти части интерферируют в призме и формируют один терагерцовый импульс. При отражении терагерцовой волны от нижней границы ниобата лития формируется ближнее терагерцовое поле в вакууме, на которое можно частично влиять. Для этого и используется металлическая подложка: она меняет фазу отраженной волны и, как следствие, форму и спектр результирующего терагерцового импульса. Данный эффект действительно наблюдался в эксперименте: спектр терагерцового излучения перестраивался путем варьирования толщины воздушного промежутка в диапазоне от 0 до 20 мкм.

Одной из основной целью проведенного эксперимента с использованием сэндвич-структуры было получение высокой эффективности оптико-терагерцового преобразования. Данный результат был достигнут: продемонстрирована эффективность 0.25% при использовании накачки на длине волны 0.8 мкм и 0.3% - на длине волны 1.38 мкм. Длительность лазерного импульса накачки составляла около 50 фс. Отметим, что для получения указанных значений эффективности при накачке на 0.8 мкм требуется меньшая лазерная энергия (~ 10 мкДж), чем при накачке на 1.38 мкм (~ 50 мкДж). С другой стороны для получения ТГц импульсов большого, субмикроджоульного, уровня энергии более оптимальным является использование

накачки на 1.38 мкм. В ходе эксперимента было обнаружено, что отрицательно chirпированные лазерные импульсы позволяют в 1.5-2 раза увеличить эффективность оптико-терагерцовой конверсии при небольшой энергии лазерной накачки.

Другая схема генерации терагерцового излучения основана на использовании лазерных импульсов специальной геометрии – со скошенным фронтом интенсивности относительно фазовых фронтов. Такие импульсы позволяют создать условие синхронизированной генерации ТГц излучения в кристалле LiNbO_3 . В рамках проекта была разработана двумерная теория генерации ТГц излучения в данной схеме, исследована динамика формирования ТГц поля в кристалле, предсказаны оптимальные параметры кристалла для максимальной эффективности оптико-терагерцовой конверсии. Проведенный эксперимент подтвердил теоретические расчеты. Более того, было обнаружено, что при сильно нелинейном режиме взаимодействия лазерного излучения с кристаллом, когда проявляются нелинейные эффекты самовоздействия лазерного излучения, проявляется насыщение эффективности генерации и даже уменьшение эффективности с увеличением энергии накачки. Насыщение эффективности зависит от длины кристалла и длительности лазерного импульса. В результате было показано, что при малой энергии лазерной накачки более эффективно использовать кристаллы длиной около 10 мм и длительность лазерного импульса 200-300 фс, при большой энергии накачки короткие кристаллы, около 5 мм, и короткие импульсы, длительностью менее 100 фс.

3.1.3 Разработка метода генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред

Разработка физических подходов и математических моделей для исследования процессов, происходящих при взаимодействии мощного лазерного излучения с плазмой, газами и конденсированными веществами, составляет важную проблему современной физики. Этот факт обусловлен значительным прогрессом, достигнутым в последние годы в технике генерации ультракоротких интенсивных лазерных импульсов, способных производить быструю ионизацию среды, превращая ее в плотную лазерную плазму. В процессе создания плазмы может происходить сильная трансформация взаимодействующих с ней электромагнитных волн, что может приводить к ряду новых интересных физических явлений, привлекающих в

настоящее время большое внимание исследователей. Интерес к этим явлениям обусловлен возможностями их использования для разработки эффективных методов генерации мощного электромагнитного излучения в труднодоступных и плохо освоенных областях частотного спектра, в частности, в терагерцовом (находящимся между СВЧ и оптическим диапазонами), ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах частот. Перспективы использования явлений трансформации электромагнитных полей в нестационарной лазерной плазме для разработки методов генерации излучения в труднодоступных областях частотного спектра, а также причины, по которым эти методы выгодно отличаются от других, разрабатываемых в настоящее время, заключаются, главным образом, в возможностях реализации сравнительно простых способов управления параметрами генерируемого излучения в широких пределах за счет изменения параметров ионизируемой среды или параметров самого ионизирующего лазерного импульса, а также в реальных перспективах получения сверхкоротких (содержащих всего один период электромагнитного поля) электромагнитных импульсов, обладающих гигантской (рекордной для указанных диапазонов в настоящее время) пиковой мощностью, вплоть до гигаваттных значений в терагерцовом диапазоне и десятков гигаватт в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах частот. Генерация сверхкоротких импульсов терагерцового, ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения с перестраиваемыми характеристиками актуальны для развития методов спектроскопии в этих диапазонах, в частности для приложений, требующих высокого пространственного и временного разрешения. Такие источники имеют большие перспективы использования для диагностики различных материалов, включая полупроводники, химические соединения, биомолекулы и биоткани; для формирования изображений, томографии и интравидения.

Одной из целей настоящего проекта являлись разработка физических подходов и математических (аналитических и численных) моделей для анализа процессов трансформации электромагнитных волн в нестационарной лазерной плазме вследствие возбуждения в ней собственных колебаний и волн и последующего переизлучения запасенной в них энергии в окружающее пространство; а также разработка и внедрение новых методов и подходов в области математического моделирования сложных физических процессов, из которых наиболее важным

является впервые используемый единый подход, включающий в себя в общем случае решение точных трехмерных уравнений Максвелла для описания электромагнитных полей в плазме и в окружающем пространстве и решение трехмерного нестационарного уравнения Шредингера для квантовомеханических расчетов процессов ускорения электронов и возбуждения электронных токов в нестационарной лазерной плазме.

В ходе выполнения проекта поставленные цели были достигнуты. Была создана численная модель, предназначенная для расчетов процессов генерации электронных токов в нестационарной плазме, производимой интенсивными ультракороткими лазерными импульсами, на основе одномерных, двухмерных и трехмерных квантовых моделей и допускает возможность параллельных вычислений. Созданная численная модель позволяет находить указанные электронные токи в широком диапазоне интенсивностей и длительностей лазерных импульсов для последующего анализа генерируемого излучения. Также были созданы электродинамические модели, позволяющие рассчитать процессы трансформации электромагнитных полей различных частотных диапазонов при распространении волн ионизации, создаваемых короткими интенсивными лазерными импульсами. Оба этих достижения востребованы для дальнейших научных исследований, и могут быть использованы для оптимизации существующих схем генерации терагерцового излучения при ионизации газов или конденсированных сред фемтосекундными лазерными импульсами.

3.2 Разработка рекомендаций по практическому использованию результатов НИР

3.2.1 Оценка возможности применения схемы генерации широкополосного терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в сэндвич-структуре и применении лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивности.

Схемы генерации широкополосного терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в сэндвич-структуре и с

применением лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивности могут служить основой создания компактного и дешевого терагерцового источника с высокой, милливаттного уровня, средней мощностью. В ходе выполнения проекта для данной схемы продемонстрирована высокая эффективность, более 0.2%, при энергии накачки ~ 10 мкДж и частоте повторения 1 кГц, и около 0.01% при энергии накачки несколько нДж и частоте повторения 80 МГц. Достигнута максимальная энергии в терагерцовом импульсе 150 нДж при мДж накачке, а средняя мощность 150 мкВт и 60 мкВт при мкДж и нДж уровнях накачки, соответственно. При сравнении с другими существующими источниками широкополосного ТГц излучения, в которых используются фотопроводящие антенны или другие электрооптические кристаллы, можно сказать, что достигнутые значения порядка и превосходят энергетические характеристики данных источников. Более того, в настоящее время активно разрабатываются источники фемтосекундного излучения на длине волны около 1 мкм на основе твердотельных и волоконных иттербиевых лазеров. Такие лазеры позволяют генерировать импульсы с энергией несколько мкДж и мегагерцовой частотой повторения. Такой лазер является идеальным источником накачки для разработанной сэндвич-структуры и может преобразовывать лазерное излучение в терагерцовое с эффективностью более 0.1%. Таким образом можно реализовать ТГц источник с уникальными характеристиками: средней мощностью несколько милливатт, шириной спектра от 0.1 до 3-4 ТГц и энергией в импульсе несколько нДж.

3.2.2 Оценка возможности применения метода генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред

Полученные результаты будут использованы при разработке наиболее эффективных методов генерации терагерцового излучения, а также для совершенствования методов оптической диагностики наноразмерных структур. Будут разработаны эффективные схемы для проведения дальнейших исследований генерации мощного терагерцового излучения на базе лазерных комплексов, как за рубежом, так и в России. В частности, полученные результаты могут быть использованы в Объединенном институте высоких температур РАН (г. Москва), Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (г. Саров), Институте лазерной физики Сибирского отделения РАН и др. Терагерцовое

излучение, генерируемое с использованием разработанных в ходе выполнения НИР эффективных методов, будет использовано также для проведения последующих НИР по исследованию влияния мощного широкополосного терагерцового излучения на биоткани с целью разработки методов диагностики ранних стадий заболеваний и отклонений в жизнедеятельности клеток и, в частности, для разработки методов ранней диагностики раковых образований.

3.2.3 Оценка возможности создания компактного и эффективного источника терагерцовых поверхностных плазмонов, направляемых структурированной поверхностью металла

В целом в ходе проекта была решена главная задача – создание компактного и эффективного источника терагерцовых поверхностных плазмонов, направляемых структурированной поверхностью металла. Эффективность источника составила $1,4 \cdot 10^{-7}$, что является хорошим показателем даже для свободно распространяющегося излучения, возбуждаемого импульсами с наноджоульным уровнем энергии. Удалось добиться локализации поверхностных плазмонов на масштабе порядка длины терагерцовой волны (600 мкм). Такой источник, однако, был реализован не совсем таким способом, как предполагалось на первом этапе проекта: в качестве нелинейной среды, служащей для создания движущейся нелинейной поляризации, была использована волноводная сэндвич-структура [9], использовавшаяся ранее для генерации свободно распространяющегося излучения. Благодаря наличию оптического волновода в данной структуре в эксперименте удалось обеспечить достаточно длинную трассу взаимодействия генерируемых терагерцовых ПП и нелинейной поляризации, возбуждаемой оптическими импульсами. Путем фотолитографии и травления алюминиевой поверхности удалось создать экспериментальный образец микроструктурированной поверхности с периодом, много меньшим длины терагерцовой волны, что обеспечивает одномодовый режим возбуждения поверхностных волн. Данный образец позволил получить поверхностные волны с размером области локализации вблизи поверхности порядка одной длины волны. Получение субволновой локализации на подобных образцах оказалось затруднительным из-за малого отношения глубины канавок микроструктуры к периоду структуры. Благодаря применению эрозионного метода

удалось изготовить образец, в котором это отношение равно $1/2$ (глубина и ширина канавок – 30 мкм), что должно обеспечивать субволновую локализацию плазмонов.

3.3 Разработка рекомендаций по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов

Результаты НИР активно внедряются в образовательный процесс на радиофизическом факультете и факультете «Высшая школа общей и прикладной физики» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского в рамках научно-образовательного центра «Фундаментальная и прикладная радиофизика».

За 2010-2012 годы созданы или переработаны 6 курсов лекций, в которых используются результаты, полученные при выполнении НИР: «Лазерные методы генерации терагерцового излучения», «Сверхсильные оптические поля», «Фемтосекундная оптика», «Численные методы прикладной электродинамики», «Электромагнитное моделирование», «Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами».

Созданы и оснащены новым оборудованием учебно-исследовательские лаборатории терагерцовых исследований, аттосекундной оптики, терагерцовой спектроскопии, твердотельных лазеров, лазеров субтераваттного уровня мощности.

Разработаны 5 учебно-методических пособий для студентов и аспирантов к лекционным, практическим и лабораторным циклам по лазерной физике и спектроскопии.

В выполнении научно-исследовательских работ по теме НИР приняли участие 2 доктора и 5 кандидатов наук, 6 студентов и 4 аспиранта. Результаты выполнения НИР представлены в 1 докторской и 4 кандидатских диссертациях.

В рамках выполнения проекта и его дальнейшего развития в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского создана Исследовательская школа «Лазерная физика». Основной целью Исследовательской школы является подготовка аспирантов и магистрантов к профессиональной деятельности в области фундаментальных и прикладных научных исследований и в высокотехнологичных отраслях экономики на уровне современных международных стандартов. Исследовательская школа обеспечивает разработку и реализацию структурированных

программ подготовки аспирантов и магистрантов с учетом специфики, отвечающей научному направлению «Лазерная физика».

Базовыми подразделениями Исследовательской школы являются кафедра общей физики, кафедра квантовой радиофизики, кафедра электродинамики, лаборатория по изучению экстремальных световых полей, лаборатория оптического нейромиджинга, проводящие научные исследования в области физики лазеров, физики взаимодействия лазерного излучения с веществом, нелинейной оптики, генерации и применения терагерцового излучения, биофотоники и лазерной медицины.

Система подготовки научных и научно-педагогических кадров высшей квалификации в Исследовательской школе включает в себя два образовательных уровня: магистратуру и аспирантуру.

Программы подготовки магистров и кандидатов наук содержат следующие обязательные блоки: 1) научно-исследовательская работа и подготовка диссертации, 2) образовательная программа, 3) практика (педагогическая, производственная, научные стажировки).

Программы подготовки магистров и кандидатов наук соответствуют требованиям государственных образовательных стандартов и федеральным государственным требованиям к структуре программ послевузовского профессионального образования.

Образовательные программы Исследовательской школы направлены на развитие профессиональных, социальных и культурных компетенций для работы в наукоёмкой профессиональной среде в сфере высшего образования, науки и высокотехнологичных отраслей экономики.

3.4 Разработка учебно-методических пособий, учебных курсов, лабораторных практикумов

В рамках выполнения НИР в 2010-2012 годах разработаны и переработаны 7 учебных программ курсов лекций по направлению «Лазерная физика».

1. Учебная программа курса лекций «Лазерная спектроскопия».

Курс лекций предназначен для подготовки магистров радиофизики в рамках специализации «Квантовая радиофизика и лазерная физика». Цель курса -

сформировать у студентов современное представление об основных принципах линейной и нелинейной лазерной спектроскопии.

Особое внимание уделяется изучению процессов преобразования энергии в веществе при резонансном интенсивном лазерном возбуждении, технике эксперимента, реально достижимой чувствительности методов.

2. Учебная программа курса «Полупроводниковые лазеры в оптической связи и измерительных системах».

Курс является продолжением теоретического курса “Квантовая радиофизика”, читаемого в системе подготовки бакалавра физических наук и специалиста по радиофизике, и спецкурса “Физика лазеров”, читаемого для студентов, специализирующихся на кафедре квантовой радиофизики. В данном курсе рассмотрены основные вопросы, связанные с современной элементной базой квантовой электроники и волоконной оптики и применения полупроводниковых лазерных диодов в качестве основного источника когерентного излучения в системах радиофизических измерений и передачи информации. В качестве исходной математической модели описания полупроводникового лазерного источника выбрана кинетическая модель на основе балансных скоростных уравнений полупроводникового лазера, что позволяет проанализировать все основные особенности поведения данного типа излучателей в различных системах квантовой электроники и волоконной оптики.

Цель курса - сформировать у студента современное представление об основных физических принципах построения систем волоконно-оптической связи, о современной элементной базе, применяемой в волоконной технике и лазерной измерительной технике, а также о наиболее важных и перспективных областях применения полупроводниковых лазерных излучателей.

3. Учебная программа курса «Сверхсильные оптические поля».

Целями изучения курса являются ознакомление с методами генерации сверхсильных лазерных полей; изучение поведения вещества в сверхсильных полях; исследование возможностей и особенностей применения сверхсильных лазерных полей.

4. Учебная программа курса «Фемтосекундная оптика».

Цель курса - сформировать у студентов основные представления о методах генерации ультракоротких (фемтосекундных) лазерных импульсов и о взаимодействии фемтосекундных импульсов с веществом.

5. Учебная программа курса «Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами».

Цели курса - изучение физических принципов генерации и регистрации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами; формирование знаний и умений в области терагерцовой спектроскопии.

6. Учебная программа курса «Электромагнитное моделирование».

Цель преподавания дисциплины - изучение основных принципов и практических методов численного расчета электромагнитных волновых полей, а также современных программных средств электромагнитного моделирования. Объектами изучения в данной дисциплине являются: уравнения Максвелла с материальными уравнениями для электромагнитных полей в различных средах; модели, методы и технологии электромагнитного моделирования; средства и методы разработки программ моделирования электромагнитных полей на компьютере; профессиональное программное обеспечение для электромагнитного моделирования.

7. Учебная программа курса «Электродинамика высокочастотных и оптических разрядов».

Цель курса – сформировать у студентов современное представление о методах расчета структуры и параметров плазменных неоднородностей, формируемых полем излучения.

Курс состоит из двух частей: I – “Высокочастотные разряды в волновых полях” II – “Нелинейные явления при излучении антенн в плазме”. В первой части рассматриваются элементарные и коллективные процессы, определяющие процессы ионизации в ВЧ разряде и влияние плазмы разряда на величину и структуру возбуждающего поля. Анализируются основные типы ионизационно-полевых неустойчивостей разряда. Во второй части рассматриваются особенности формирования плазменно-полевой неоднородности при разряде в присутствии внешнего магнитного поля и влияния этой неоднородности на радиационные характеристики нелинейных дипольных антенн. Обсуждаются результаты лабораторных и натурных экспериментов по исследованию нелинейных явлений при

излучении антенн в плазме, как изотропной, так и замагниченной. Анализируются возможности формирования в ионосфере активных плазменных антенн ОНЧ и КНЧ диапазонов. Обсуждаются строение магнитосферы Земли и физика альвеновского магнитосферного мазера.

Разработаны 6 методических пособий по курсам лекций и лабораторным работам по направлению «Лазерная физика».

1. Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами. 2010. 76 с.

2. Бакунов М.И., Царев М.В., Горелов С.Д. Электрооптическое стробирование. 2011. 40 с.

3. Скрыль А.С., Царев М.В. Применение терагерцового излучения для исследования предметов искусства. 2011. 39 с.

4. Машкович Е.А., Бакунов М.И. Автокорреляционные методы измерения длительности ультракоротких лазерных импульсов. 2011. 41 с.

5. Семиков С.А. Методы компрессии лазерных импульсов. 2011. 48 с.

6. Электродинамика. Сборник задач. Составители: Гильденбург В.Б., Марков Г.А., Юрасова Н.В. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2010. – 56 с.

4 Публикации результатов НИР

По результатам выполнения задач 6 этапа опубликовано 2 статьи в иностранных и российских журналах, сделано 2 докладѣ на международных конференциях.

Заключение

Поставленные на 6 этап задачи выполнены полностью.

1. Проведены дополнительные экспериментальные исследования по теме НИР.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование возможности эффективной терагерцовой генерации в сэндвич-структуре при использовании малоэнергичной лазерной накачки и двумерной фокусировкой накачки в слой LiNbO_3 (LN). Измерена средняя терагерцовая мощность сгенерированная сэндвич структурой как функция мощности оптической накачки. Показано, что эффективность конверсии доходит до 0.8×10^{-4} и 5×10^{-5} для схемы с одной и двумя линзами, соответственно, что хорошо согласуется с теоретическими оценками.

Проведено сравнение численных симуляций динамики поля и плазмы при ионизации окружающего воздуха лазерными импульсами, сфокусированной аксиальной линзой и экспериментальных результатов. Показано, что спектр и эффективность генерации терагерцового излучения, полученные в численных расчётах и эксперименте, находятся в хорошем согласии друг с другом. Рассмотрен вклад в терагерцовое излучение, даваемый наложением внешнего статического электрического поля.

2. Проведено обобщение и оценка результатов исследований

Проведено обобщение и оценка метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла. Разработана полная теория метода генерации терагерцовых поверхностных плазмонов для произвольной ориентации скорости сверхсветового нелинейного источника (нелинейной полоски) относительно бороздок гребенчатой структуры. Исследована структура полей и спектрально-угловое распределение энергии генерируемых поверхностных плазмонов для различных ориентаций скорости источника. Найдены условия (параметры гребенчатой структуры, угол падения лазерного импульса), обеспечивающие максимальную эффективность оптико-терагерцовой конверсии.

Проведено обобщение и оценка экспериментальных и теоретических исследований по генерации объемного терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах с использованием сэндвич-

структуры и лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивности. В обеих схемах были разработаны теоретические модели, описывающие характеристики генерируемого терагерцового излучения и предсказывающие подбор оптимальных параметров лазерной накачки и размеров определенных электрооптических кристаллов, а также проведены экспериментальные исследования данных схем с использованием электрооптического кристалла LiNbO_3 . Показано, что проведенные экспериментальные исследования дали хорошее совпадение с теоретическими расчетами для обеих схем генерации в режиме, когда оптическое излучение распространяется в электрооптических кристаллах без существенных нелинейных искажений.

Проведено обобщение и оценка разработанного метода генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред. Показано, что созданная численная модель, предназначенная для расчетов процессов генерации электронных токов в нестационарной плазме, производимой интенсивными ультракороткими лазерными импульсами, позволяет находить указанные электронные токи в широком диапазоне интенсивностей и длительностей лазерных импульсов для последующего анализа генерируемого излучения.

3. Разработаны рекомендации по практическому использованию результатов НИР.

4. Разработаны рекомендации по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов.

5. Разработаны учебно-методические пособия, учебные курсы, лабораторные практикумы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Blanchard, F.** Generation of 1.5 J single-cycle terahertz pulses by optical rectification from a large aperture ZnTe crystal / F. Blanchard, L. Razzari, H.C. Bandulet, G. Sharma, R. Morandotti, J. C. Kieffer, T. Ozaki, M. Reid, H. F. Tiedje, H. K. Haugen, F. A. Hegmann // *Opt. Express.* – 2007. – Vol. 15. – P. 13212.
- 2 **Bartel, T.** Generation of single-cycle THz transients with high electric-field amplitudes / T. Bartel, P. Gaal, K. Reimann, M. Woerner, T. Elsaesser // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30, no. 20. – Pp. 2805–2807.
- 3 **Terahertz optoelectronics.** K. Sakai (Ed.). Springer, 2005
- 4 **Stepanov, A. G.** Generation of 30 mJ single-cycle terahertz pulses at 100 Hz repetition rate by optical rectification / Stepanov A.G., Bonacina L., Chekalin S.V., Wolf J.-P. // *Opt. Lett.* – 2008. – Vol. 33, no. 21. – Pp. 2497–2499.
- 5 **Bakunov, M. I.,** Reversed Cherenkov emission of terahertz waves from an ultrashort laser pulse in a sandwich structure with nonlinear core and left-handed cladding, / Bakunov, M. I., Mikhaylovskiy, R.V., Bodrov, S.B., and Luk'yanchuk B.S., // *Opt. Express* – 2010 – Vol. 18 – P. 1684-1694.
- 6 **Bakunov, M. I.** Cherenkov emission of terahertz surface plasmon polaritons from a superluminal optical spot on a structured metal surface / M. I. Bakunov, M. V. Tsarev, M. Hangyo // *Optics Express.* – 2009. – Vol. 17. – P. 9323–9329.
- 7 **Bakunov, M. I.** Fresnel formulas for the forced electromagnetic pulses and their application for optical-to-terahertz conversion in nonlinear crystals / Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 99. – P. 203904.
- 8 **Bystrov, A.M.,** Infrared to Ultraviolet Light Conversion in Laser-Cluster Interactions / Bystrov, A.M., Gildenburg, V.B. // *Phys. Rev. Lett.* – 2009 – Vol. 103. – P. 083401.
- 9 **Bodrov, S. B.** Highly efficient optical-to-terahertz conversion in a sandwich structure with LiNbO₃ core / S. B. Bodrov, A. N. Stepanov, M. I. Bakunov, B. V. Shishkin, I. E. Ilyakov, R. A. Akhmedzhanov // *Optics Express.* – 2009. – Vol. 17. – P. 1871–1879.
- 10 **Bodrov, S. B.** Efficient Cherenkov emission of broadband terahertz radiation from an ultrashort laser pulse in a sandwich structure with nonlinear core / S. B. Bodrov, M. I. Bakunov, M. Hangyo // *Journal of Applied Physics.* – 2008. – Vol. 104. – P. 093105.

11 **Ахмеджанов Р. А.**, Генерация терагерцового излучения при аксиальной фокусировке ионизирующих лазерных импульсов / Р. А. Ахмеджанов, И. Е. Иляков, В. А. Миронов, Е. В. Суворов, Д. А. Фадеев, Б. В. Шишкин // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2008. – Т. 88. – С. 659–663.

12 **Bakunov, M. I.** Cherenkov radiation of terahertz surface plasmon polaritons from a superluminal optical spot / Bakunov M.I., Maslov A.V., Vodrov S.B. // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 72. – P. 195336.

13 **Бакунов, М.И.** Оптическая генерация терагерцовых плазмонов на гребенчатой поверхности металла / М.И. Бакунов, М.В. Царев, С.Б. Бодров // Оптика и спектроскопия. – 2010. – Т. 108, № 6. – С. 718–724.

14 **Williams, C. R.** Highly confined guiding of terahertz surface plasmon polaritons on structured metal surfaces / R. Williams, S. R. Andrews, S. A. Maier, A. I. Fernandez-Dominguez, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal // Nature Photon. – 2008. – Vol. 2. – Pp. 175–179.

15 **O’Hara, J. F.** Prism coupling to terahertz surface plasmon polaritons / O’Hara J.F., Averitt R.D., Taylor A.J. // Opt. Express. – 2005. – Vol. 13, no. 16. – Pp. 6117–6126.

16 **Isaac, T. H.** Determining the terahertz optical properties of subwavelength films using semiconductor surface plasmons / Isaac T.H., Barnes W. L., Hendry E. // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 93. – P. 241115.