

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» |
| Проректор по научной работе _____/Гурбатов С.Н./ М.П. |

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 5 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) |

Нижний Новгород
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, без
ученого звания _____ 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

_____ Пигалин М. 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 71 с., 1 ч., 32 рис., 0 табл., 14 источн., 0 прил.

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

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 5 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.

Экспериментально подтвержден эффект прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на структурированной поверхности металла. Найдены оптимальные условия возбуждения плазмонов (длительность лазерного импульса, угол падения лазерного импульса на поверхность, ориентация электрооптической полоски по отношению к структуре и др.).

Реализованы новые режимы генерации терагерцового излучения лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности. Достигнуты рекордные

значения эффективности генерации.

Проведена корректировка разработанных теорий на основе результатов экспериментов.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение | 8 |
| 1 Аналитический отчет о проведении экспериментальных исследований | 10 |
| 1.1 Проведение экспериментальных исследований по прямому нелинейно-оптическому возбуждению терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами, обработка данных | 10 |
| 1.1.1 Описание схемы исследования экспериментального образца | 10 |
| 1.1.2 Экспериментальное определение оптимальных параметров оптической накачки для максимальной эффективности генерации терагерцовых поверхностных плазмонов | 16 |
| 1.1.3 Измерение области локализации терагерцовых поверхностных плазмонов | 16 |
| 1.2 Проведение экспериментальных исследований по генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности, обработка данных | 19 |
| 1.2.1 Описание схемы эксперимента | 19 |
| 1.2.2 Результаты эксперимента | 21 |
| 1.3 Проведение экспериментальных исследований по генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред, обработка данных | 26 |
| 1.3.1. Экспериментальная установка | 26 |
| 1.3.2 Терагерцовое излучение из аксиконного разряда | 28 |
| 1.3.3 Генерация терагерцового излучения при обычной фокусировке ионизирующих лазерных импульсов (с использованием сферических линз) | 30 |
| 1.3.4 Влияние внешнего электростатического поля на генерацию терагерцового излучения | 31 |
| 1.3.5 Эффективность генерации терагерцового излучения | 35 |
| 2. Результаты экспериментальных исследований | 37 |
| 2.1 Сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных результатов | 37 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| при исследовании генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре | |
| 2.2 Повышение эффективности генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре с металлической подложкой путем использования фемтосекундного лазерного излучения инфракрасного диапазона | 42 |
| 2.3 Испытание установки генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре фемтосекундными лазерными импульсами инфракрасного диапазона | 43 |
| 2.4 Сопоставление результатов для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами | 45 |
| 2.5 Корректировка разработанной документации для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами | 46 |
| 2.6 Изготовление и испытание экспериментального образца по скорректированной документации для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами | 47 |
| 2.7 Сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных результатов при исследовании генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности | 48 |
| 2.8 Визуализация пучка терагерцового излучения при генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности | 49 |
| 3 Публикации результатов НИР | 51 |
| Заключение | 68 |
| Список использованных источников | 70 |

Введение

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 5 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 5 этапу были запланированы следующие работы:

1. Проведение экспериментальных исследований по прямому нелинейно-оптическому возбуждению терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами, обработка данных.
2. Проведение экспериментальных исследований по генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности, обработка данных.
3. Проведение экспериментальных исследований по генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред, обработка данных.
4. Сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования.

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.

В результате выполнения работ достигнуты следующие научные результаты:

проведены исследования экспериментального образца для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами, обработаны данные исследований, сопоставлены результаты экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования;

проведены экспериментальные исследования по проверке теории генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности, обработаны данные исследований, сопоставлены результаты экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования;

проведены экспериментальные исследования по проверке метода генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред, обработаны данные исследований, сопоставлены результаты экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования.

1 Аналитический отчет о проведении экспериментальных исследований

1.1 Проведение экспериментальных исследований по прямому нелинейно-оптическому возбуждению терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами, обработка данных

1.1.1 Описание схемы исследования экспериментального образца

Микрофотографии экспериментальных образцов для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла приведены на рисунке 1.1.1. Были изготовлены два типа образцов:

– тип 1: микроструктурированная поверхность, изготовленная 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 1.1.1(а));

– тип 2: микроструктурированная поверхность, изготовленная методом микрофрезеровки на латунной подложке размером 20x20x2 мм. Данная структура имела период 300 мкм, ширину канавок 150 мкм, глубину канавок 30-50 мкм (рисунок 1.1.1(б) и (в)).

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 [1-3]. 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 [2] или лезвие [1, 3], 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.

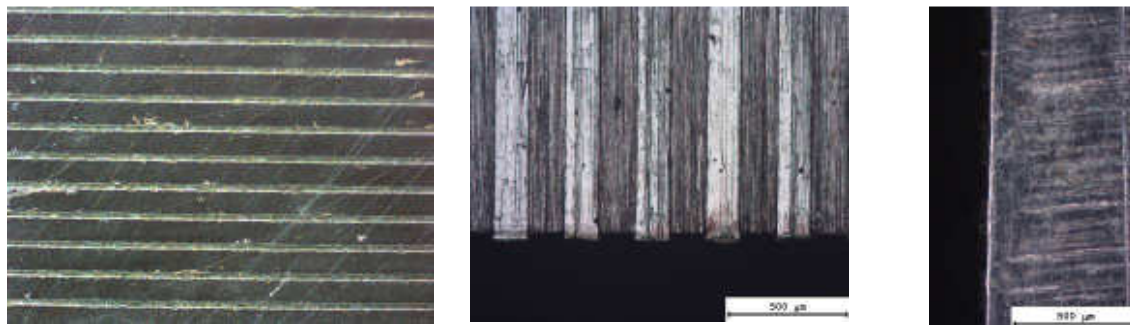


Рисунок 1.1.1 – Микрофотографии экспериментального образца для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов: (а) – образец типа 1, (б) и (в) – образец типа 2 (лицевая поверхность и торец соответственно).

Одной из задач данного проекта является разработка метода прямого нелинейно-оптического возбуждения [4-8], в котором конверсия лазерного излучения в терагерцовую волну происходит непосредственно в области локализации поверхностных волн (y волноведущей поверхности). Преимуществом данного метода является отсутствие потерь на ввод излучения. Однако в качестве первого приближения и для исследования волноведущих свойств экспериментального образца было решено использовать стандартный метод возбуждения с помощью дифракции. В качестве источника свободно распространяющегося терагерцового излучения был использован волновод типа «сэндвич-структура» (рисунок 1.1.2). Такой волновод был предложен и успешно применен участниками проекта для генерации объемного терагерцового излучения с рекордной эффективностью [9, 10]. Геометрия структуры показана на рисунке 1.1.2. Тонкий слой LiNbO_3 ($|x| < a/2$, $a \sim 25$ мкм) прикреплен к призме ($x > a/2$), изготовленной из высокоомного кремния. Лазерный импульс, сфокусированный вдоль оси x с помощью цилиндрической линзы, падает на левую входную грань слоя ниобата лития. Лазерный импульс, распространяясь в $+z$ направлении с групповой скоростью V , формирует за счет оптического выпрямления движущийся импульс нелинейной поляризации, который в свою очередь излучает ТГц волны в кремниевую призму. Угол выходной грани призмы равен черенковскому

углу 41° для эффективного вывода ТГц излучения. Исследуемый образец (микроструктурированная поверхность металла) помещается в терагерцовый пучок. Вдоль оси y лазерный импульс фокусируется цилиндрической линзой до размеров ~ 150 мкм для создания, фактически, точечного нелинейного источника и увеличения оптической интенсивности.

Возбуждение терагерцовой волны происходит в досветовом режиме (нелинейный источник движется со скоростью меньше скорости света в вакууме [5, б]), в отличие от случая, когда нелинейный кристалл облучается лазерными импульсами из воздуха [4, 7, 8]. Возбуждение поверхностной волны, направляемой микроструктурированной поверхностью металла, происходит при дифракции свободно распространяющейся волны на кромке лезвия, поднесенной близко (на расстояния порядка сотен микрометров) к волноведущей поверхности (рисунок 1.1.2).

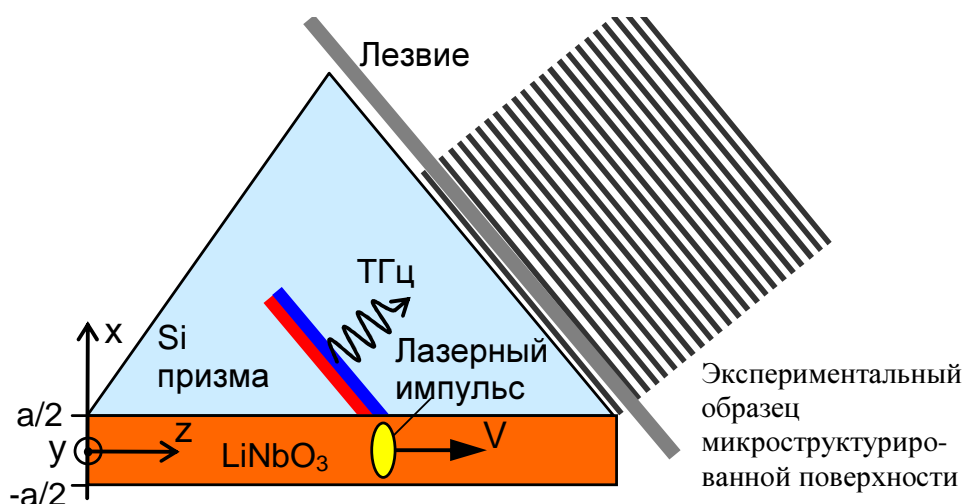


Рисунок 1.1.2 – Схема генерации терагерцовых поверхностных плазмонов: фемтосекундный лазерный импульс, сфокусированный в линию, распространяется в слое LiNbO_3 и излучает черенковский клин терагерцовых волн в кремниевую призму. На выходной грани призмы с помощью дифракции на лезвии осуществляется трансформация объемного терагерцового излучения в поверхностные терагерцовые волны, направляемые микроструктурированной металлической поверхностью.

При достижении волной края волноведущей поверхности происходит ее срыв с поверхности и трансформация в 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. Генерирующая структура рисунка 1.1.2 обозначена С на рисунке 1.1.3. Цилиндрическая линза Ц-1 служит для фокусировки лазерного пучка в вертикальном направлении (плоскость рисунка горизонтальна) до размера ~ 50–100 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 1.1.3). Величина прохождения ~ 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 пододвигалась 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 Голея, Г на рисунке 1.1.3). 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 волноведущей поверхности.

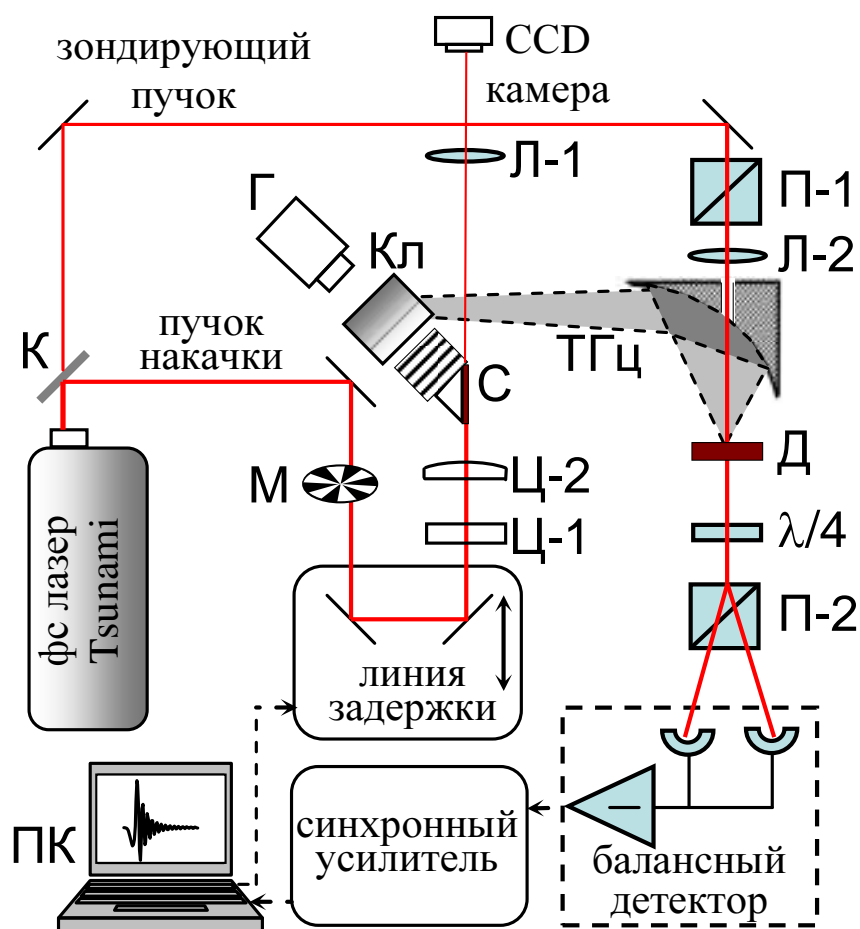


Рисунок 1.1.3 – Схема экспериментальной установки.

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 Голя

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 1.1.3).

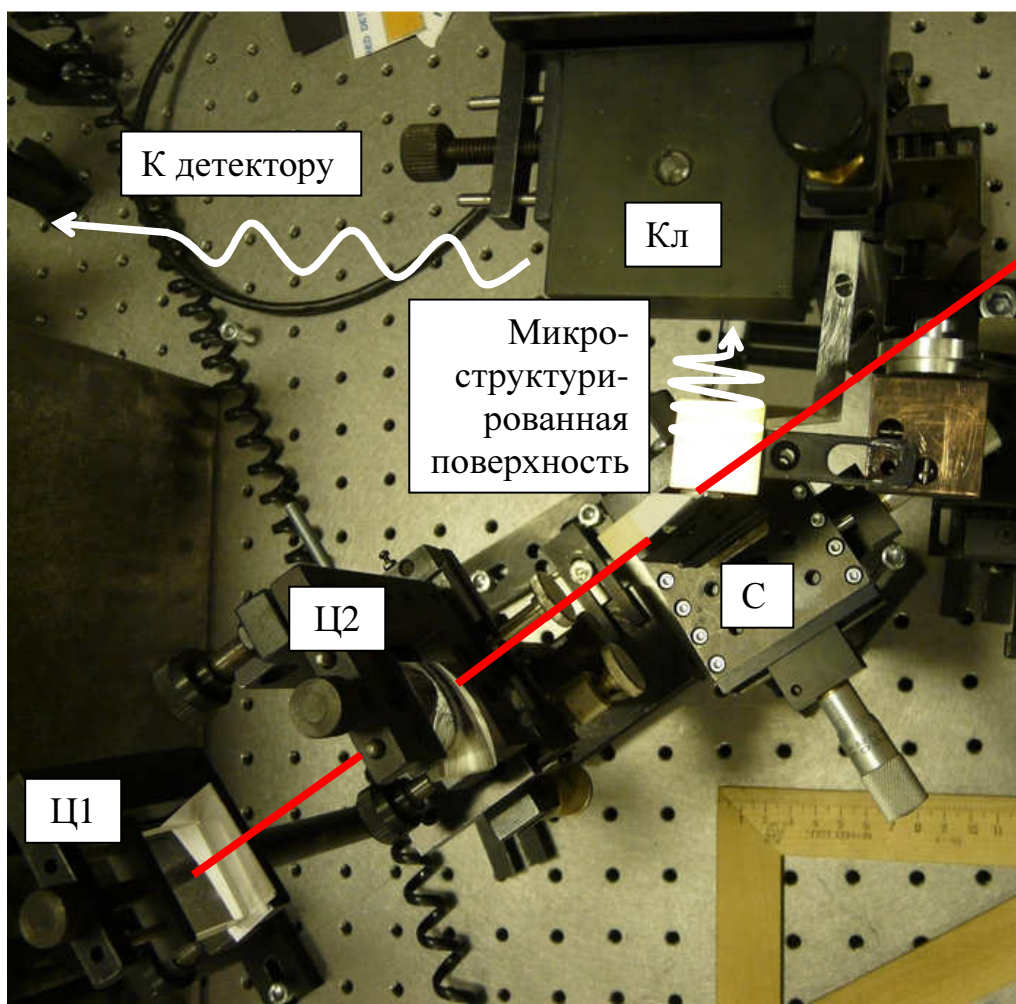


Рисунок 1.1.4 – Фотография центральной части экспериментальной установки (вид сверху). Обозначения элементов соответствуют схеме рисунка 1.1.3. Прямой жирной линией показан ход лазерного пучка, волнистой линией – ход терагерцового пучка. Светлый квадрат – микроструктурированная поверхность. Система лезвий отсутствует на фотографии.

1.1.2 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).

1.1.3 Измерение области локализации терагерцовых поверхностных плазмонов

На рисунке 1.1.5 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 1.1.5) 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.

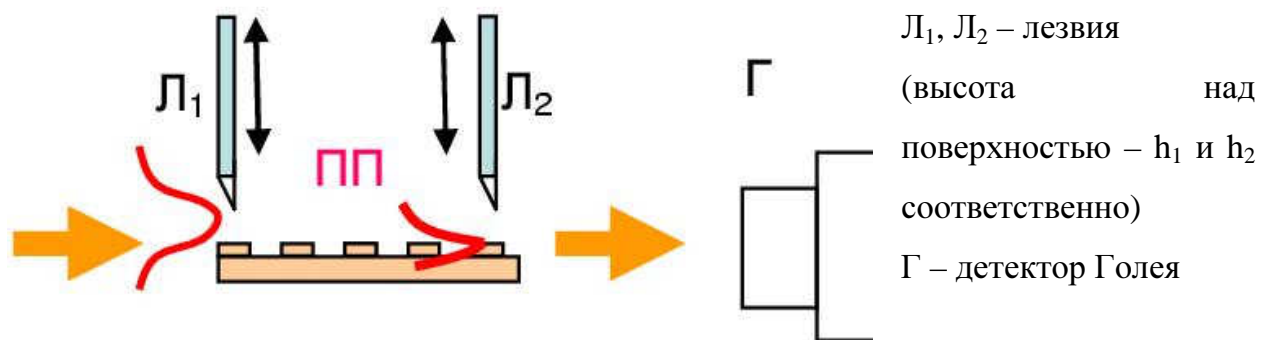


Рисунок 1.1.5 – Схема оптимизации возбуждения и измерения области локализации ПП.

На рисунке 1.1.6 приведены экспериментальные зависимости сигнала детектора Голея (пропорционального мощности терагерцового излучения) от h_1 . Квадраты 1 и круги 2 – две серии измерений при расстоянии между лезвиями L_1 и L_2 10 мм и $h_2=400$ мкм. Треугольники 3 – при расстоянии между лезвиями L_1 и L_2 5 мм и $h_2=300$ мкм. В результате проведенных измерений было установлено, что оптимальное возбуждения поверхностных плазмонов происходит при h_1 около 600 мкм.

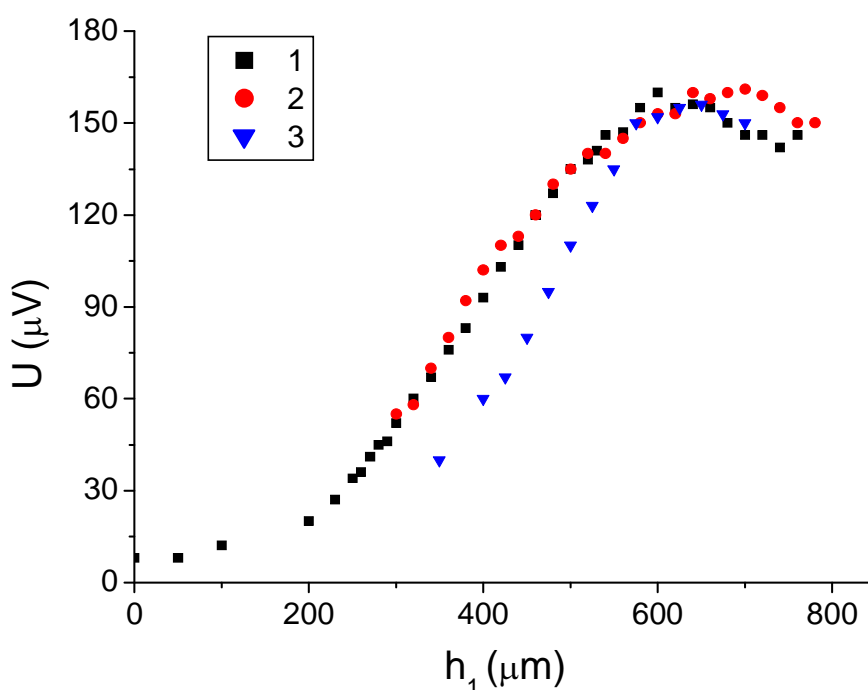


Рисунок 1.1.6 – Зависимость мощности терагерцового сигнала от ширины щели h_1 .

Локализация терагерцовых поверхностных плазмонов измерялась путем изменения h_2 при неизменном h_1 . На рисунке 1.1.7 приведена экспериментальная зависимость сигнала детектора Голя от h_2 (серия 1, квадраты) и продифференцированный сигнал 1 с последующим усреднением фильтром скользящего среднего (серия 2). Продифференцированный сигнал служит индикатором области локализации плазмонов. Максимум при $h_2 \sim 700-800 \mu\text{m}$ свидетельствует о том, что наибольшая мощность сосредоточена в плазмонах с соответствующей областью локализации.

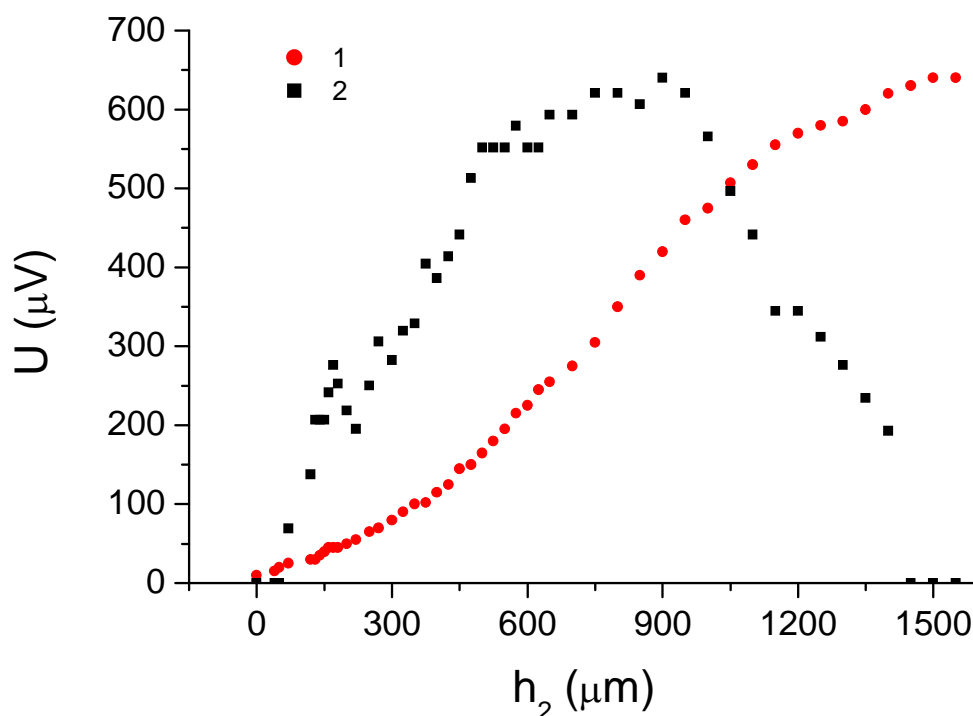


Рисунок 1.1.7 – Зависимость мощности терагерцового сигнала от ширины щели h_2 (Серия 1, квадраты) и продифференцированная усредненная зависимость (Серия 2, круги, в относительных единицах).

1.2 Проведение экспериментальных исследований по генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности, обработка данных

1.2.1 Описание схемы эксперимента

Экспериментальная схема для проведения исследований по генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности приведена на рис. 1.2.1. В качестве лазерной накачки использовалась титан-сапфировая лазерная система, генерирующая фемтосекундные лазерные импульсы на центральной длине волны 795 нм с частотой 10 Гц. Стандартная длительность импульса данной лазерной системы составляет 75 фс, что примерно в три раза меньше оптимальной длительности импульса для генерации ТГц излучения скошенным фронтом интенсивности (около 200-300) фс. Для увеличения стандартной длительности было предложено обрезать спектр излучения в стретчере лазерной системе с помощью металлических пластин. В результате была реализована возможность изменять длительность лазерного импульса в широких пределах (от 75 фс до 1000 фс и более). Энергия лазерного излучения изменялась от 0 до 6 мДж.

Поперечный размер лазерного пучка после выхода из лазерной системы составлял 10 мм по полувысоте интенсивности и затем уменьшался в 2 раза с помощью телескопа (зеркала Зер.1 и Зер.2 на рисунке 1.2.1) для согласования с размером входной грани кристалла ниобата лития. После телескопа излучение направлялось на дифракционную решетку с периодом 1/2000 мм под углом 57 градусов. Излучение отражалось под углом 49 градусов и направлялось через фокусирующее зеркало (Зер.3) на кристалл ниобата лития. Зеркало имело фокусное расстояние 306 мм и диаметр 50 мм. Расстояние между фокусирующим зеркалом и решеткой составляло 87 см и было выбрано на основе теоретических расчетов для оптимального переноса изображения решетки в область кристалла ниобата лития. Это оптимальное условие соответствует условию равенства угла скоса фронта интенсивности и угла наклона изображения решетки к направлению распространения лазерного излучения в кристалле ниобата лития. Расстояние между зеркалом и ниобатом лития составляло около 48 см и подбиралось таким образом, чтобы

осуществить точный перенос изображения решетки в объем кристалла ниобата лития. Для точной настройки переноса изображения в кристалл ниобата лития использовалась подстройка расстояния между решеткой и фокусирующим зеркалом, а также расстояние между зеркалом и кристаллом ниобата лития по максимальному значению генерируемой энергии терагерцового излучения. Перед кристаллом ниобата лития поляризация оптического излучения преобразовывалась из горизонтальной в вертикальную с помощью пластины $\lambda/2$ для согласования поляризации с направлением оптической оси кристалла ниобата лития.

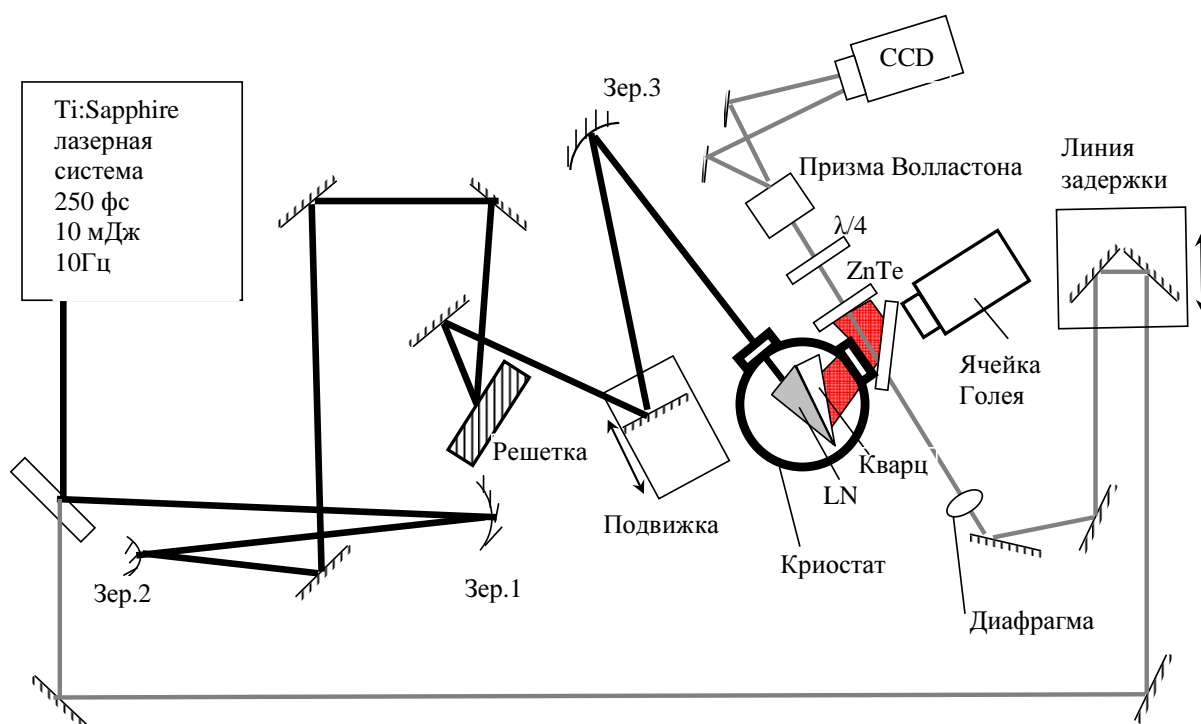


Рисунок 1.2.1 – Экспериментальная схема генерации ТГц излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности в кристалле ниобата лития.

Кристалл ниобата лития располагался внутри криостата OptistatCF (фирма Oxford Instruments). Данный криостат охлаждается жидким гелием и способен поддерживать температуры от 4 градусов Кельвина и выше. Для вывода терагерцового излучения из криостата использовался кварцевый клин со специально рассчитанным углом при вершине клина. Этот клин отклонял терагерцовый пучок в направлении выходного окна криостата. Входное (для оптики) и выходное (для терагерц) окна криостата были изготовлены из трех кварцевых пластин толщиной около 2 мм. Каждая пластина ослабляла оптический импульс накачки на 7 %, а

терагерцовое излучение на 22%. Таким образом, падающее на кристалл оптическое излучение было ослаблено на 19 % , а выходящее из кристалла терагерцовое излучение на 50 %.

Терагерцовое излучение измерялось двумя способами. Энергия излучения измерялась с помощью ячейки Голея, расположенной в непосредственной близости от ниобата лития. Терагерцовое поле измерялось методом электрооптического стробирования. Для реализации этого метода на малой частоте повторения импульсов, определяемой частотой повторения лазера, была предложена следующая схема. Зондирующий оптический импульс отводился от основного пучка и через линию задержки направлялся на кристалл ZnTe. Перед кристаллом пробный лазерный пучок диафрагмировался до поперечного размера 2 мм. На этот же кристалл заводилось терагерцовое излучение путем отражения от стеклянной пластины. После прохождения кристалла ZnTe оптическое линейно поляризованное поле приобретало эллиптичность при наличии терагерцового сигнала. После пластины $\lambda/4$ линейная поляризация преобразовывалась в циркулярную, а призма Волластона разделяла эти поляризации в пространстве. Пучки с разными поляризациями направлялись на CCD камеру. Изображение с камеры направлялось на компьютер, где в реальном времени происходила обработка изображения и выделялся терагерцовый сигнал, пропорциональный разности освещенности от двух пучков с разными поляризациями.

1.2.2 Результаты эксперимента

На рисунке 1.2.2 приведена зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от энергии лазерного излучения накачки при различных длинах кристалла L ($L = 0.5$ см и $L = 1$ см) и длительности лазерного импульса τ ($\tau = 150$ фс и $\tau = 250$ фс). Видно, что эффективность резко насыщается при определенной энергии оптической накачки, при этом эта энергия зависит от длины кристалла и длительности импульса (рисунок 1.2.2(a)). Минимальное значение энергии насыщения наблюдается при длине кристалла 1 см и длительности лазерного импульса 250 фс, максимальное – при $L = 0.5$ и $\tau = 150$ фс. Данный эффект можно объяснить искажением лазерного пучка накачки вследствие самофокусировки, когда нелинейная добавка к фазе лазерного излучения $\Delta\phi$ становится порядка π . Действительно, $\Delta\phi \sim L \cdot I$, где I – интенсивность лазерного излучения. При меньшей

длине кристалла набег нелинейной фазы достигает значения π при большей интенсивности, а значит при большей энергии. Несколько парадоксально выглядит факт, что максимальная энергия насыщения наблюдается при меньшей длительности импульса (150 фс), и соответственно при большей интенсивности. Однако не стоит забывать, что из-за скоса фронта интенсивности длительность 150 фс существует в кристалле лишь на небольшой длине порядка 1-2 мм. На больших трассах импульс испытывает сильное временное расплывание. Лазерный импульс с длительностью 250 фс сохраняет свою длительность на расстоянии порядка 5-10 см. Поэтому средняя на длине кристалла интенсивность для импульса длительности 250 фс больше по сравнению с 150 фс импульсом, а значит энергия насыщения терагерцового излучения меньше. Стоит отметить, что при большой длине кристалла и энергии лазерного излучения наблюдается уменьшение эффективности оптико-терагерцовой конверсии. Данный эффект скорее всего связан с быстрым рассыпанием лазерного пучка при распространении в кристалле.

При энергии лазерного импульса меньше насыщения наблюдается линейная зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от энергии накачки. Максимальный угол наклона линейного участка достигается при длине кристалла ~ 1 см и длительности импульса около 250 фс (рисунок 1.2.2(б)), что согласуется с ранее развитой теорией. Более длинные кристаллы дают большую эффективность за счет большей длины взаимодействия лазерного излучения с терагерцовым излучением. А длительность 250 фс является оптимальной с точки зрения слабодисперсионного распространению лазерного излучения в кристалле. Максимальная эффективность около 0.2 % была достигнута при криогенном охлаждении ~ 77 К, длительности импульса ~ 150 фс и длины кристалла ~ 5 мм.

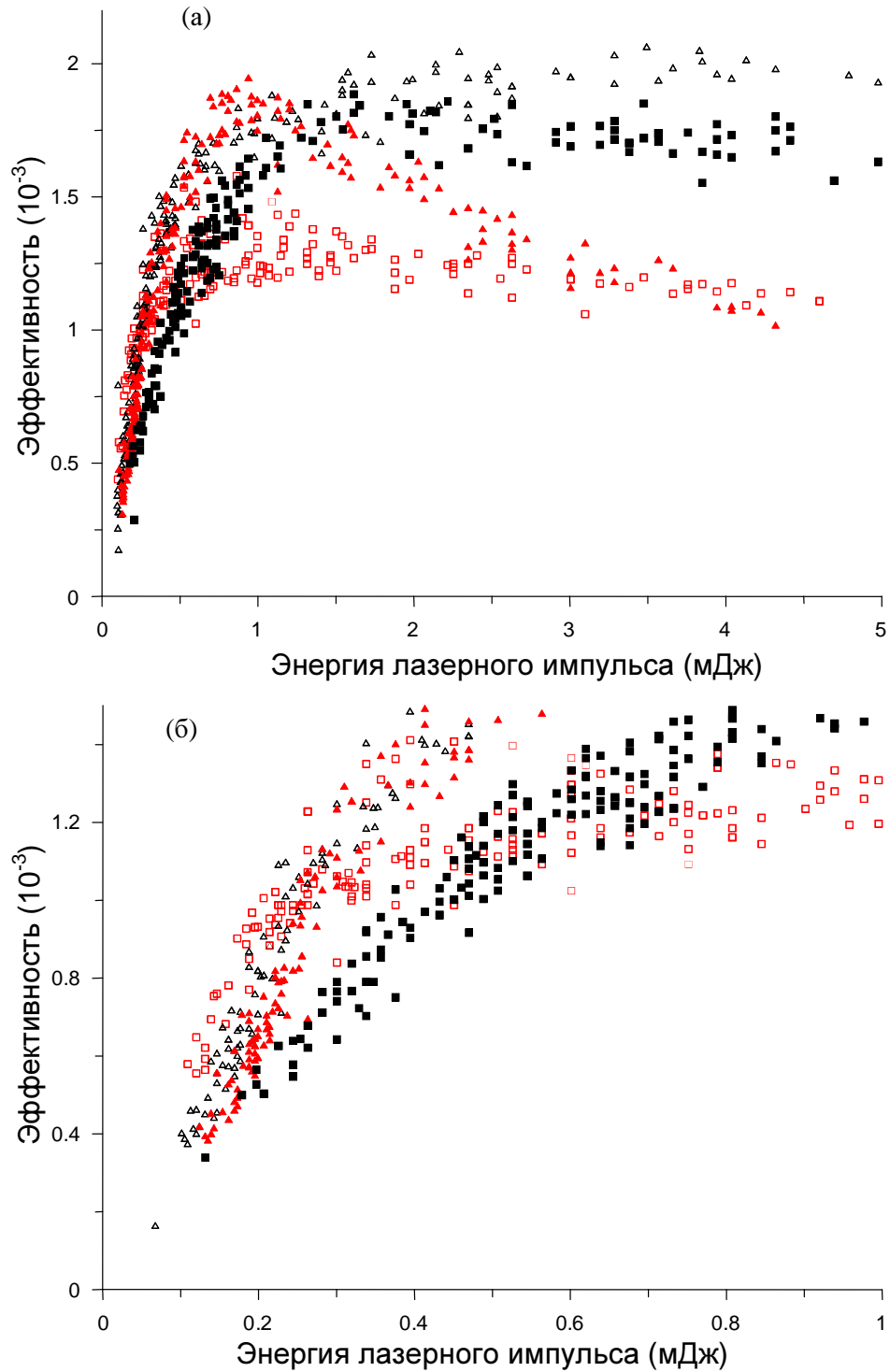


Рисунок 1.2.2 – (а) и (б) Зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от энергии лазерного излучения в охлажденном до 77 К кристалле LiNbO₃. Пустые квадратики - L= 1 см, τ = 250 фс; сплошные квадратики - L= 0.5 см, τ = 150 фс; сплошные треугольники - L= 1 см, τ = 150 фс; пустые треугольники - L= 0.5 см, τ = 250 фс.

На рисунке 1.2.3 показана зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от энергии лазерного импульса при комнатной температуре. Как и при криогенной температуре на данном графике наблюдается насыщение эффективности. Максимальная эффективность около 0.08% достигается при длительности лазерного импульса 150 фс, длине кристалла 5 мм и при энергии лазерного излучения, близкой к насыщению. При большой энергии лазерного импульса эффективность уменьшается. На начальной (линейной) стадии эффективность не зависит ни от длительности лазерного импульса, ни длины кристалла в отличие от случая криогенного охлаждения.

Форма терагерцового импульса и его спектр показаны на рисунке 1.2.4. Максимум спектра находится около 0.5 ТГц. При охлаждении и оптимальной настройке параметров системы для максимальной эффективности генерации спектр ТГц импульса не изменялся.

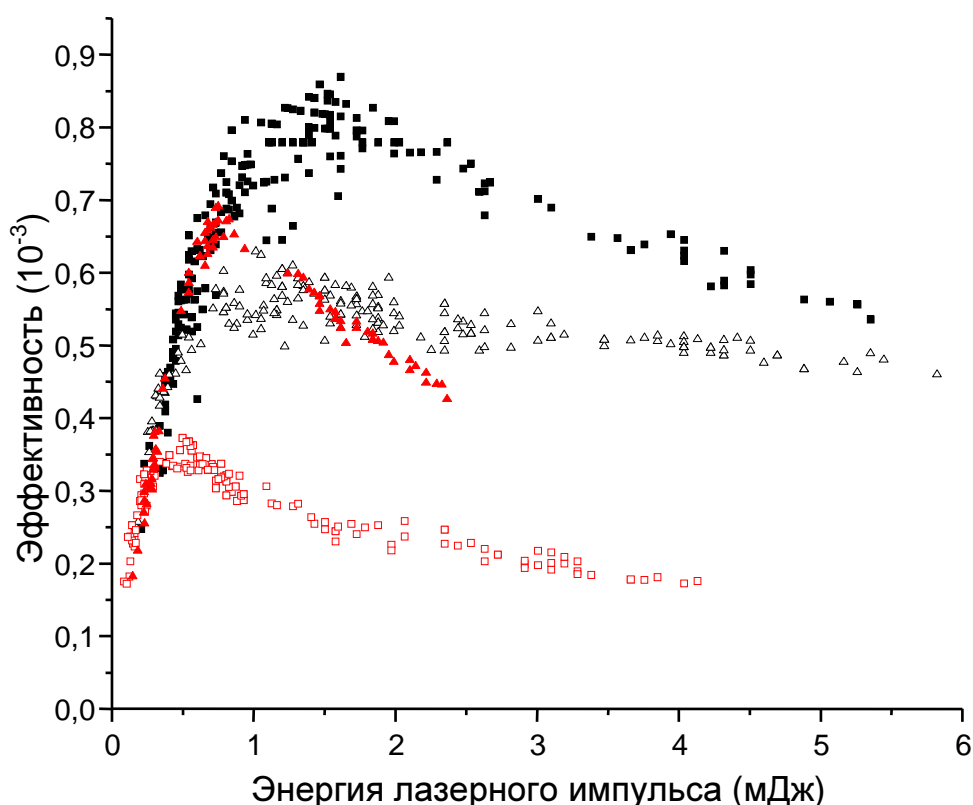


Рисунок 1.2.3 – Зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от энергии лазерного излучения в кристалле LiNbO_3 при комнатной температуре. Сплошные квадратики - $L=0.5$ см, $\tau=150$ фс; сплошные треугольники - $L=1$ см, $\tau=150$ фс; пустые треугольники - $L=0.5$ см, $\tau=250$ фс.

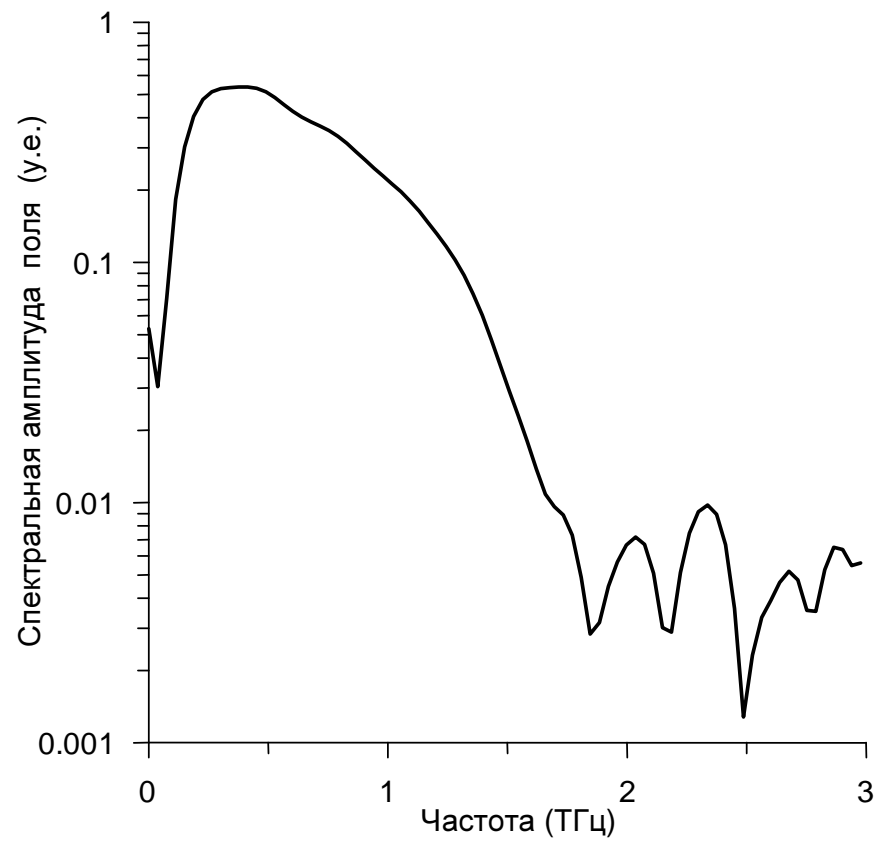
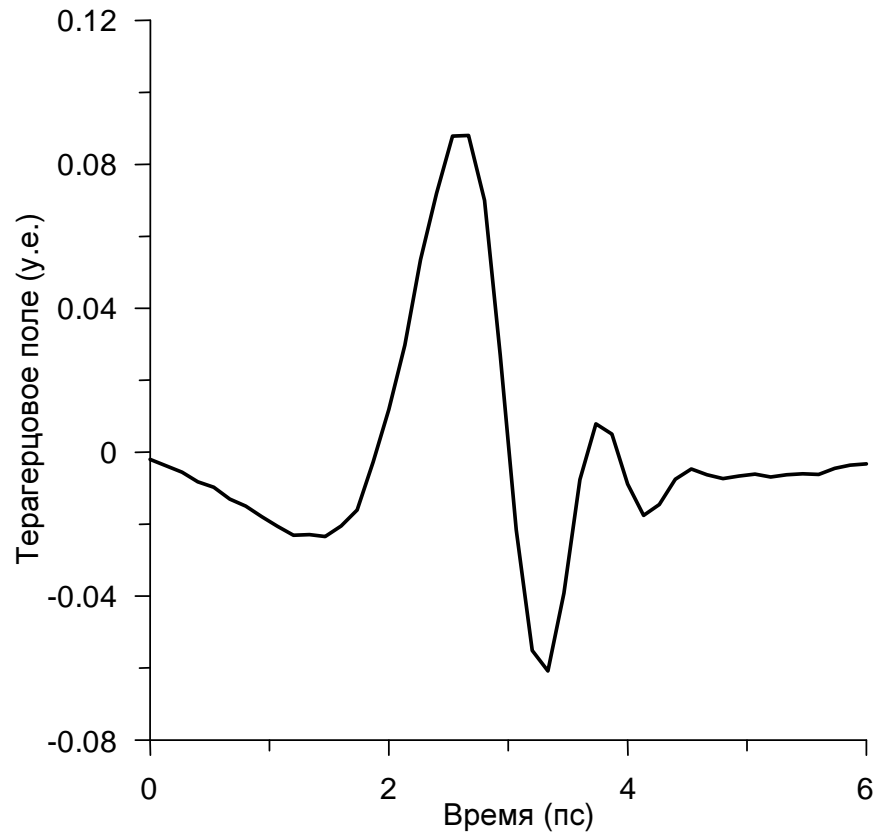


Рисунок 1.2.4 – (а) Осциллограмма и (б) спектр терагерцового импульса при комнатной температуре, $L = 0.5$ см, $\tau = 250$ фс.

1.3 Проведение экспериментальных исследований по генерации терагерцового излучения при оптическом пробое сплошных и нанодисперсных сред, обработка данных

1.3.1. Экспериментальная установка

Основой установки, используемой в исследованиях по оптоэлектронике, является фемтосекундная лазерная система «Spitfire», обладающая следующими параметрами: энергия импульсов - 2,5 мДж, длительность - 50 фс, центральная длина волны - 780 нм, частота следования импульсов - 1 кГц, диаметр лазерного пучка - 12 мм. Разряд зажигался при фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов либо при помощи аксиконной линзы, либо при помощи обычных сферических линз с различным фокусным расстоянием. Имелась возможность прикладывать к области разряда статическое поперечное электрическое поле до 15 кВ/см (максимальная величина поля ограничена порогом статического пробоя в атмосферном воздухе). Кроме того, в качестве оптического ионизирующего импульса можно было использовать бихроматическое излучение в виде смеси основной и второй гармоник. Для генерации второй гармоники использовался нелинейный кристалл ВВО (бета-борат бария), расположенной в сходящемся волновом пучке первой гармоники излучения. Исследованные варианты плазменных генераторов ТГц излучения схематически представлены на рис. 1.3.1.

Использовались две системы регистрации терагерцовых импульсов. В первой (см. блок-схему на рис. 1.3.2) генерируемые низкочастотные импульсы с помощью системы параболических зеркал фокусировались на поверхность электрооптического кристалла (пластину ZnTe с размерами $10 \times 10 \times 1$ мм³ и ориентацией $\langle 110 \rangle$), который служил в качестве детектора терагерцового излучения. Применялся стандартный метод электрооптического стробирования с помощью пробных фемтосекундных лазерных импульсов. Изменения поляризации пробного лазерного излучения под действием электрического поля низкочастотной волны анализировались фазовой пластинкой $\lambda/4$, призмой Волластона и парой фотодиодов, включенных по балансной схеме. Общее управление экспериментальной установкой, сбором данных и их первичной обработкой осуществлялось через компьютер программой, изготовленной с помощью пакета Lab View.

Вторая система регистрации (см. рис. 1.3.3), в которой в качестве детектора использовался InSb болометр, использовалась для измерения диаграммы направленности и распределения поляризации терагерцового излучения в поперечном сечении пучка. Диаграмма направленности ТГц излучения определялась при помощи непроницаемого экрана с отверстием, который крепился на двухкоординатной подвижке и перемещался в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения. Для исследования поляризационных характеристик терагерцового излучения использовался сеточный поляризатор. Преимущественное направление поляризации определялось по изменению сигнала при вращении поляризатора вокруг оси системы.

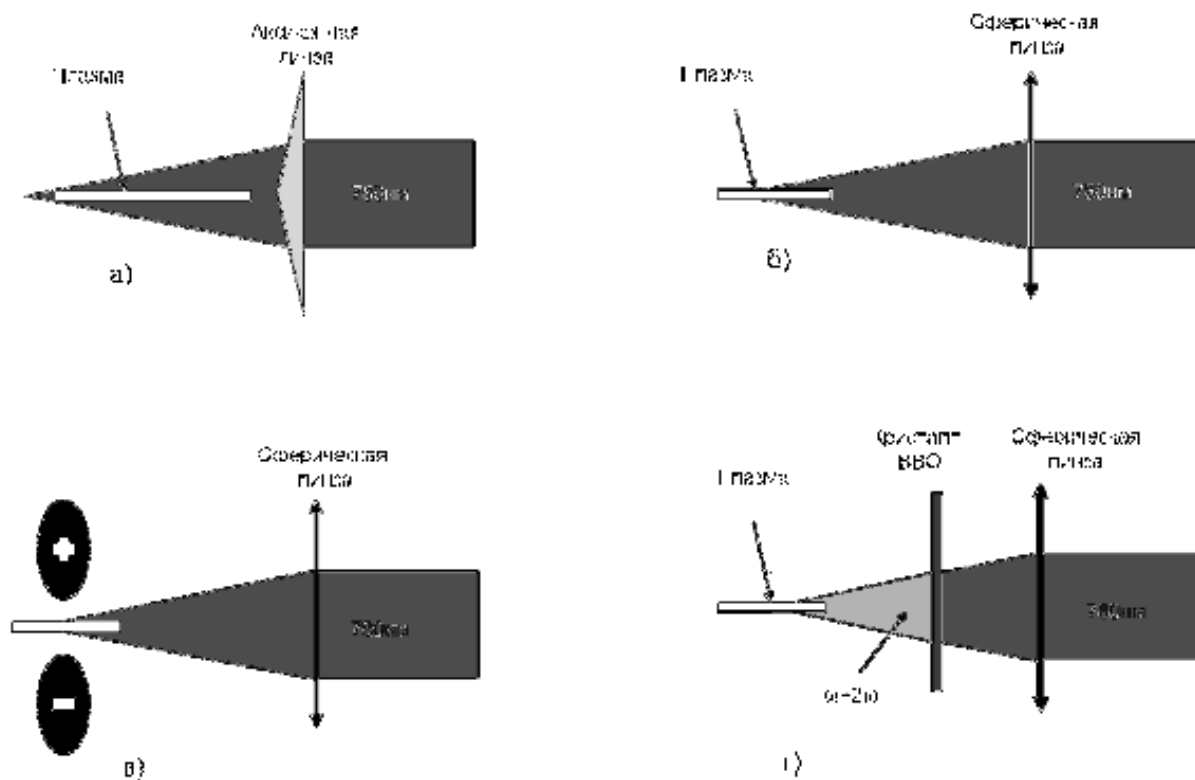


Рисунок 1.3.1 - Исследованные варианты схем генерации ТГц излучения в лазерной искре: а) аксиконный разряд; б) разряд при фокусировке сферической линзой; в) оптический разряд в области статического электрического поля, г) оптический разряд в бихроматическом оптическом поле

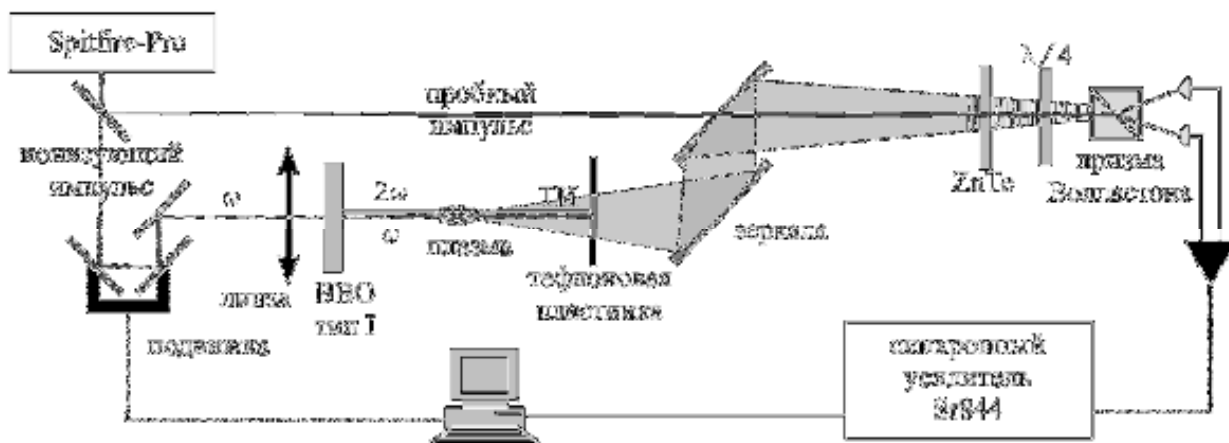


Рисунок 1.3.2 - Экспериментальная установка в режиме измерения временного профиля терагерцового импульса.

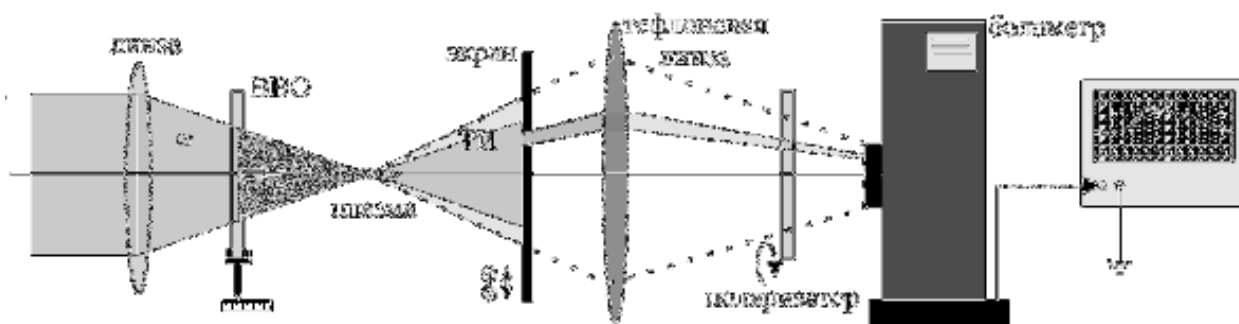


Рисунок 1.3.3 - Экспериментальная установка в режиме измерения поляризационных характеристик и диаграммы направленности ТИ.

1.3.2. Терагерцовое излучение из аксиконного разряда

Эксперимент проводился по схеме, предложенной в теоретической работе [12]. В плазме аксиконного разряда передний фронт ионизации движется со сверхсветовой скоростью, определяемой углом сходимости аксиконной линзы. Постоянное электростатическое поле, наложенное на область разряда, возбуждает на его фронте параллельно приложенному статическому полю затухающие плазменные колебания, которые служат источником терагерцового излучения, движущимся вдоль оси разряда со сверхсветовой скоростью, совпадающей со скоростью фронта ионизации. Эффективность генерации в такой схеме невелика [13], однако с фундаментальной точки зрения такой разряд является весьма интересным объектом исследования. Оказалось, что плазма аксиконного разряда является источником ТГц излучения и без приложения внешнего электростатического поля. На рис. 1.3.4 показаны распределение интенсивности терагерцового излучения и распределение его

поляризации в плоскости, ортогональной оси системы. Кольцевое распределение интенсивности излучения примерно соответствует диаграмме направленности в виде черенковского конуса, что с большой вероятностью свидетельствует о том, что источник терагерцового излучения связан с фронтом ионизации, движущимся со сверхсветовой скоростью. Аксиальная симметрия как диаграммы направленности, так и распределения поляризации, говорит в пользу пондеромоторного механизма возбуждения низкочастотных токов, ответственных за излучение терагерцовых импульсов, поскольку при аксиально симметричном распределении оптического излучения по апертуре волнового пучка пондеромоторное воздействие как в продольном, так и в радиальном направлении обладает осевой симметрией. Механизм этот может обеспечить как генерацию аксиально симметричных радиальных токов, подобных распределению поляризации на рис. 1.3.4 (см. [13]), так и продольных токов [14]; и те и другие токи качественно объясняют и диаграмму направленности терагерцового излучения, и наблюдаемое распределение поляризации. Высокая степень аксиальной симметрии, наблюдаемая в эксперименте, говорит о том, что регистрация «волновой формы» терагерцовых импульсов методом электрооптического стробирования в этих условиях связана с малыми отклонениями от аксиальной симметрии, обусловленными, либо недостаточно аккуратной юстировкой установки, либо асимметрией в терагерцовом излучении.

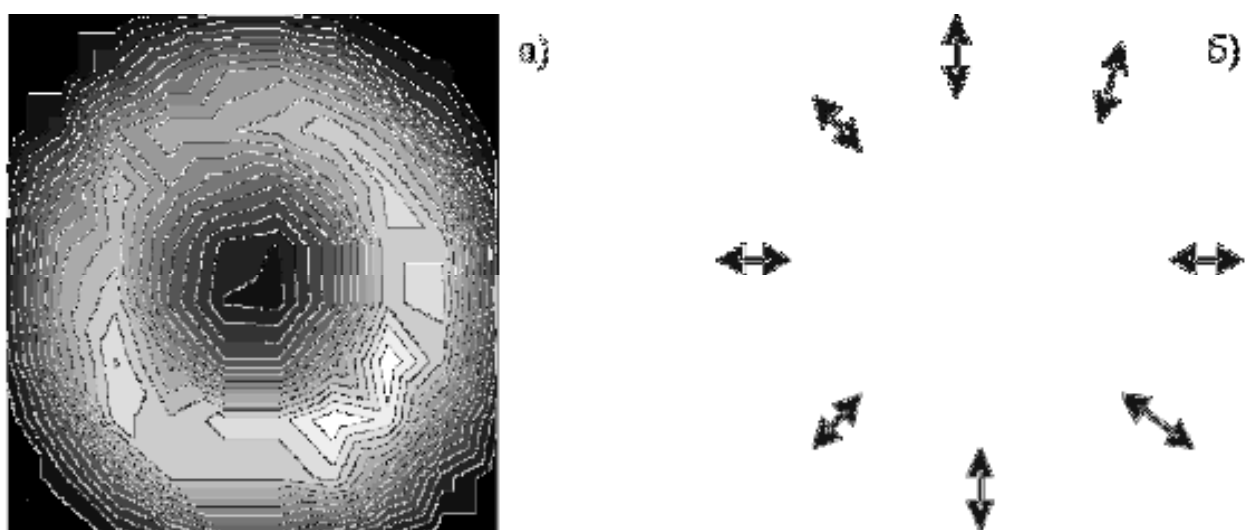


Рисунок 1.3.4 - Распределение интенсивности а) и поляризации б) терагерцового излучения из аксиального разряда в плоскости, перпендикулярной оси разряда.

Наложение постоянного электрического поля на область разряда, даже при его максимальных значениях (до 15 кВ/см), не приводило к заметному увеличению терагерцового сигнала. Это означает, по-видимому, что внутренние электрические поля, обусловленные пондеромоторным воздействием оптических импульсов, значительно превышают внешнее электростатическое поле, используемое в эксперименте.

1.3.3 Генерация терагерцового излучения при обычной фокусировке ионизирующих лазерных импульсов (с использованием сферических линз)

При создании лазерной искры путем фокусировки фемтосекундных импульсов обычными сферическими линзами исследования проводились при различных фокусных расстояниях от 50 до 500 мм; энергия фс импульсов была при этом близка к максимальной (≈ 2.5 мДж). С увеличением фокусного расстояния росла длина плазменной искры и увеличивался интегральный сигнал с болометра (пропорциональный суммарной энергии излучаемых терагерцовых импульсов). Распределение интенсивности в плоскости, ортогональной оси системы, и поляризация соответствуют источнику типа линейного (осевого) квадрупольного момента и преимущественное направление поляризации в интегральном сигнале ортогональны направлению поляризации оптического излучения.

Распределение интенсивности, соответствующее конической диаграмме направленности, в экспериментах было получено при круговой поляризации оптического излучения; распределение поляризации терагерцового излучения при этом практически совпадает с приведенным на рис. 1.3.4 для аксиконного разряда. Можно сказать, что распределения интенсивности и поляризации ТГц излучения при круговой поляризации оптических импульсов получаются из распределений, полученных при линейной поляризации оптических импульсов, путем их вращения вокруг оси системы.

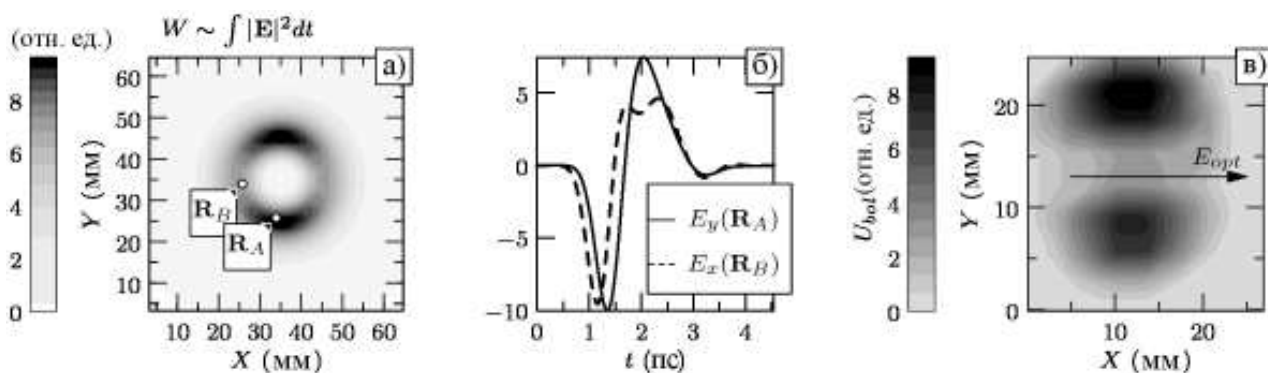


Рисунок 1.3.5 - а) теоретическое распределение интенсивности терагерцового излучения в плоскости, перпендикулярной оси разряда, б) волновая форма для двух поляризаций электрического поля (E_x и E_y) в точках R_A и R_B , в) экспериментальное распределение интенсивности терагерцового излучения (линза с фокусным расстоянием 400 мм, стрелкой показано направление поляризации лазерного излучения).

1.3.4 Влияние внешнего электростатического поля на генерацию терагерцового излучения

В экспериментах с внешним статическим электрическим полем использовалась параболическая линза с фокусным расстоянием 200 мм. В области фокуса зажигался разряд с длиной нити порядка 10 мм. На расстоянии 0,5 см с каждой стороны искры располагались электроды, создававшие внешнее электрическое поле (чтобы избежать пробоя между электродами и держателями оптических элементов электроды имели сферическую форму с радиусом кривизны порядка 25 мм). В отличие от случая аксиальной фокусировки [12], эффективность преобразования оптического излучения в терагерцовое растет пропорционально квадрату напряженности приложенного поля (см. рис. 1.3.6); этот факт говорит в пользу того, что характерные поля низкочастотных колебаний, возбуждаемых при ионизации воздуха пропорциональны, по-видимому, приложенному внешнему полю. При энергии лазерного импульса 2,5 мДж и внешнем поле ~ 15 кВ/см эффективность генерации ТГц излучения за счет приложенного статического поля возрастает примерно в 200 раз по интенсивности. Резкий рост эффективности преобразования с увеличением энергии ионизирующих

лазерных импульсов (см. рис. 1.3.7) в пределах доступных в эксперименте энергий не демонстрирует признаков насыщения.

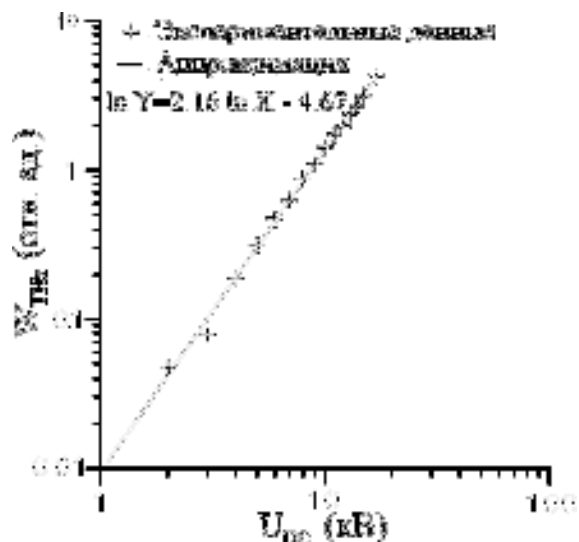


Рисунок 1.3.6 - Зависимость энергии терагерцовых импульсов от величины приложенного электростатического поля (энергия оптических импульсов 2,5 мДж)

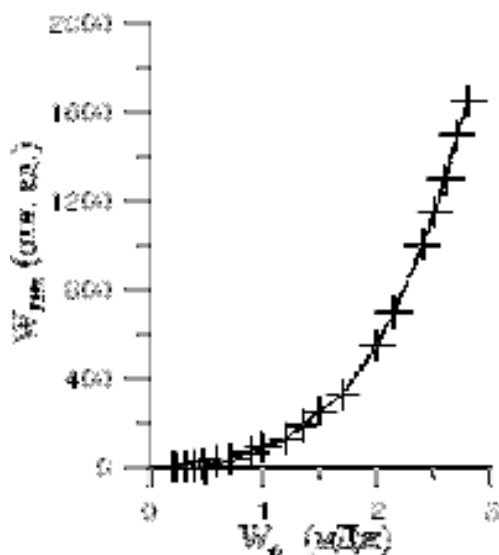


Рисунок 1.3.7 - Зависимость энергии терагерцового излучения от энергии ионизирующих лазерных импульсов (разность потенциалов между электродами – 17 кВ).

Распределение интенсивности излучения в плоскости, перпендикулярной оси разряда, для максимальных значений электростатического поля и энергии фс

импульсов представлено на рис. 1.3.8. Оно является примерно осесимметричным и колоколообразным с максимумом в направлении оси разряда; вектор поляризации генерируемого ТГц излучения параллелен приложенному статическому полю

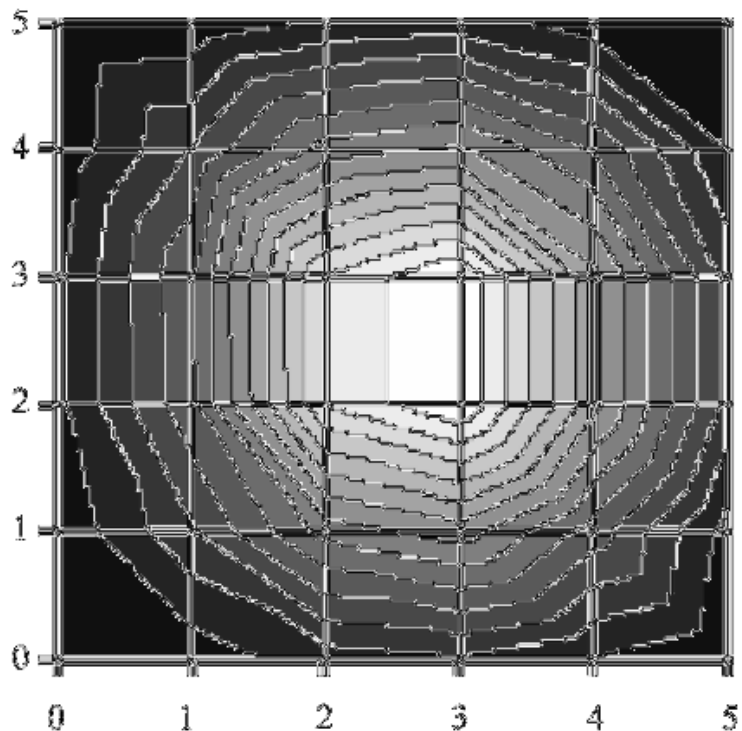


Рисунок 1.3.8 - Распределение интенсивности терагерцового излучения в плоскости, перпендикулярной направлению распространения лазерного импульса (расстояние от искры 50 мм, 1 деление на рисунке соответствует 5 мм).

Кроме того, включение внешнего электрического поля приводит к некоторому смещению «центра тяжести» спектра терагерцового излучения в сторону более низких частот (рис. 1.3.9).

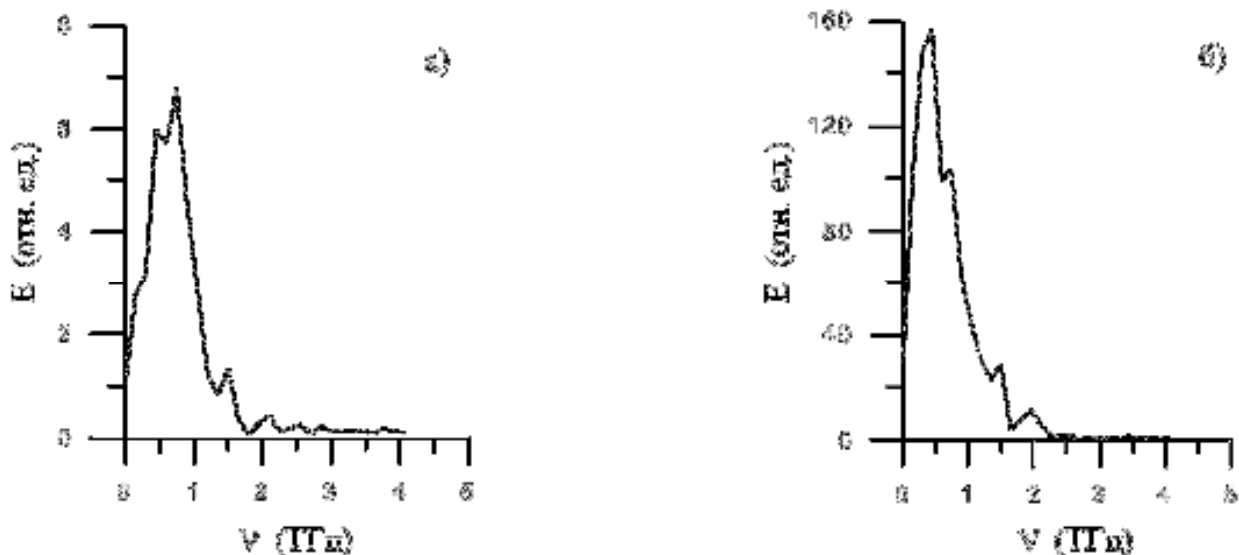


Рисунок 1.3.9 - Спектры генерируемого терагерцового импульса в отсутствие внешнего электрического поля (а) и при наличии (б).

На рис. 1.3.10 а показано, как меняется диаграмма направленности в зависимости от величины приложенного электростатического поля в плоскости, проходящей через ось линейного квадруполь (т.е., в плоскости, перпендикулярной поляризации оптического излучения), когда приложенное электрическое поле параллельно оси квадруполь. Диаграмма направленности вначале становится асимметричной (пропадает один из максимумов), а при дальнейшем увеличении поля она вытягивается в направлении оси системы. В случае, когда приложенное электростатическое поле ортогонально оси квадруполь, диаграмма направленности остается симметричной, а при увеличении поля максимумы сливаются в один, также вытянутый вдоль оси системы (см. рис. 1.3.10 б).

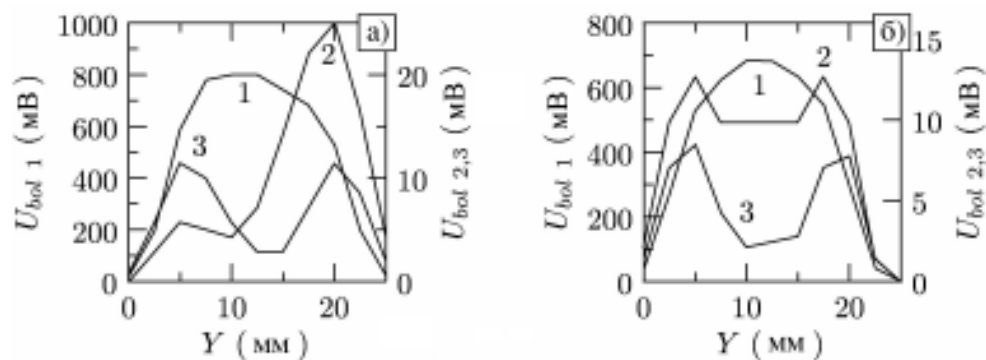


Рисунок 1.3.10 - Модификация диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной поляризации фс импульсов при ориентации электрического поля

параллельно оси «квадруполя» (а) и ортогонально ей (б) (Эксперимент). Кривая 1 соответствует амплитуде внешнего электрического поля 17 кВ, 2 – 1.75 кВ и 3 – 0 кВ.

1.3.5 Эффективность генерации терагерцового излучения

Все приведенные выше данные представлены в относительных единицах, что позволяет определить, во сколько раз меняется эффективность генерации терагерцового излучения при изменении тех или иных условий. Для получения представлений об абсолютной величине энергии генерируемых ТГц импульсов была проведена калибровка болометра с использованием данных о поперечном размере ТГц пучка, «волновой форме» терагерцовых импульсов и величине электрического поля в максимуме. Энергия терагерцового импульса оценивалась как

$$W_{THz} \approx \frac{c}{4\pi} S \int_{-\infty}^{+\infty} E^2(t) dt, \quad (1.3.1)$$

где S – площадь поперечного сечения терагерцового импульса, $E(t)$ – его «волновая форма», напряженность электрического поля оценивалась по изменению поляризации пробного лазерного излучения. Такая оценка вполне допустима, поскольку спектр ТГц импульса лежит ниже низкочастотных фоновых резонансов ZnTe. Для измерения пространственного профиля терагерцового пучка использовалась техника, основанная на перемещении полубесконечного непрозрачного экрана с прямой кромкой (knife-edge) в плоскости, перпендикулярной направлению распространения терагерцового излучения при фиксированной задержке между импульсом накачки и пробным импульсом (соответствующей максимальному сигналу на синхронном усилителе). В качестве детектора использовался болометр (входная апертура которого была существенно больше, чем поперечное сечение терагерцовых импульсов).

Величины абсолютной чувствительности болометра, измеренные при нескольких значениях энергии ТГц импульсов (максимальное различие по энергии примерно в 50 раз), дают разброс значений не более, чем в полтора раза, а полученное значение чувствительности (≈ 4 В/нДж) неплохо соответствует данным, полученным по измерениям калиброванного сигнала на частоте 140 ГГц. С учетом проведенной калибровки можно оценить эффективность преобразования энергии оптических импульсов в терагерцовые для различных схем генерации, обсуждаемых в данной

статье. Так, максимальную эффективность генерации, полученную при пробое монохроматическим излучением в присутствии постоянного электростатического поля можно оценить величиной порядка $2 \cdot 10^{-6}$; а при аксиконном разряде и разряде, формируемом параболическими линзами – порядка 10^{-8} .

Таким образом, экспериментальные исследования генерации терагерцового излучения при оптическом пробое воздуха фемтосекундными лазерными импульсами показали, что имеет место совершенно разная реакция на присутствие в области разряда постоянного электрического поля. 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.

2 Результаты экспериментальных исследований

2.1 Сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных результатов при исследовании генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре

В ходе выполнения пятого этапа проекта были проведены экспериментальные исследования генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в сэндвич-структуре, состоящей из кремниевой призмы, 30 мкм слоя ниобата лития (LiNbO_3) и металлической подложки, расположенной на некотором расстоянии от слоя LiNbO_3 . Теоретические расчеты генерации ТГц излучения в такой сэндвич-структуре были проведены ранее на первом этапе проекта (см. также [11]). Ниже приведено сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных данных.

На рисунке 2.1.1 представлены экспериментальные и теоретические спектры генерируемого терагерцового поля при различной величине воздушного зазора между металлом и ниобатом лития. Теоретические спектры нормированы по амплитуде для лучшего соответствия с экспериментом. Узкие провалы в экспериментальном спектре являются следствием поглощения ТГц излучения на парах воды при распространении в воздухе. Такое поглощение не учитывалось в теоретических расчетах. Видно, что экспериментальные и теоретические спектры хорошо совпадают по форме. Меньшее значение высокочастотных спектральных компонент на рисунке 2.1.1(а) при экспериментальных измерениях можно объяснить их подавлением при детектировании в кристалле ZnTe вследствие поглощения. Отметим, что провалы в теоретическом и экспериментальном спектрах на рисунке 2.1.1(а) при частоте 1.4 ТГц полностью совпадают. На рисунке 2.1.1(б), провалы в теоретическом и экспериментальном спектрах не совсем совпадают, хотя формы спектров очень похожи: присутствуют два максимума, притом низкочастотный максимум больше. Несовпадение провала можно объяснить следующим образом. Как видно при сравнении рисунков 2.1.1 (а) и (б) приближение металлической пластины к ниобату лития приводит к смещению провала в область высоких частот. В эксперименте металлическая пластина находилась на подвижке и, возможно, при приближении соприкасалась с ниобатом лития не всей поверхностью. В некоторой части сэндвича

воздушный зазор был отличен от нуля, и, как результат, минимум в спектре генерируемого ТГц излучения был смещен в низкочастотную часть.

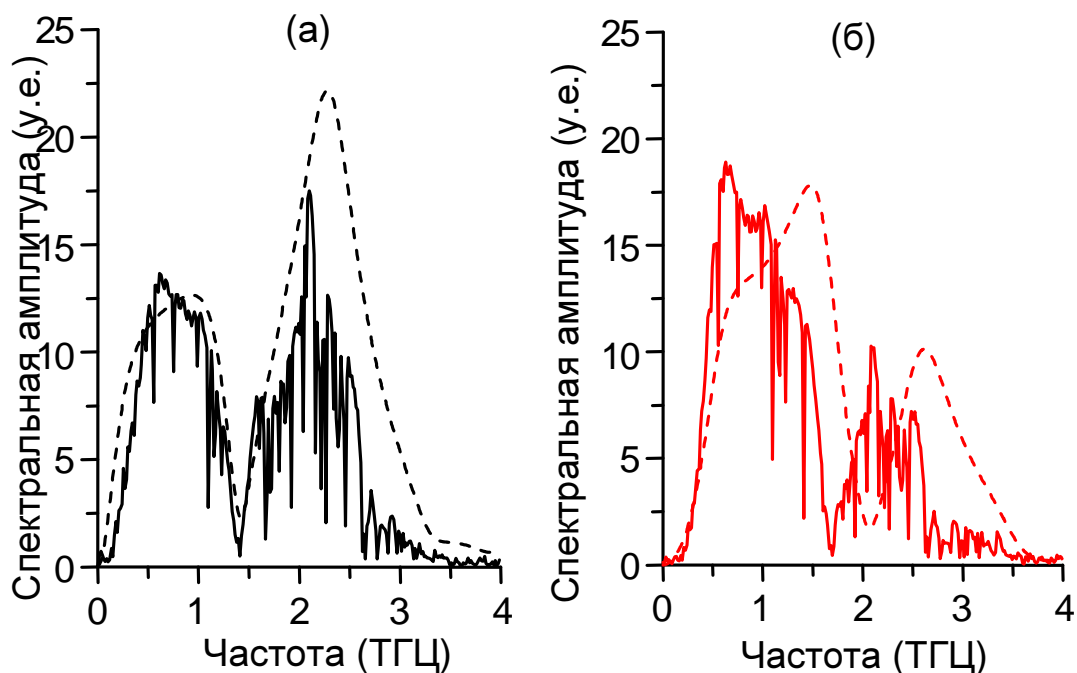


Рисунок 2.1.1 – Экспериментальные (сплошные кривые) и теоретические (пунктирные кривые) спектры терагерцового импульса, генерируемого в сэндвич-структуре когда металлическая подложка (а) удалена на значительное расстояние от LiNbO_3 и (б) приближена вплотную к LiNbO_3 .

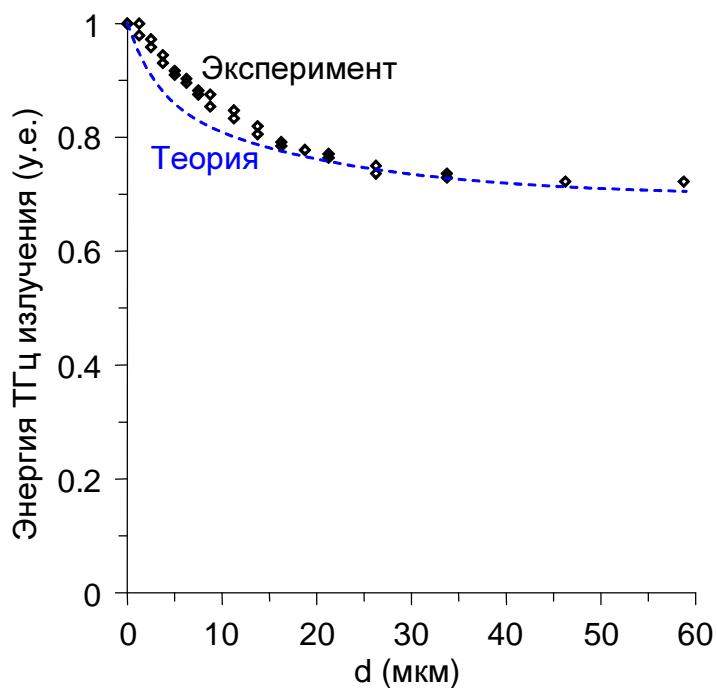


Рисунок 2.1.2 – Зависимость энергии терагерцового излучения от толщины

воздушного зазора d . Ромбики – эксперимент. Пунктирная кривая – теоретический расчет. Длительность лазерного импульса 50 фс.

На рисунке 2.1.2 представлена зависимость терагерцовой энергии от толщины воздушного зазора. Наблюдается хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов. Более резкое спадание теоретического графика можно объяснить неточностью настройки параллельности металлической пластины и LiNbO_3 в эксперименте.

Эффективность оптико-терагерцовой конверсии в зависимости от энергии лазерного излучения показана на рисунке 2.1.3. По экспериментальным данным эффективность в начале линейно зависит от энергии накачки, затем насыщается. Насыщение обусловлено нелинейными процессами самовоздействия лазерного излучения, а также многофотонным поглощением. Теоретические расчеты проводились на основе теории, развитой в первой части проекта. В теории предполагается, что лазерный импульс распространяется в среде без поглощения и изменения своей пространственной и временной формы. Следовательно, теоретические расчеты не учитывают указанные нелинейные эффекты. Следовательно, сравнение экспериментальных и теоретических данных необходимо проводить при небольших энергиях лазерного излучения (менее 5 мкДж/см). В теоретических расчетах учитывался гауссовый профиль поперечного распределения, отражение от входной границы и отражение ТГц от кремния

Как видно, наклон теоретических прямых (1 и 2) и прямых, проведенных по экспериментальным данным при малой энергии (3 и 4), не совпадает. Теория предсказывает эффективность примерно в 4 раза больше по сравнению с экспериментальными данными. Точного объяснения полученного расхождения пока объяснить невозможно, однако можно отметить несколько факторов, которые могут приблизить экспериментальные и теоретические результаты. Во-первых, в существует небольшое поглощение терагерцового излучения в кремнии (которое в теории не учитывается), во-вторых, существовали потери оптической энергии при фокусировки излучения в слой ниобата лития, в-третьих, используемое в расчетах значение нелинейного коэффициента ниобата лития 168 пм/В, возможно, является завышенным.

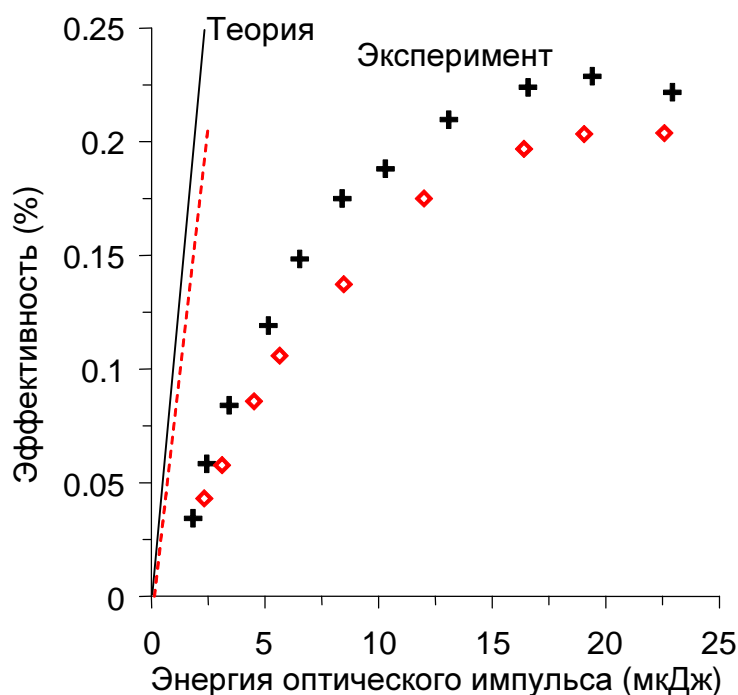


Рисунок 2.1.3 – Зависимость эффективности опико-терагерцовой конверсии от энергии лазерной накачки для металлической и воздушной подложки. Длительность лазерного импульса 50 фс.

В эксперименте были проведены исследования влияния длительности и частотной модуляции лазерного импульса (чирпа) на эффективность опико-терагерцовой конверсии. На рисунке 2.1.4 представлены результаты этих исследований при малой энергии накачки. Было обнаружено, что удлинение лазерных импульсов за счет ввода частотной модуляции (чирпа) приводит к увеличению или уменьшению эффективности опико-терагерцовой конверсии в зависимости от знака чирпа. При отрицательном чирпе с увеличением длительности лазерного импульса эффективность сначала увеличивается, достигает максимума при 100-150 фс, а затем монотонно уменьшается. При положительном чирпе эффективность монотонно уменьшается.

Разработанная ранее теория предсказывала монотонное уменьшение эффективности с увеличением длительности импульса (независимо от знака чирпа), что противоречит экспериментальным результатам. Однако данная теория не учитывает расплывание лазерного излучения вследствие материальной дисперсии ниобата лития. Именно материальная дисперсия и обуславливает различное поведение эффективности при разных знаках чирпа лазерного импульса.

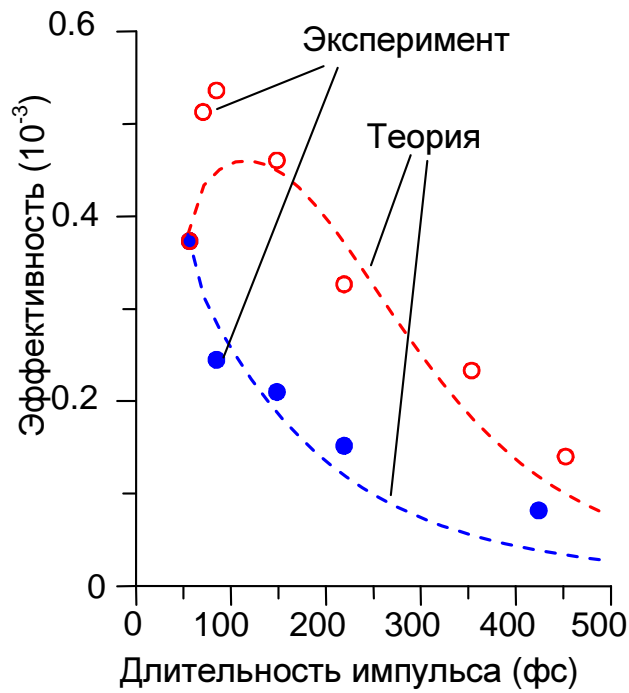


Рисунок 2.1.4 – Зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от длительности лазерного импульса при нормальном (кружочки) и обратном (ромбики) чирпе. Пунктирные кривые – теоретический расчет.

Для учета материальной дисперсии воспользуемся ранее развитой теории генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре [9]. Из теории следует, что энергия терагерцового излучения, генерируемая с единицы длины структуры определяется формулой

$$W_l \sim \frac{1}{(\tau^2 + (a\delta / 2.4c)^2)^{3/2}}, \quad (2.1.1)$$

где W_{opt} – энергия лазерного импульса, τ – длительность лазерного импульса по полувысоте интенсивности, a – толщина слоя ниобата лития, c – скорость света в вакууме, $\delta = \sqrt{\varepsilon_{LN} - n_g^2}$, где ε_{LN} – диэлектрическая проницаемость ниобата лития на ТГц частоте, n_g – групповой индекс показателя преломления. Учтем теперь, что длительность лазерного импульса τ зависит от координаты внутри кристалла z . Тогда полная энергия будет определяться формулой

$$W = \int_0^L \frac{const}{(\tau(z)^2 + (a\delta / 4c)^2)^{3/2}} dz \quad (2.1.2)$$

где

$$\tau(z) = \tau_0 \sqrt{(1 - \alpha_0 k_2 z)^2 + \left(\frac{k_2 z}{\tau_0^2}\right)^2}, \quad (2.1.3)$$

const – некоторая нормировочная константа, k_2 – дисперсионный коэффициент ниобата лития для лазерного излучения накачки, τ_0 – длительность лазерного импульса на входе в кристалл, α_0 – частотная модуляция определяемая формулой:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\tau_0^2} \sqrt{\left(\frac{\tau_0^2}{\tau_m^2}\right)^2 - 1}, \quad (2.1.4)$$

где τ_m – длительность спектрально ограниченного импульса (минимальная длительность). Результаты расчета интеграла 2.1.2 показаны на рисунке 2.1.4 пунктирными кривыми. В расчета нормировочного коэффициента делалась привязка теоретических расчетов к экспериментальным данным в точке $\tau_{mFWHM} = 50$ фс. Видно, что теоретический расчет дает хорошее согласование с экспериментальными измерениями.

2.2 Повышение эффективности генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре с металлической подложкой путем использования фемтосекундного лазерного излучения инфракрасного диапазона

В ходе эксперимента по генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре с металлической подложкой фемтосекундными лазерными импульсами на длине волны 800 нм наблюдалось быстрое насыщение эффективности при энергии лазерного излучения 20-50 мкДж. Данное насыщение обусловлено нелинейными эффектами самовоздействия лазерного излучения. Для уменьшения эффекта насыщения и повышения энергии генерируемого ТГц излучения было предложено использовать в качестве лазерной накачки излучение на длине волны более 1 мкм. Для реализации данной идеи была разработана схема, приведенная на рисунке 2.2.1. Излучение фемтосекундного лазера после усилителя направляется на параметрический усилитель, где генерируется фемтосекундное излучение ИК диапазона. Далее излучение фокусируется в сэндвич-структуру цилиндрической линзой с фокусным расстоянием 10 см. Распространяющийся в тонком слое ниобата лития лазерный импульс генерирует черенковский клин терагерцового излучения в

кремниевую призму. Терагерцовое излучение высвечивается из кремниевой призмы и измеряется ячейкой Голэя. Для контроля точности фокусировки лазерного излучения в кристалл LiNbO_3 и прохождения оптического излучения через сэндвич-структуру используется CCD камера.

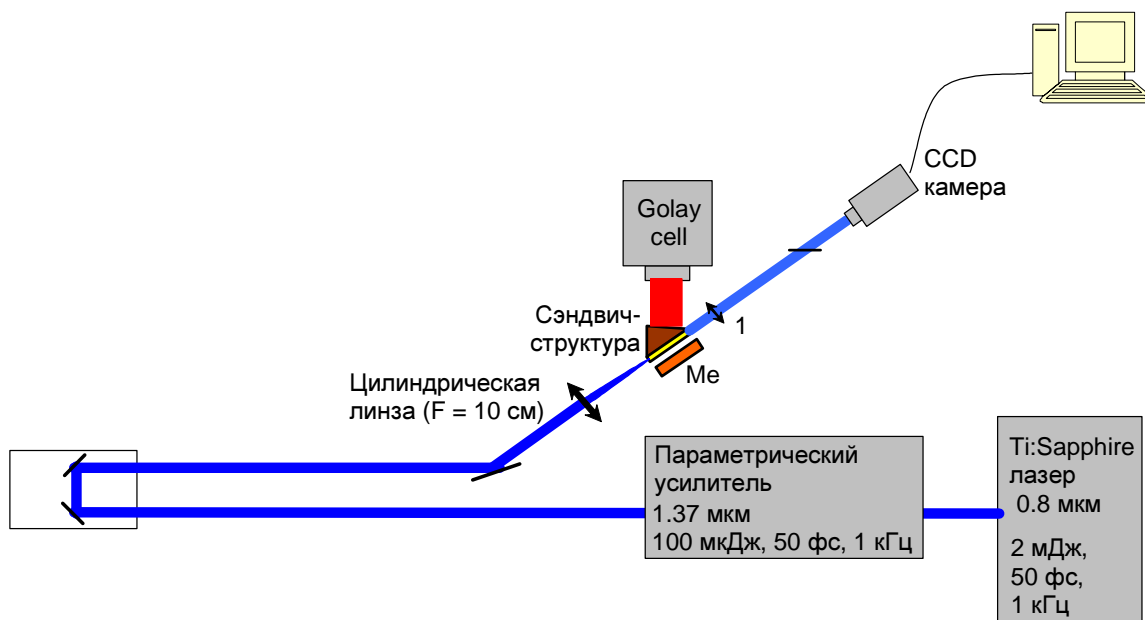


Рисунок 2.2.1. – Схема генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре при лазерной накачке на длине волны 1.37 мкм.

2.3 Испытание установки генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре фемтосекундными лазерными импульсами инфракрасного диапазона

В результате испытания экспериментальной установки были проведены измерения энергии генерируемого терагерцового излучения в зависимости от энергии лазерной накачки. Энергия лазерной накачки изменялась путем ввода в лазерный пучок тонких нейтральных фильтров. Результаты измерений приведены на рисунке 2.3.1. Видно, что при малой энергии накачки (до 20 мкДж) эффективность оптико-терагерцовой конверсии больше на длине волны 800 нм, когда как при большой энергии (более 20 мкДж) более эффективной является использование накачки на длине волны 1.37 мкм. Данный экспериментальный результат можно объяснить уменьшение нелинейности кристалла LiNbO_3 с увеличением длины волны. Действительно, уменьшение квадратичной нелинейности приводит к уменьшению эффективности оптико-терагерцовой конверсии при малой энергии. Однако при

большой энергии из-за меньшего значения кубичной нелинейности, насыщение происходит при большей оптической накачке.

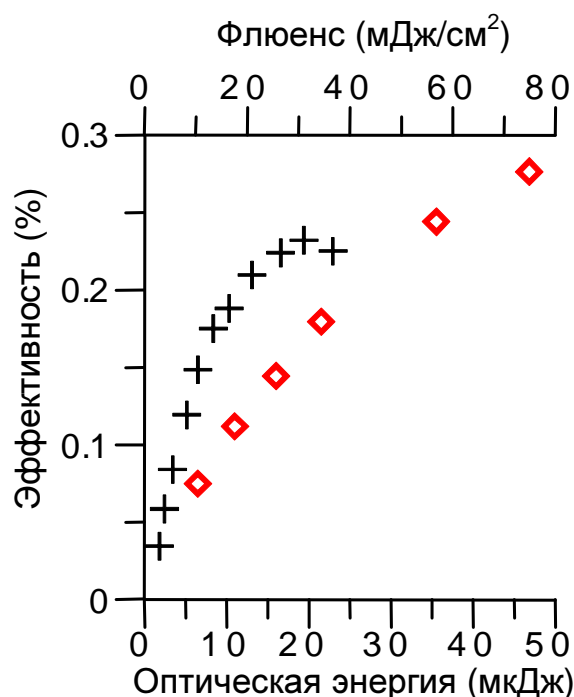


Рисунок 2.3.1. – Эффективность оптико-терагерцовой конверсии в зависимости от энергии оптического излучения. Крестики – при накачке на длине волны 800 нм, ромбики – при накачке на длине волны 1.37 мкм.

Результаты измерения поперечного профиля мгновенной интенсивности терагерцового излучения приведены на рисунке 2.3.2(б). Для сравнения приведена также осциллограмма ТГц поля, измеренная в центральной точке терагерцового пучка (рисунок 2.3.2 (а)). Из рисунка 2.3.2 (б) видно, что мгновенный профиль ТГц пучка изменяется с течением времени. В начальный момент в распределении наблюдается один центральный максимум, затем появляется кольцеобразная структура. Этот эффект можно объяснить дифракционным расплыванием ТГц пучка. Действительно, при дифракционном расплывании пучка искривляется фронт интенсивности, в то время как фронт зондирующего лазерного импульса является плоским. В результате наблюдается кольцеобразная структура мгновенного профиля интенсивности.

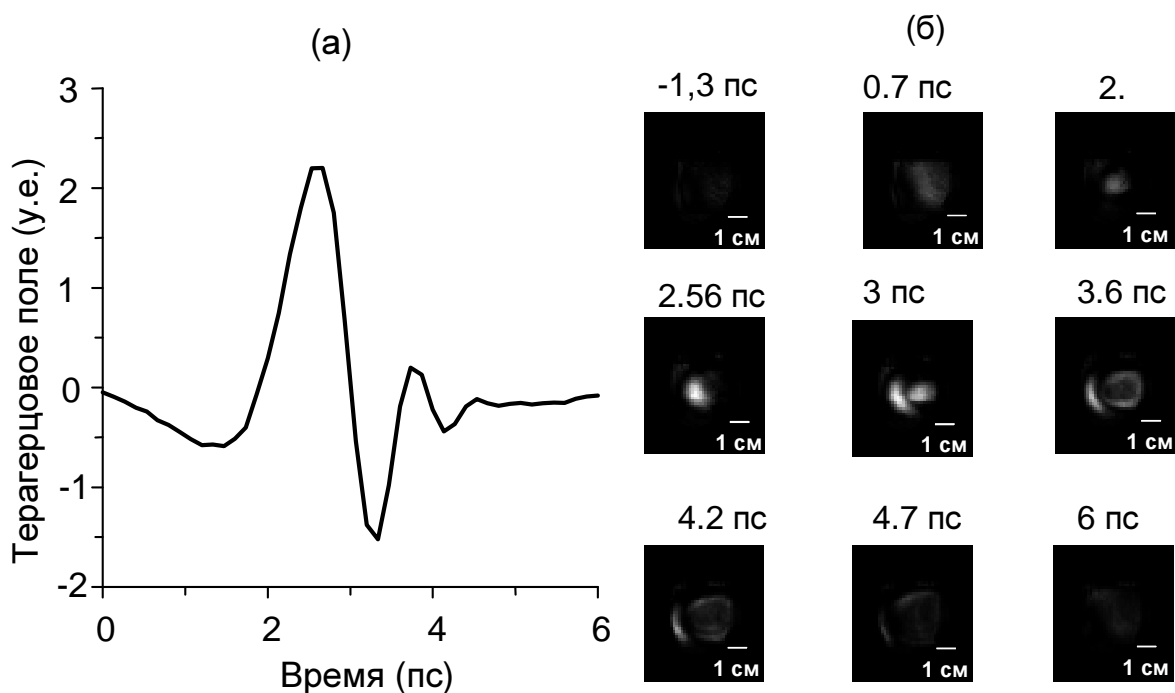


Рисунок 2.3.2. – (а) Осциллограмма терагерцового поля. (б) Поперечное распределение мгновенной интенсивности терагерцового поля в различные моменты времени.

2.4 Сопоставление результатов для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами

Проведем сравнение теоретической эффективности предложенного метода генерации терагерцовых поверхностных плазмонов с соответствующей экспериментально измеренной величиной. Для этого выполним оценку эффективности генерации терагерцовых поверхностных плазмонов с помощью экспериментального образца для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами.

За величину максимального значения сигнала, полученного при измерениях энергии терагерцового излучения, примем 650 мкВ. Данное значение соответствует входной и выходной щели 600-700 мкм и терагерцовым плазмонам с соответствующей областью локализации. Для оценки эффективности схемы

возбуждения была проведена калибровка детектора Голэя, с помощью которого выполнялось измерение энергии плазмонов. Калибровка проводилась по отраженному от клиньев из БК-7 оптическому излучению при частоте модуляции 20 Гц при измерениях на синхронном детекторе. При измерении падающей терагерцовой мощности входной конус ячейки Голэя был защищен от попадания нежелательного оптического излучения окном из высокоомного кремния с известным коэффициентом прохождения. В результате калибровки была получена величина чувствительности ячейки Голэя к терагерцовому сигналу, составившая 5,8 кВ/Вт. 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 [10].

2.5 Корректировка разработанной документации для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами

Скорректированная документация для экспериментального образца была разработана исходя из возможностей эрозионного станка, с помощью которого удалось изготовить экспериментальный образец 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 2.5.1.

№1

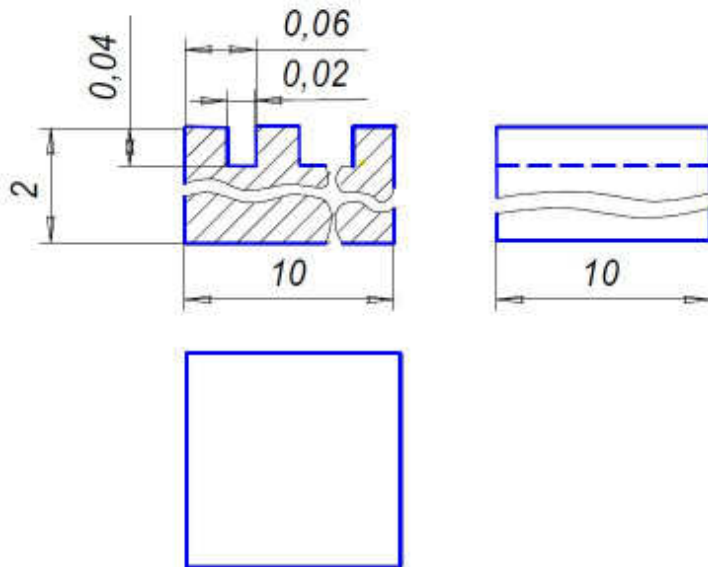


Рисунок 2.5.1 – Скорректированный эскиз экспериментального образца для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами

2.6 Изготовление и испытание экспериментального образца по скорректированной документации для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами

На рисунке 2.6.1 представлены микрофотографии изготовленного по скорректированной документации экспериментального образца.

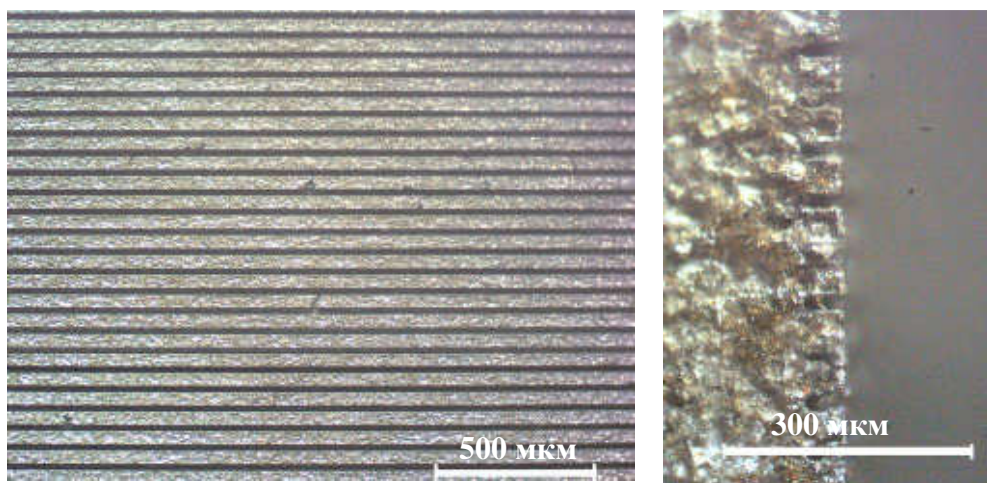


Рисунок 2.6.1 – Микрофотографии изготовленного по скорректированной документации экспериментального образца для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами. Слева: вид сверху, справа: вид сбоку.

2.7 Сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных результатов при исследовании генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности

В ходе исследований генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности в кристалле LiNbO_3 были проведены измерения энергии и спектра генерируемого ТГц излучения. На рисунке 2.7.1 приведена зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от энергии лазерного излучения. При большой энергии лазерной накачки наблюдается насыщение эффективности, что обусловлено нелинейными эффектами самовоздействия оптического излучения. При малой энергии наблюдается линейная зависимость эффективности от энергии лазерного излучения. Данный режим генерации согласуется с моделью, в которой предполагается распространение накачки без нелинейного поглощения и самовоздействия. Как видно, на рисунке 2.7.1(б) при различных длинах кристалла (L) и длительности лазерного импульса (τ) наклон линейных участков отличается.

Для объяснения экспериментальных результатов была использована развитая ранее теория, с учетом дисперсионного расплывания лазерного излучения в кристалле. В расчетах учитывался также тот факт, что в эксперименте положение кристалла LiNbO_3 вдоль лазерного луча выбиралось таким образом, чтобы максимизировать энергию терагерцового излучения. Согласно теоретическим расчетам отношение углов наклона прямых при параметрах: (1) $\tau = 190$ фс, $L = 10$ мм; (2) $\tau = 190$ фс, $L = 5$ мм; (3) $\tau = 120$ фс, $L = 10$ мм; (4) $\tau = 120$ фс, $L = 5$ мм равно (1):(2):(3):(4) = 1:0.63:0.69:0.51. В эксперименте отношение (1):(2):(3):(4) = 1:0.84:0.7:0.53. Видно хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов. Некоторое несоответствие наблюдается лишь для параметров (2).

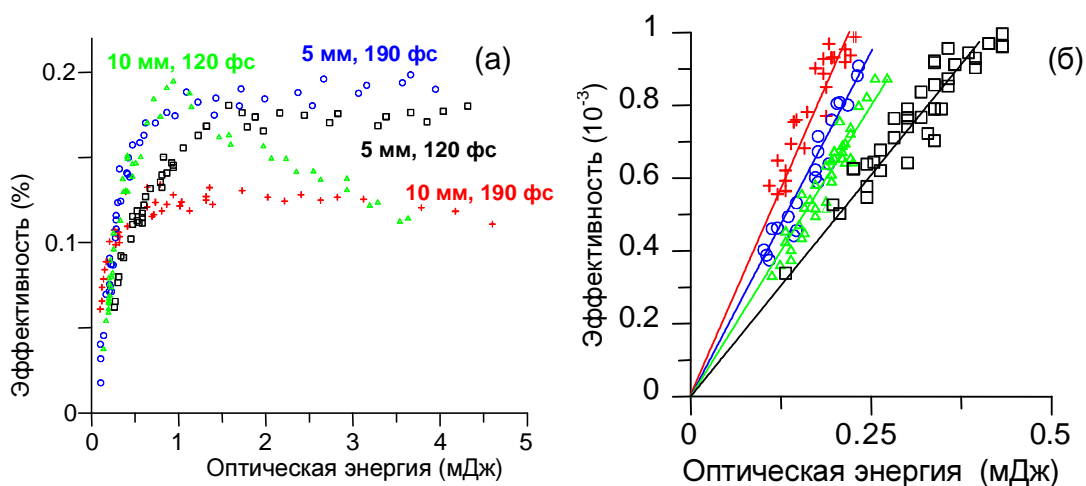


Рисунок 2.7.1 – Эффективность генерации в зависимости от энергии лазерного излучения

2.8 Визуализация пучка терагерцового излучения при генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности

В ходе эксперимента по генерации ТГц излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности была продемонстрирована возможность измерения поля терагерцового излучения на частоте повторения 10 Гц без фокусировки терагерцового пучка. Данный результат открывает возможность измерения поперечного распределения мгновенной интенсивности ТГц пучка. Для реализации данного измерения предлагается использовать схему, приведенную на рисунке 2.8.1. Схема генерации терагерцового излучения – левая часть схемы на

рисунке – не изменяется: ТГц излучение генерируется в кристалле LiNbO_3 лазерным импульсом со скошенным фронтом интенсивности, формируемым при отражении от дифракционной решетки. Для измерения профиля терагерцового пучка используется зондирующий лазерный пучок большого поперечного размера (~ 15 мм). Такой лазерный пучок направляется через линию задержки в широкоапертурный кристалл ZnTe , на который также попадает генерируемый ТГц пучок. В кристалле ZnTe терагерцовое поле наводит деполяризацию оптического излучения. Данная деполяризация измеряется с помощью поляризатора и CCD камеры: без ТГц поля поляризатор настраивается ортогонально поляризации оптического поля, что дает почти нулевую засветку на CCD камере, при наличии ТГц поля в кристалле ZnTe деполяризованное оптическое излучение частично проходит через поляризатор, при этом освещенность на CCD камере пропорциональна мгновенной интенсивности ТГц поля.

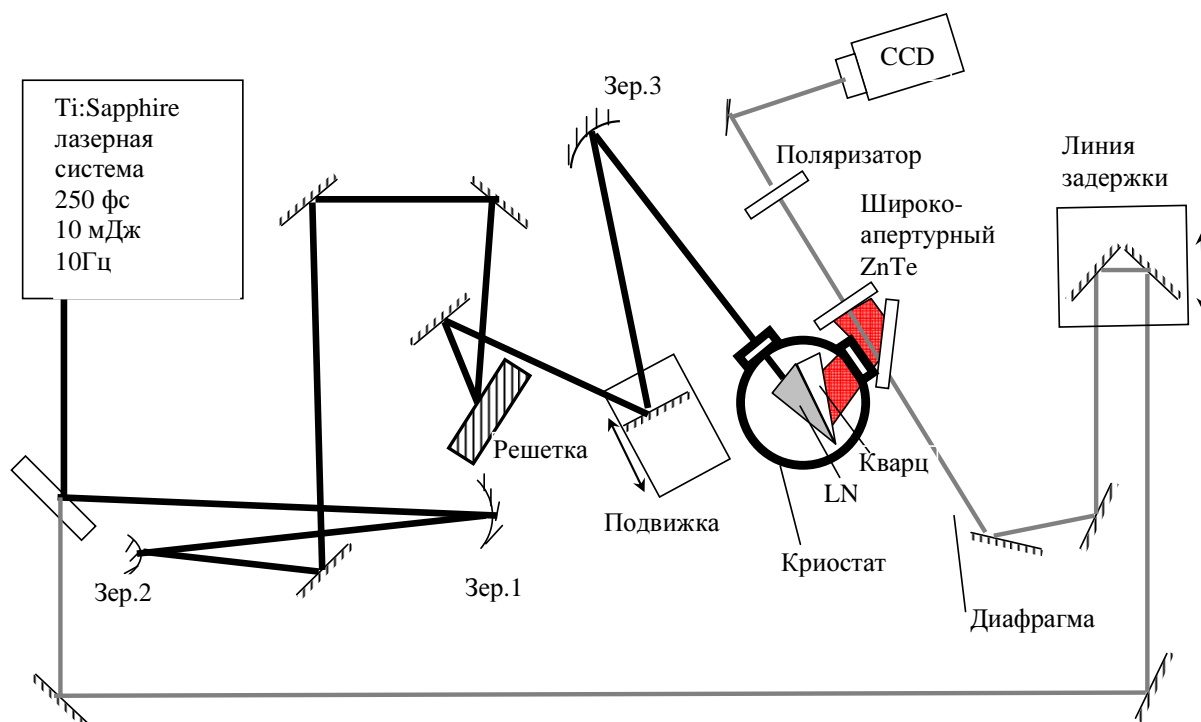


Рисунок 2.8.1. – Схема генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре при лазерной накачке на длине волны 1.37 мкм.

3 Публикации результатов НИР

По результатам выполнения задач 5 этапа опубликовано 3 статьи в иностранных и российских журналах, сделано 10 докладов на международных, всероссийских и региональных конференциях и семинарах.

Заключение

Поставленные на 5 этап задачи выполнены полностью.

1. 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.

2. 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/см^2) 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 250 фс, 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.

3. 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.

4. 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 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.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Bakunov, M. I.** Cherenkov radiation of terahertz surface plasmon polaritons from a superluminal optical spot / Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. // *Phys. Rev. B.* – 2005. – Vol. 72. – P. 195336.
- 5 Bakunov, M. I.** Phase-matched generation of a terahertz surface wave by a subluminal optical strip / Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. // *J. Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 98. – P. 033101.
- 6 Bakunov, M. I.** Below-band-gap excitation of a terahertz surface plasmon-polariton / Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B. // *J. Appl. Phys.* – 2006. – Vol. 100. – P. 026106.
- 7 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.
- 8 Бакунов, М.И.** Оптическая генерация терагерцевых плазмонов на гребенчатой поверхности металла / М.И. Бакунов, М.В. Царев, С.Б. Бодров // *Оптика и спектроскопия.* – 2010. – Т. 108, № 6. – С. 718–724.
- 9 Bodrov, S.B.** Efficient Cherenkov emission of broadband terahertz radiation from an ultrashort laser pulse in a sandwich structure with nonlinear core / Bodrov S.B., Bakunov M.I., Hangyo M. // *J. Appl. Phys.* – 2008. – V. 104. – P.093105-1-093105-11.

- 10 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, and R. A. Akhmedzhanov, // *Optics Express*. – 2009. – V. 17. – P. 1871-1879.
- 11 Bakunov, M.I.** Terahertz generation with tilted-front laser pulses: dynamic theory for low-absorbing crystals / M.I. Bakunov, S.B. Bodrov, E.A. Mashkovich // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 2011. – V. 28. – P.1724-1734.
- 12 Быстров, А. М.** Генерация терагерцового излучения при оптическом пробое газа / А. М. Быстров, Н. В. Введенский, В. Б. Гильденбург // *Письма в ЖЭТФ*. – 2005. – Т. 82. – С. 852.
- 13 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 ЖЭТФ*. – 2008. – Т. 88. – С. 659.
- 14 Sprangle, P.** Ultrashort laser pulses and electromagnetic pulse generation in air and on dielectric surfaces / P. Sprangle, J. R. Penano, B. Hafizi, and C. A. Kapetanacos // *Phys. Rev. E*. – 2004. – V. 69. – P. 066415.