

# Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 535

ГРНТИ 29.31.15, 29.33.25, 29.35.03

Инв. №

<b>УТВЕРЖДЕНО:</b>
Исполнитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
От имени Руководителя организации  _____/_____/_____ М.П.

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 3 этапа Государственного контракта  
№ ПЗ85 от 11 мая 2010 г. и Дополнению от 09 марта 2011 г. № 1

Исполнитель: Государственное 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  
2011 г.

# СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

Организация-Исполнитель: Государственное 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

без ученой степени, без  
ученого звания \_\_\_\_\_ Агрба П. Д.  
подпись, дата

без ученой степени, без  
ученого звания

\_\_\_\_\_ Катичев А. Р.

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 67 с., 1 ч., 16 рис., 0 табл., 7 источн., 0 прил.

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

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 3 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  $\text{LiNbO}_3$ , 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.

Разработан и изготовлен экспериментальный образец сэндвич-структуры с сердцевинной из ниобата лития.

Разработан и изготовлен экспериментальный образец микроструктурированной металлической поверхности с полоской электрооптического материала.

Модернизирован испытательный стенд для терагерцовых исследований.

Разработана методика экспериментальных исследований по генерации терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Аналитический отчет о проведении теоретических и экспериментальных исследований	11
1.1 Разработка и изготовление экспериментального образца сэндвич-структуры с сердцевиной из ниобата лития	11
1.1.1 Требования на параметры сэндвич-структуры	11
1.1.2 Процедура изготовления сэндвич-структуры	12
1.1.3 Результат изготовления и контроль качества сэндвич-структуры	15
1.2 Разработка и изготовление экспериментального образца микроструктурированной металлической поверхности с нанесенной на нее полоской электрооптического материала	18
1.3 Модернизация испытательного стенда для терагерцовых исследований	21
1.4 Разработка методики экспериментальных исследований по генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности	24
2 Результаты теоретических и экспериментальных исследований	33
3 Публикации результатов НИР	36
Заключение	66
Список использованных источников	67

## ВВЕДЕНИЕ

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 3 этапу Государственного контракта № П385 "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 3 этапу были запланированы следующие работы:

1. Разработка и изготовление экспериментального образца сэндвич-структуры с сердцевиной из ниобата лития.
2. Разработка и изготовление экспериментального образца микроструктурированной металлической поверхности с нанесенной на нее полоской электрооптического материала.
3. Модернизация испытательного стенда для терагерцовых исследований.
4. Разработка методики экспериментальных исследований по генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности.

Выполнение работ было направлено на достижение следующих целей:

1. Разработка оптимальной конструкции и технологии изготовления экспериментального образца высокоэффективного источника широкополосного терагерцового излучения на основе сэндвич-структуры с сердцевиной из электрооптического материала, накачиваемой фемтосекундными лазерными импульсами. Изготовление образца сэндвич-структуры с сердцевиной из ниобата лития для использования на следующих этапах с целью экспериментальной демонстрации высокоэффективной генерации ТГц излучения фемтосекундными лазерными импульсами.

2. Определение технологически реализуемых параметров и изготовление экспериментального образца микроструктурированной металлической поверхности с полоской электрооптического материала для использования на следующих этапах с целью прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов фемтосекундными лазерными импульсами.

3. Придание дополнительных возможностей терагерцовому испытательному стенду для проведения экспериментов по возбуждению и детектированию терагерцовых поверхностных плазмонов.

4. Разработка методики формирования фемтосекундных лазерных импульсов с требуемым углом наклона фронта интенсивности при помощи дифракционной решетки и методики экспериментальных исследований по генерации терагерцового излучения лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности в электрооптических кристаллах.

В результате проведенных исследований 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 ( $\text{LiNbO}_3$ ) легированного около 1% моль  $\text{MgO}$ , 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 методика проверки качества сэндвич-структур и проведена проверка качества изготовленной структуры.

Разработка экспериментального образца гребенчатой металлической поверхности для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов фемтосекундными лазерными импульсами проводилась на основе теоретических результатов, полученных на 2-ом этапе данного проекта. 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 волноводущей (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  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{GaAs}$  в результате действия факторов угловой дисперсии (зависимости угла дифракции от частоты) и материальной

дисперсии кристалла. Показано, что в LiNbO<sub>3</sub> 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 LiNbO<sub>3</sub> 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 LiNbO<sub>3</sub> 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 LiNbO<sub>3</sub>, 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.



Требования к кремниевой призме:

- материал призмы – высокоомный кремний с удельным сопротивлением не менее 50 кОм/см.
- призма должна иметь прямоугольное основание, угол АКС – прямой, угол АСК равен 42 градусам, допуск 0.5 градуса;
- размеры призмы  $AC = 10$  мм,  $CF = 10$  мм,  $КС = 7.4$  мм,  $АК = 6.7$  мм;
- длина призмы АС должна совпадать с длиной слоя ниобата лития с точность не хуже 0.1 мм;
- правая (СКМФ) и нижняя (АGCF) грани кремниевой призмы полированы, полировка Р IV/III;
- плоскостность правой грани N5;
- плоскостность нижней грани N2.

Требования на клей, соединяющий призму и пластину ниобата лития

- клей должен обладать поглощением в области частот от 0.1 до 5 ТГц не более  $50 \text{ см}^{-1}$ ;
- диэлектрическая проницаемость клея в терагерцовой области частот должна быть менее 30;
- клей должен быть достаточно вязким для компенсации различных значений термических коэффициентов расширения ниобата лития и кремниевой призмы;
- толщина клея должна быть не более 5 мкм;
- клей не должен выступать за границы граней АВGH и CDEF;
- толщина клея должна быть примерно одинакова и не должна превышать 5 мкм.

### **1.1.2 Процедура изготовления сэндвич-структуры**

Для изготовления требуемой сэндвич-структуры нами разработана следующая технологическая процедура.

1. Необходимо изготовить призму требуемого размера и отполировать грани АGCF и СКМФ.
2. Приготовить прямоугольную пластину ниобата лития размером  $10 \times 10 \times 1 \text{ мм}^3$  соответствующей ориентации.

3. Выполнить шлифовку одной из больших граней (AGCF) ниобата лития так, чтобы толщина пластины составила 0.5-0.7 мм. Затем выполнить глубокую полировку, последовательно уменьшая размер полировочного порошка.

4. Приклеить отшлифованную грань ниобата лития к большой грани кремниевой призмы. При склеивании необходимо контролировать точность совпадения боковых сторон слоя с краями основания призмы. Точность совпадения не хуже 0.2 мм. Для склейки можно использовать клей АК-72 ФТ15. Данный клей обладает довольно большой вязкостью. Кроме того, как показали предварительные экспериментальные исследования, данный клей обладает малым показателем преломления и небольшим поглощением на терагерцовых частотах. На рисунках 1.2 и 1.3 приведены результаты измерений прохождения терагерцового излучения через слой клея толщиной 1.4 мм. Как видно из рис. 1.3 при низкой частоте спектральная амплитуда уменьшается на 10%, что согласуется с френелевским коэффициентом прохождения через слой клея. Действительно, как показали экспериментальные исследования, зондирующий терагерцовый сигнал испытывает задержку на 3 пс при прохождении слоя клей. Эта же задержка рассчитывается по формуле  $(n - 1) \cdot d/c$ , где  $d = 1.4$  мм – толщина слоя,  $c = 3 \cdot 10^{10}$  – скорость света в вакууме,  $n$  – показатель преломления слоя. На основании данной формулы получаем показатель преломления клея  $n = 1.6$ . Согласно формулам Френеля при данном показателе преломления коэффициент прохождения терагерцового излучения через слой равен 95% без учета поглощения. Таким образом, на частотах менее 0.4 ТГц клей обладает поглощением менее  $1 \text{ см}^{-1}$ . При больших частотах поглощение увеличивается и достигает величины  $\sim 10 \text{ см}^{-1}$  в области 1-2 ТГц. Таким образом, исследованный клей удовлетворяет требуемым параметрам и может быть использован для склеивания кремниевой призмы и слоя ниобата лития.

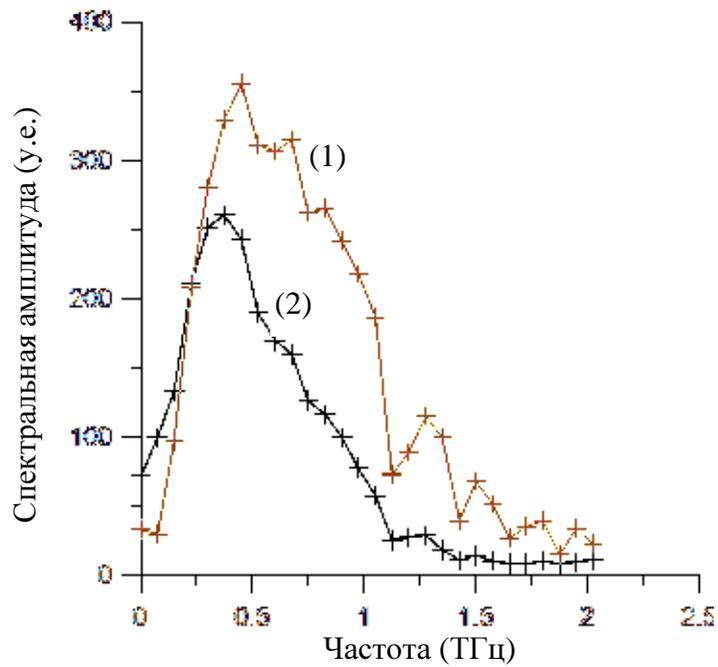


Рисунок 1.2 – (1) Опорный спектр терагерцового излучения, и (2) спектр терагерцового излучения, прошедшего через клей АК72 толщиной 1.5 мм

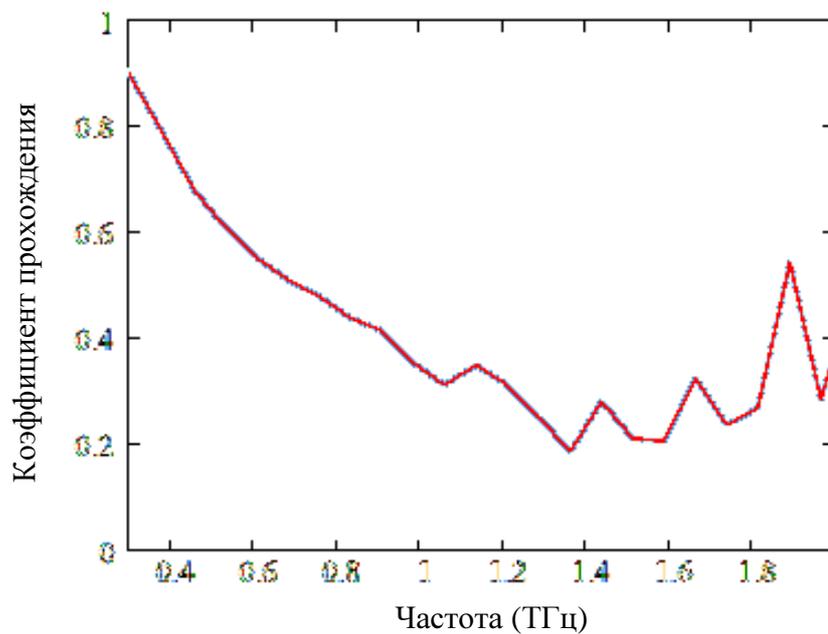


Рисунок 1.3 – Амплитудный коэффициент прохождения через клей АК72 толщиной 1.5 мм в зависимости от частоты.

5. После склеивания призмы и пластины ниобата лития необходимо отшлифовать поверхность пластины до толщины около 50 мкм, а затем, последовательно уменьшая зерно полировочного порошка, довести толщину до требуемого значения 30 мкм.

6. На данном этапе необходимо отполировать боковые грани сэндвич структуры. Отметим, что при полировке часть материала призмы (и ниобата лития) будет сточена, однако это не приведет к ухудшению свойств сэндвич структуры. Совместная полировка  $\text{LiNbO}_3$  и кремниевой призмы дает точное совпадение границ призмы и нелинейной пластины. Это важно в дальнейшем для проведения эксперимента, поскольку лазерное излучение будет фокусироваться на грань АВGH и наличие выступающей части кремниевой призмы нежелательно ввиду возможного дополнительного рассеяния. Для сохранения ортогональности граней BDEH и АВGH во время полировки необходимо предварительно, на время полировки, приклеить к грани BDEH прямоугольную призму в качестве меры ортогональности.

### **1.1.3 Результат изготовления и контроль качества сэндвич-структуры**

На основе разработанной методики была изготовлена сэндвич-структура. На рисунке 1.4 (а) приведена фотография структуры, а на рисунке 1.4 (б) показан снимок боковой грани структуры, сделанный через микроскоп. На рисунке 1.4 (б) виден слой клея в виде тонкой полоски. По оценке его толщина менее 5 мкм. Как показали визуальные исследования боковая грань (ABHG) слоя ниобата лития довольно гладкая, существуют небольшие сколы по краям. Однако помимо мелких сколов наблюдаются дефекты на весь поперечный размер слоя, тем не менее, их суммарная площадь составляет менее 10% от площади всей грани.

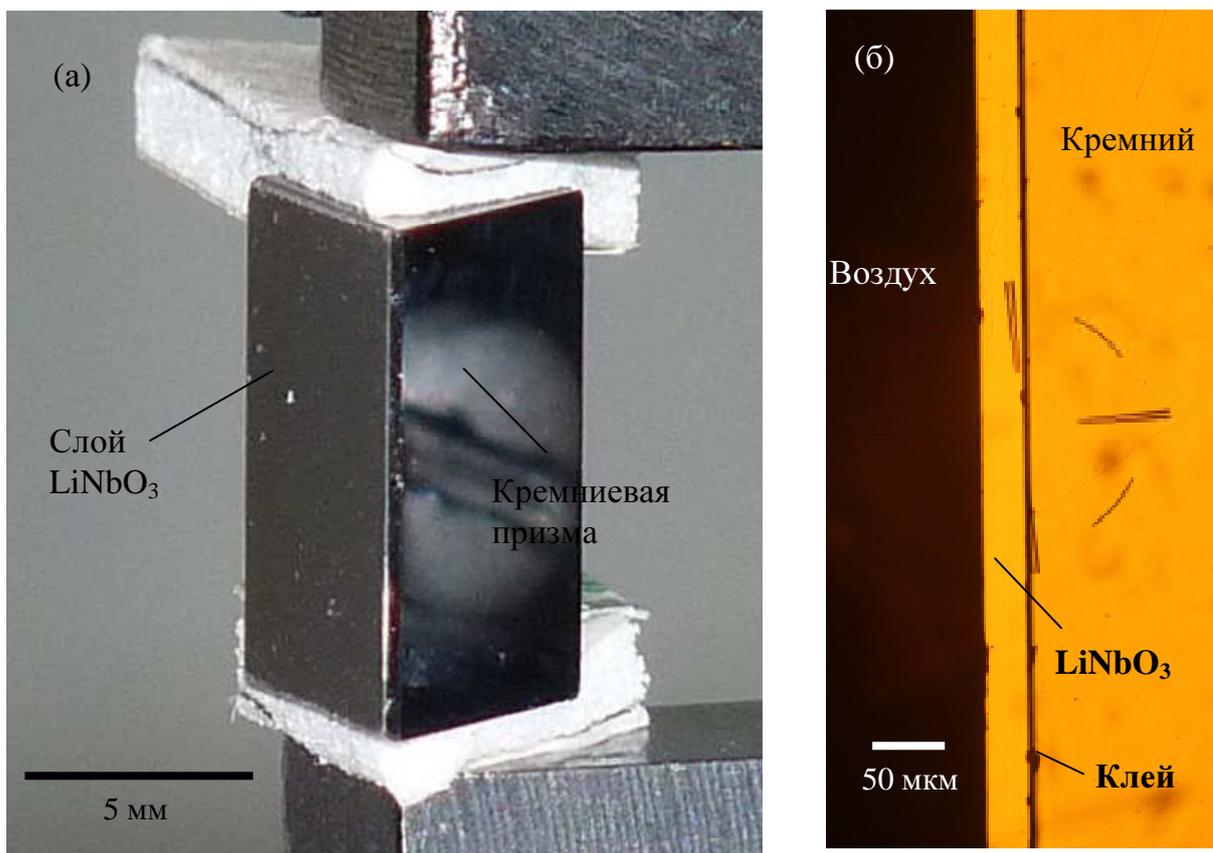


Рисунок 1.4 – (а) Фотография сэндвич-структуры (в держателе). (б) Снимок участка сэндвич-структуры через микроскоп.

После проведения поверхностного контроля с помощью микроскопа необходимо убедиться в отсутствии объемных дефектов. Для этого было проведено исследование прохождения видимого излучения через пластину ниобата лития. В качестве источника излучения был использован He-Ne лазер. Схема диагностики прохождения через пластину  $\text{LiNbO}_3$  приведена на рисунке 1.5(а). Излучение лазера фокусируется цилиндрической линзой на входную грань пластины ниобата лития в сэндвич структуре (ABGH), расположенной в фокусе линзы. Поперечный размер лазерного пучка перед цилиндрической линзой и фокусное расстояние линзы выбираются такими, чтобы поперечный размер пучка (по полувысоте интенсивности) в фокусе был в два раза меньше толщины нелинейной пластины [1]. Это условие позволяет наиболее эффективно заводить лазерное излучение в пластину ниобата лития, возбуждая основную моду планарного волновода. Качество прохождения через пластину  $\text{LiNbO}_3$  контролируется путем переноса изображения лазерного пучка с выходной грани пластины на CCD камеру с помощью короткофокусной линзы.

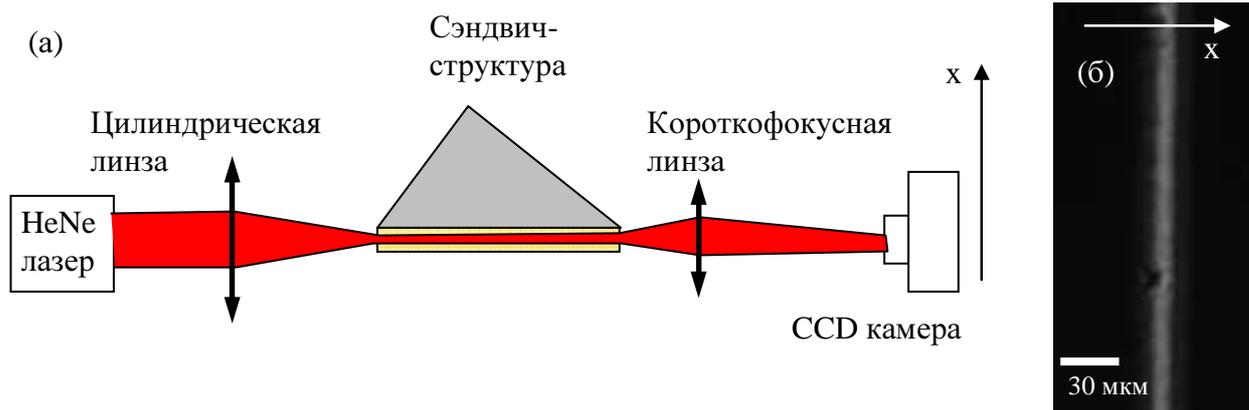
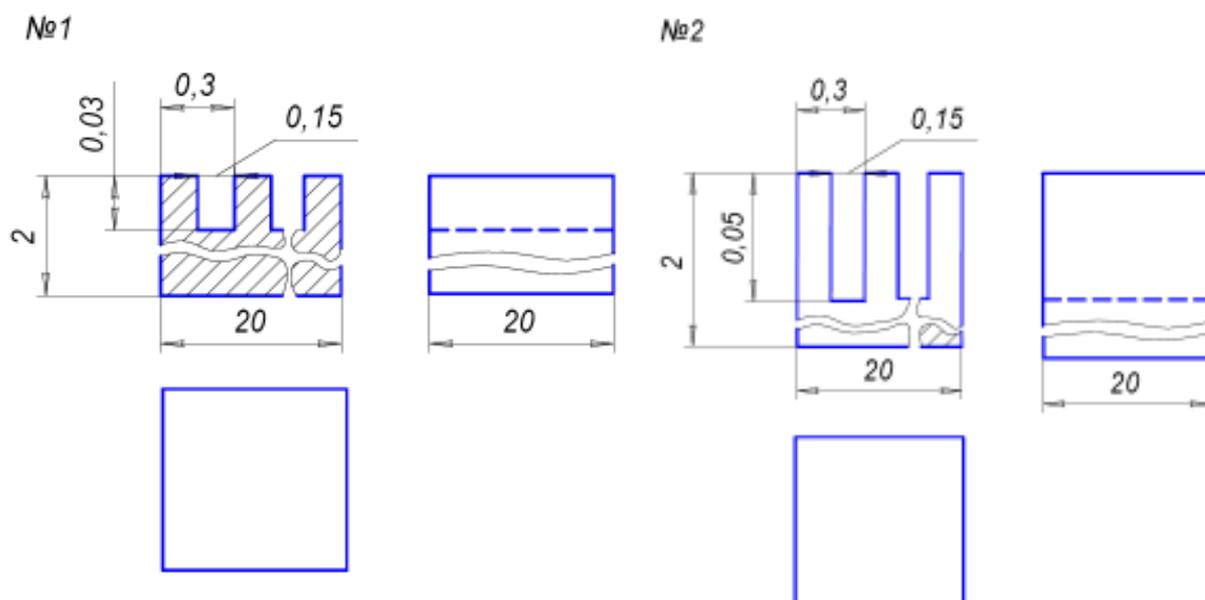


Рисунок 1.5 – (а) Схема для проверки качества изготовления сэндвич-структуры. (б) Распределение интенсивности лазерного излучения на выходе из слоя  $\text{LiNbO}_3$ .

Диагностика прохождения лазерного излучения продемонстрировала хорошее качество изготовления. Действительно, как видно из рисунка 1.5 (б) на камере наблюдается довольно ровная светлая полоса с поперечным распределением вдоль оси  $x$  в виде функции  $\cos^2(x)$ , что соответствует теоретическим предсказаниям [1].

## **1.2 Разработка и изготовление экспериментального образца микроструктурированной металлической поверхности с нанесенной на нее полоской электрооптического материала**

Разработка экспериментального образца микроструктурированной металлической поверхности проводилась на основе теоретических исследований, выполненных на 2-ом этапе данного проекта (Проведение расчетов и математического моделирования по разработке экспериментального образца для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами). 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). С точки зрения 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 были приняты размеры  $2 \times 2$  см<sup>2</sup>. Толщина металлического образца (2 мм) была выбрана, исходя из удобства закрепления в оптической схеме. Эскизы экспериментальных образцов микроструктурированной металлической поверхности приведены на рис. 2.1. Экспериментальный образец микроструктурированной металлической поверхности был изготовлен по приведенным эскизам в НПП «Салют» (Нижний Новгород) методом фрезеровки с последующей химической полировкой в количестве пяти штук.



*Размеры в мм.*

Рисунок 2.1 – Эскизы экспериментального образца микроструктурированной металлической поверхности.

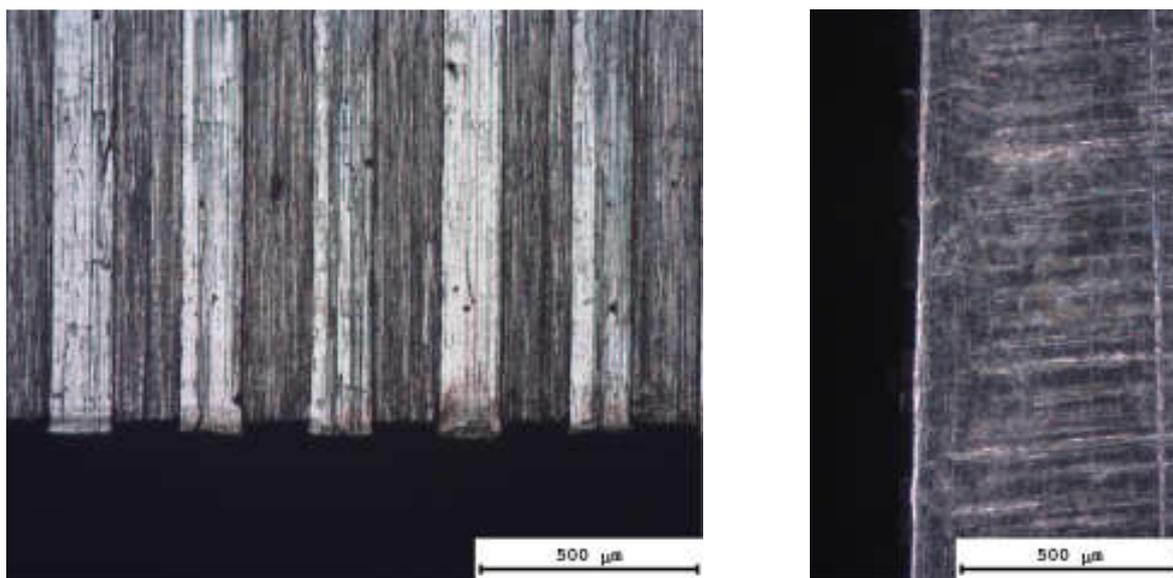


Рисунок 2.2 – Микрофотографии экспериментального образца: вид сверху (слева) и вид с торца (справа).

На рис. 2.2 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 [2, 3], разработанному в ходе выполнения предыдущих этапов данного проекта, к боковой грани микроструктурированного образца (на рис. 2.1 сверху справа) был прикреплен кристалл  $\text{LiNbO}_3$  кристаллографической ориентации  $\langle 001 \rangle$  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  $\text{LiNbO}_3$  при его освещении через верхний торец лазерными импульсами титан-сапфирового лазера (длина волны 800 нм) позволяет создать движущийся над поверхностью нелинейный поляризационный источник терагерцовых плазмонов. Эффективный размер источника составляет порядка 0,2 мм по высоте (выступающая часть кристалла).

### **1.3 Модернизация испытательного стенда для терагерцовых исследований**

Схема испытательного стенда изображена на рис. 3.1. 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 рис. 3.1) применяется кристалл ZnTe <110> толщиной 2 мм. В качестве накачки используются импульсы фемтосекундной лазерной системы Tsunami с центральной длиной волны 800 нм, шириной спектральной полосы 13 нм и энергией 10 нДж. Длительность импульсов составляет 90 фс. Терагерцовое излучение из кристалла генератора с помощью двух параболических зеркал (числовая апертура первого зеркала 1.4, второго - 0.7) фокусируется в кристалл детектора Д. Между параболическими зеркалами может быть 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. рис. 3.1) проходит 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 позволяет измерять электрическое поле терагерцового импульса с разрешением по времени, т.е. фактически снимать осциллограмму терагерцового поля. В качестве детектора в эксперименте используется кристалл ZnTe толщиной 1 мм. После прохождения пробным пучком кристалла детектора, его поляризация с помощью четвертьволновой пластинки переводится в близкую к круговой, после чего пробный пучок разделяется (с помощью призмы Волластона П-2, рис. 3.1) 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 рис. 3.1) и синхронное (на частоте модуляции) детектирование разностного сигнала с фотодиодов синхронным услителем 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).

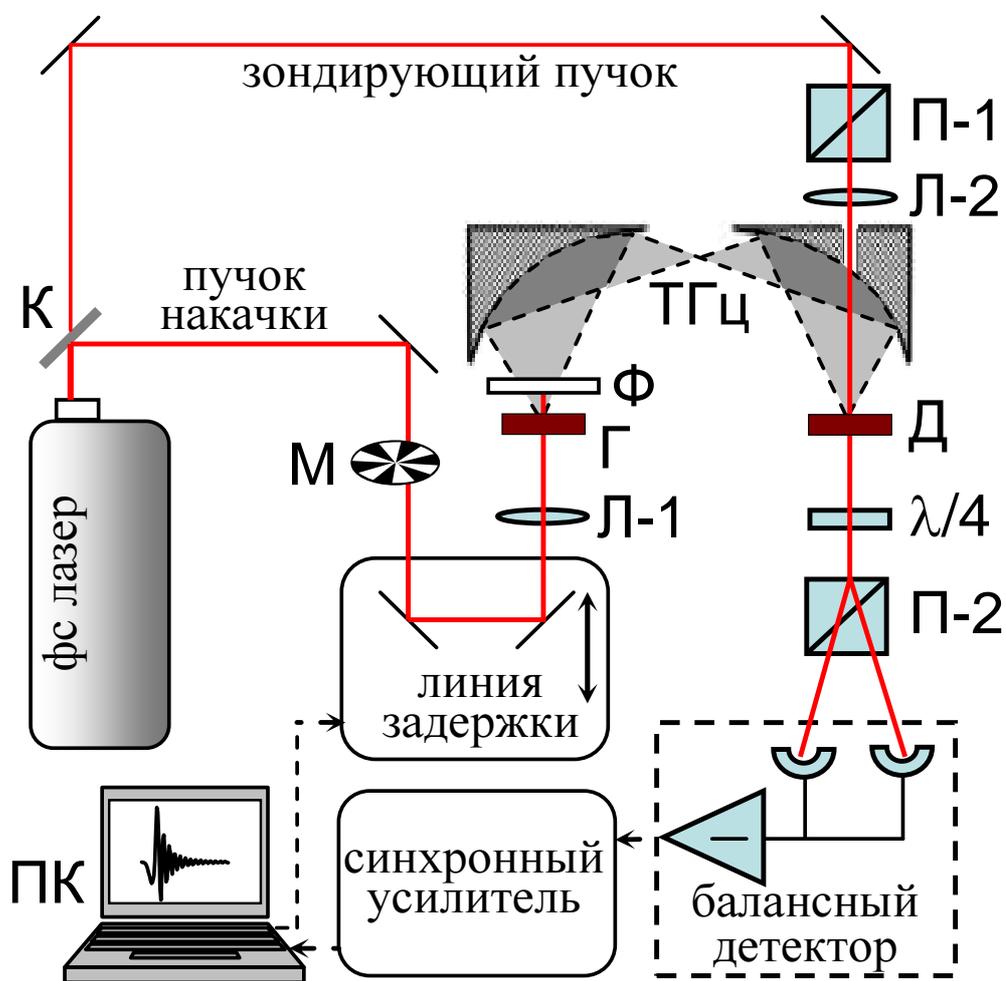


Рисунок 3.1 – Схема испытательного стенда для терагерцовых исследований.

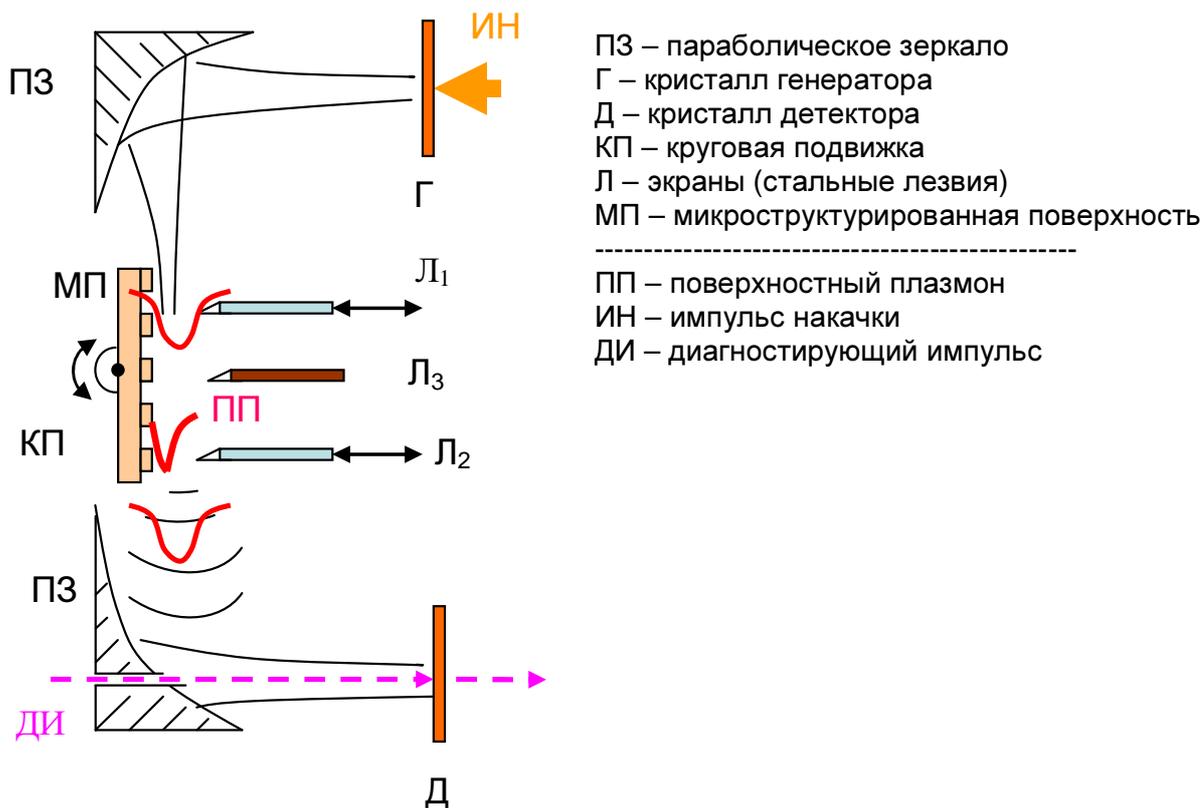


Рисунок 3.2 – Схема модернизированной части испытательного стенда для терагерцовых исследований.

В рамках данного этапа проекта в существующую оптическую схему для генерации терагерцового излучения был внесен ряд изменений. Модернизация коснулась части схемы между параболическими зеркалами (эта часть схемы показана на рис. 3.2). 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).

## 1.4 Разработка методики экспериментальных исследований по генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности

Экспериментальные исследования по генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности планируются провести с использованием двух кристаллов: ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) и арсенида галлия ( $\text{GaAs}$ ). В обоих случаях принципиальным является создание лазерного импульса с заданным углом скоса, а также оптимальное расположение нелинейного кристалла для максимизации длины взаимодействия оптической накачки с нелинейным кристаллом.

Для формирования скошенного лазерного импульса необходимо использовать элемент, формирующий угловую дисперсию. Данным элементом может быть, например, дифракционная решетка. Пусть фемтосекундный лазерный импульс падает под углом  $\beta$  из вакуума на дифракционную решетку с периодом  $d$ . Для простоты анализа будем считать, что решетка находится на поверхности электрооптического кристалла (см. рисунок 4.1). В эксперименте решетку планируется располагать удаленно и использовать линзу для переноса изображения лазерного импульса с решетки в электрооптический кристалл (см. ниже). Сейчас нас будет интересовать, как лазерный импульс с определенным углом скоса будет распространяться в кристалле.

Необходимый для достижения фазового синхронизма угол скоса определяется отношением индекса группового запаздывания оптического импульса  $n_g$  и показателя преломления терагерцовых волн  $\sqrt{\varepsilon_0}$  [4]

$$\alpha_{cr} = \arccos(n_g / \sqrt{\varepsilon_0}). \quad (4.1)$$

Для кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{GaAs}$  угол равен  $63^\circ$  и  $13^\circ$  при комнатной температуре. Для  $\text{LiNbO}_3$  при криогенной температуре  $\alpha_{cr} = 62^\circ$ .

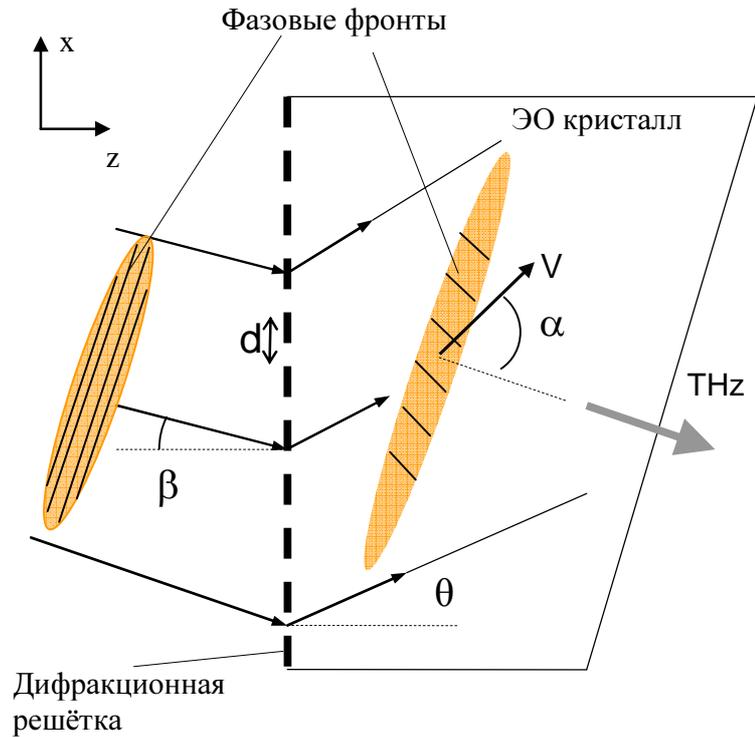


Рисунок 4.1 - Схема формирования наклонного фронта интенсивности.

После решётки импульс распространяется под углом  $\theta$ , направлением на первый дифракционный максимум для центральной частоты  $\omega_0$  падающего импульса. Угол между нормалью к фронту интенсивности и направлением распространения импульса  $\alpha$  (далее угол скоса). При  $\alpha > \alpha_{cr}$  возможна синхронизованная генерация терагерцового излучения на определенной длине волны. Максимальная эффективность достигается при малой отстройке  $\alpha$  от  $\alpha_{cr}$ , порядка  $1^\circ$ . Ранее было показано, что величина отстройки жестко связана с длиной электрооптического кристалла. Чем меньше отстройка, тем больше эффективность электрооптической конверсии, но тем больше необходима длина кристалла для достижения данной эффективности. Например, при отстройке на  $1^\circ$  длина кристаллов должна составлять 1 мм для  $\text{LiNbO}_3$  и 10 мм для  $\text{GaAs}$ . Важно отметить, что на этих длинах оптический импульс не должен сильно расплываться, однако из-за наличия скоса импульс испытывает «усиленное» расплывание. Поэтому необходимо предварительно рассчитать влияние скоса на динамику лазерного импульса при распространении в кристалле.

В качестве падающего импульса рассматривается импульс с гауссовым временным и пространственным профилем  $F(t) = \exp(-t^2/\tau^2)$ , где  $\tau$  - длительность и  $G(x) = \exp(-x^2/l^2)$ , где  $l$  - поперечный размер. Падающую волну представим

интегралом Фурье по частотам  $\omega$  и поперечным волновым векторам  $g$  падающего импульса

$$E_{II}(x, z, t) = \iint e^{\frac{-(\omega-\omega_0)^2 \tau^2}{4}} e^{\frac{-g^2 l_{\perp}^2}{4}} e^{i\omega t - ik_x x + ik_z z} d\omega dg, \quad (4.2)$$

где

$$\begin{aligned} k_x &= g \cos \beta - \sqrt{\omega^2/c^2 - g^2} \sin \beta \\ k_z &= g \sin \beta - \sqrt{\omega^2/c^2 - g^2} \cos \beta \end{aligned} \quad (4.3)$$

проекции волновых векторов падающего импульса на систему координат  $(x, z)$  связанную с решёткой.

Согласно уравнению решётки проекция волнового вектора на ось  $x$  после прохождения решётки изменится на волновой вектор  $2\pi/d$ . Тогда запишем дифрагированную волну

$$E(x, z, t) = \iint e^{\frac{-(\omega-\omega_0)^2 \tau^2}{4}} e^{\frac{-g^2 l_{\perp}^2}{4}} e^{i\omega t - iK_x x - iK_z z} d\omega dg, \quad (4.4)$$

где

$$\begin{aligned} K_x &= k_x - 2\pi/d \\ K_z &= \sqrt{n^2 \omega^2/c^2 - K_x^2} \end{aligned} \quad (4.5)$$

проекции волновых векторов дифрагированного импульса,  $n$  – показатель преломления среды. Проведём замену переменных интегрирования на  $K_x$  и  $K_z$ . Тогда запишем дифрагированную волну в виде

$$E(x, z, t) = \iint e^{\frac{-(\omega-\omega_0)^2 \tau^2}{4}} e^{\frac{-g^2 l_{\perp}^2}{4}} e^{i\omega t - iK_x x - iK_z z} \left| \frac{D(\omega, g)}{D(K_x, K_z)} \right| dK_x dK_z \quad (4.6)$$

где  $\omega = \omega(K_x, K_z)$  и  $g = g(K_x, K_z)$  находятся из уравнений (4.5). Решение (4.6) находится с использованием быстрого преобразования Фурье.

При расчете дифрагированного импульса по формуле (4.6) его угол скоса находится численно как угол между нормалью к фронту интенсивности и направлением распространения центральной частотной составляющей импульса  $\omega_0$ . На рис. 4.2 приведена связь  $d$  и  $\beta$ , обеспечивающая фиксированную отстройку  $\alpha - \alpha_0 = 1^\circ$  для случая  $\text{LiNbO}_3$ . Широкий диапазон значений  $d$  и  $\beta$  позволяет подстроить параметры схемы под конкретную экспериментальную установку. Для получения

требуемого угла скоса  $\alpha$  в эксперименте наиболее практичным является подбор угла падения импульса на решетку  $\beta$  при фиксированном периоде решётки  $d$ .

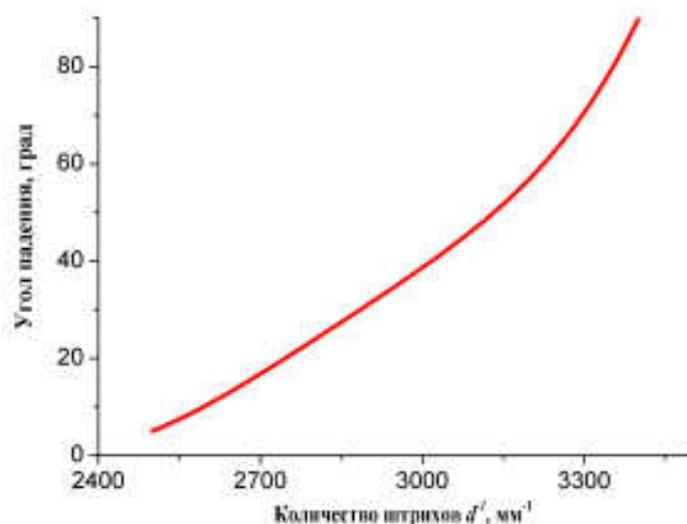


Рисунок 4.2 – Связь угла падения с периодом решётки при фиксированном угле скоса  $\alpha=63.7^\circ$  в кристалле  $\text{LiNbO}_3$ .

На рис. 4.3(а) и 4.4(а) приведены моментальные снимки импульса при распространении в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{GaAs}$  соответственно для длительности падающего импульса  $\tau = 100$  фс. Для  $\text{LiNbO}_3$   $\alpha = 63.7^\circ$ ,  $d = 0.4$  мкм и  $\beta = 5^\circ$  и для  $\text{GaAs}$  -  $\alpha = 14^\circ$ ,  $d = 2.5$  мкм и  $\beta = 22^\circ$ . Первый снимок из серии соответствует моменту времени, когда половина импульса прошла через решётку. На следующих снимках показано его распространение в кристалле от дифракционной решётки в фиксированные моменты времени. Плоскость решётки совпадает с осью ординат. Из рис. 4.3(а) и 4.4(б) видно, что импульс испытывает расплывание как в продольном, так и в поперечном направлениях, что согласуется с работами [5,6].

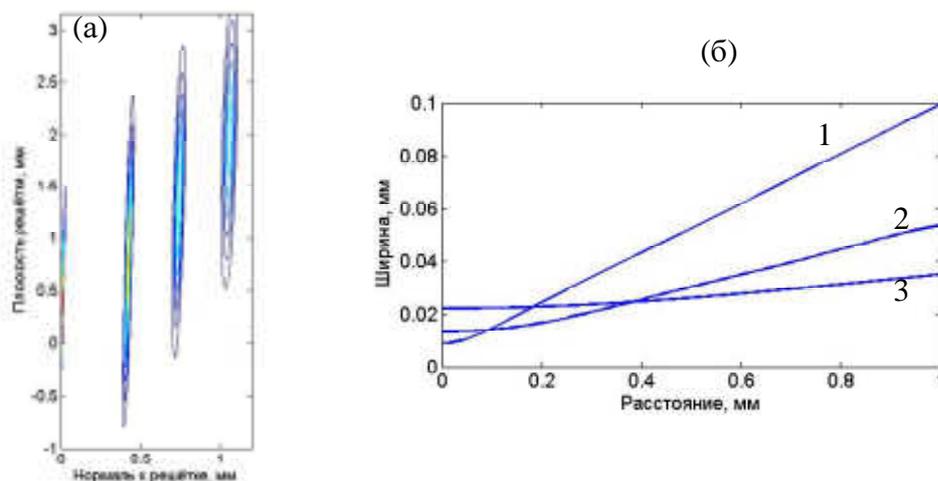


Рисунок 4.3 – (а) Моментальные снимки при  $\tau = 100$  фс и (б) зависимость ширины импульса от расстояния для  $\tau = 50$  фс, 100 фс и 200 фс (кривые 1, 2, 3 соответственно) при распространении в кристалле  $\text{LiNbO}_3$ .

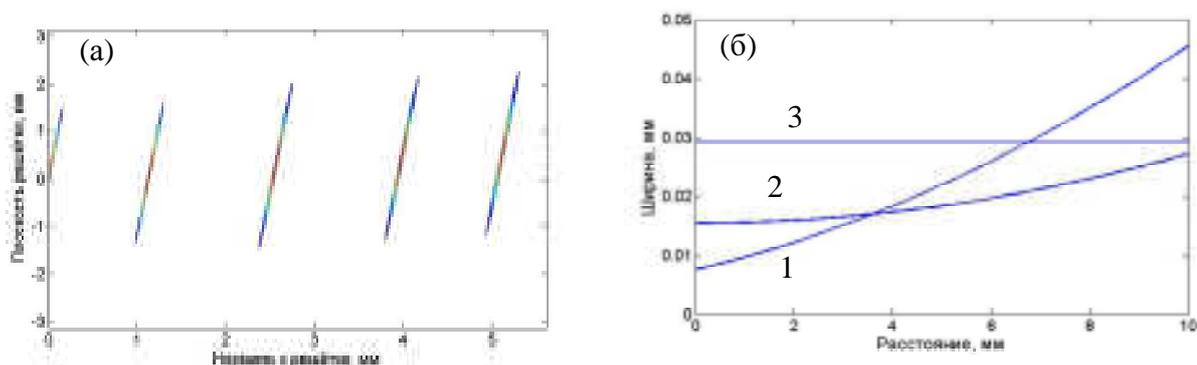


Рисунок 4.4 – Моментальные снимки для  $\tau = 100$  фс и (б) зависимость ширины импульса от расстояния для  $\tau = 50$  фс, 100 фс и 200 фс (кривые 1, 2, 3 соответственно) при распространении в кристалле  $\text{GaAs}$ .

На рис. 4.3(а) и 4.4(б) показана зависимость ширины импульса (на уровне 0.5 в направлении нормали к фронту интенсивности) от пройденного импульсом расстояния в кристалле. Кривые 1, 2 и 3 на графиках соответствуют длительности падающего импульса 50, 100 и 200 фс. Из рисунков видно, что импульс в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  расплывается значительно сильнее, чем в  $\text{GaAs}$ . Введём длину дисперсионного расплывания как расстояние, на котором ширина импульса увеличивается в два раза по сравнению с начальной шириной импульса после решётки. Для длительности падающего импульса 50 фс длина дисперсионного

расплывания составляет 150 мкм в  $\text{LiNbO}_3$  и 3 мм в GaAs. Малое значение длины дисперсионного расплывания в  $\text{LiNbO}_3$  связано с сильной угловой дисперсией. Использование импульсов большей длительности приводит к увеличению длины дисперсионного расплывания. Однако при этом пропадают высокочастотные составляющие спектра, участвующие в нелинейном преобразовании (терагерцовой генерации), и эффективность нелинейного преобразования уменьшается. Для обеспечения эффективной терагерцовой генерации необходимо выбирать такую длительность падающего импульса, при которой длина дисперсионного расплывания равна оптимальной для терагерцовой генерации длине кристалла [7]. Для кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и GaAs такая оптимальная длительность импульса составляет 200 фс и 100 фс соответственно (кривые 3 и 2 на рис. 4.3(b) и 4.4(b) соответственно).

На рисунке 4.5 и 4.6 показаны графики эффективности оптико-терагерцовой конверсии в зависимости от длины кристалла и угла наклона фронта интенсивности для двух моделей, когда лазерный импульс сохраняет свою форму при распространении в кристалле и с учетом расплывания лазерного излучения из-за угловой дисперсии, соответственно. Как видно из сравнения рисунков, для  $\text{LiNbO}_3$  и GaAs при комнатной температуре использование более точной модели расплывания накачки дает двукратное уменьшение эффективности, когда как для охлажденного  $\text{LiNbO}_3$  эффективность уменьшается в 4 раза. Из обеих моделей следует, что охлаждение кристалла  $\text{LiNbO}_3$  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  $\text{LiNbO}_3$ , однако возможности управления частотой генерируемого терагерцового излучения путем изменения угла наклона фронта интенсивности лазерного импульса в GaAs существенно шире.

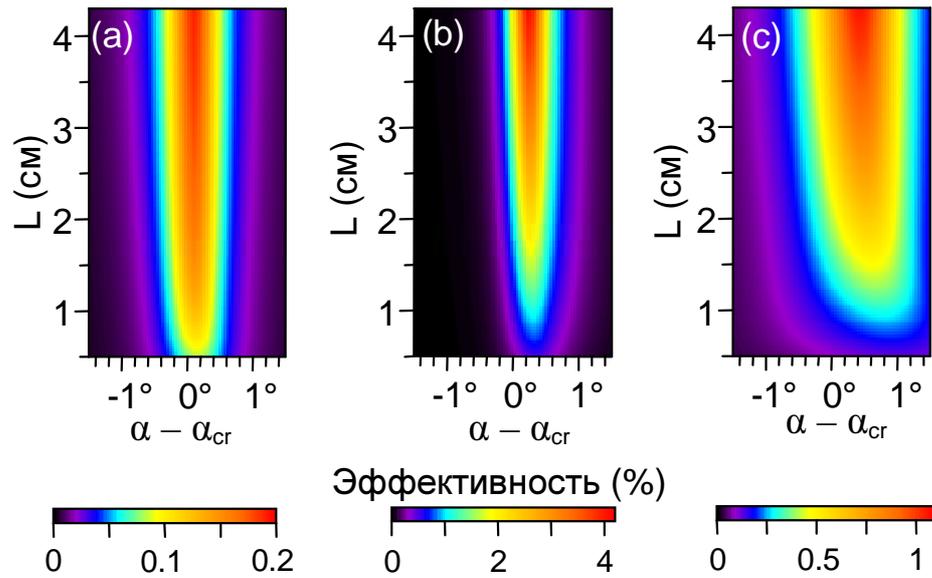


Рисунок 4.5 – Эффективность оптико-терагерцовой конверсии в зависимости от ( $\alpha - \alpha_{cr}$ ) и длины кристалла  $L$  для (а) ниобата-лития при комнатной температуре, (б) ниобата-лития при температуре 10К, (в) арсенида галлия при комнатной температуре. Параметры лазерного излучения: поперечный размер 4 мм, длительность 200 фс, пиковая интенсивность 1 ГВт/см<sup>2</sup>.

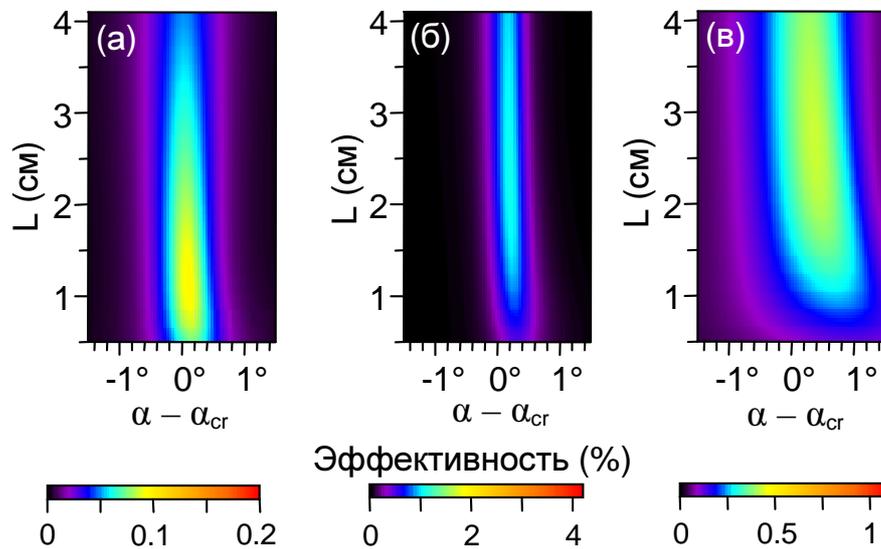


Рисунок 4.6 – Тоже, что и на рисунке 4.5, но при учете расплывания лазерного импульса.

Для экспериментальной демонстрации генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности предлагается использовать схему, приведенную на рисунке 4.7. В качестве лазерной накачки планируется использовать Ti:sapphire лазерную установку, позволяющую генерировать лазерные импульсы длительностью 70 фс, энергией 1-50 мДж с частотой повторения 10 Гц. Лазерное излучение через линию задержки направляется на дифракционную решетку под заранее рассчитанным углом. После отражения от дифракционной решетки лазерный импульс приобретает скос фронта интенсивности. Такой скошенный импульс переносится в кристалл LiNbO<sub>3</sub> с помощью линзы (или системы линз). Угол падения на дифракционную решетку, положение линзы и фокусное расстояние линзы подбираются таким образом, чтобы угол скоса фронта интенсивности лазерного импульса в кристалле был близок к  $\alpha_{cr}$ . Сгенерированное в LiNbO<sub>3</sub> терагерцовое излучение детектируется двумя способами: терагерцовое поле измеряется методом электрооптического стробирования с применением в качестве детектора кристалла ZnTe или GaP, энергия терагерцового поля измеряется болометром, а также с помощью ячейки Голя или пиродетектора. Для обеспечения измерения терагерцового поля часть оптического излучения отводится от основного пучка перед линзой задержки.

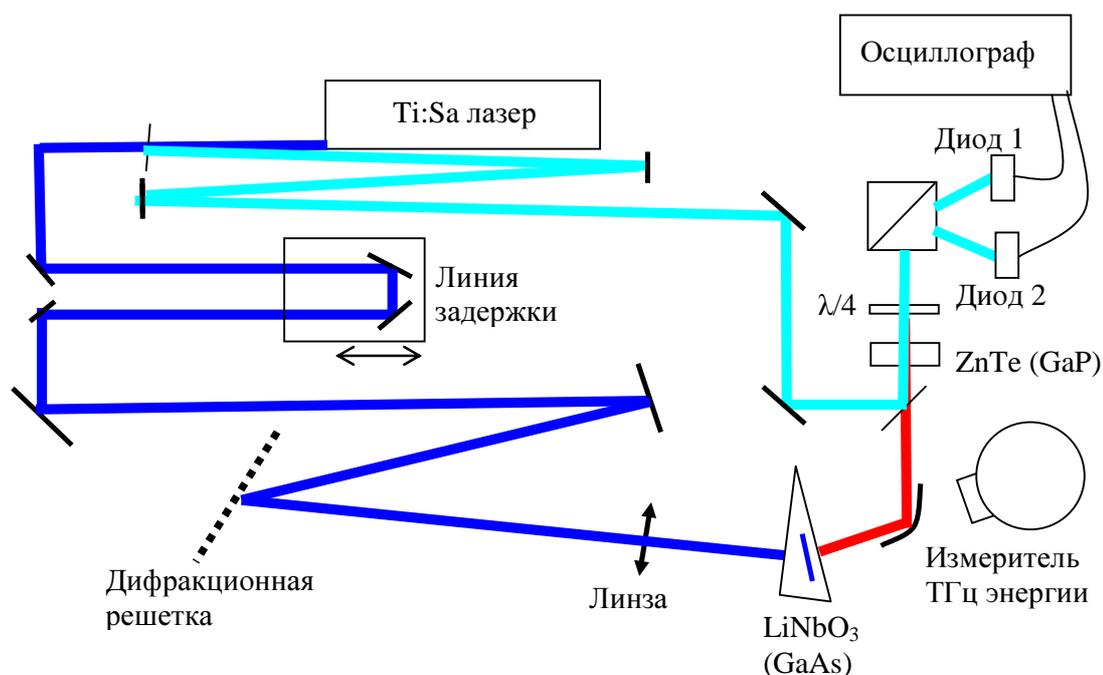


Рисунок 4.7 – Экспериментальная схема генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности.

Как было показано выше, для генерации терагерцового излучения лучше использовать лазерные импульсы с длительностью 200-300 фс, однако лазер генерирует импульсы длительностью 70 фс. Поэтому необходимо увеличивать длительность лазерного импульса путем введения частотной модуляции в импульсе, что может быть выполнено путем расстройки системы стретчер-компрессор лазера, а также путем введения в лазерный пучок оптических стекол с узкой спектральной полосой пропускания. При настройке экспериментальной схемы необходимо выравнять оптические пути основного и пробного лучей. Поскольку эффективность генерации сильно зависит от угла скоса лазерного импульса необходимо проводить точную настройку положения дифракционной решетки по углу и координате, а также линзы и кристалла  $\text{LiNbO}_3$  (GaAs).

## 2 Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Разработана оптимальная конструкция и технология изготовления экспериментального образца высокоэффективного источника широкополосного терагерцового излучения на основе сэндвич-структуры с сердцевиной из ниобата лития. Конструкция состоит из тонкой (толщиной 30 мкм) пластины стехиометрического ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) легированного около 1% моль  $\text{MgO}$ , приклеенной к основанию призмы из высокоомного кремния. Технология изготовления сэндвич-структуры устанавливает определенную последовательность полировки и шлифовки граней пластины ниобата лития, а требования к прозрачности в терагерцовом диапазоне клея для склеивания пластины с кремниевой призмой.

Изготовлен экспериментальный образец сэндвич-структуры. Разработана оптическая методика проверки качества сэндвич-структур. Проведенная с помощью данной методики проверка изготовленной структуры показало ее хорошее качество.

Разработан экспериментальный образец микроструктурированной (гребенчатой) металлической поверхности для прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов фемтосекундными лазерными импульсами. Параметры гребенчатой структуры (период, высота и ширина гребней) близки к оптимальным теоретическим и, в то же время, являются технологически реализуемыми на доступном оборудовании.

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 имеет период 300 мкм и состоит из прямоугольных бороздок глубиной 30 и 50 мкм с отношением ширины бороздки к периоду структуры 0,5. Для целей оптико-терагерцовой конверсии к боковой грани микроструктурированного образца прикреплен кристалл ниобата лития кристаллографической ориентации  $\langle 001 \rangle$  с полированным (для облучения лазером) верхним торцом, выступающим на  $\sim 0,2$  мм над микроструктурированной поверхностью.

Проведена модернизация испытательного стенда для терагерцовых исследований (терагерцового спектрометра), направленная на создание условий для экспериментов по генерации и детектированию терагерцовых поверхностных

плазмонов. В ходе модернизации в оптическую схему установки 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.

Разработана методика экспериментальных исследований по генерации широкополосного терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности. Изучены возможности формирования 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  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{GaAs}$  в результате действия факторов угловой дисперсии (зависимости угла дифракции от частоты) и материальной дисперсии кристалла. Показано, что в  $\text{LiNbO}_3$  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  $\text{GaAs}$ , где требуются меньшие углы скоса (около 13 градусов при накачке на длине волны 1,8 мкм), доминирующим механизмом расплывания лазерного импульса является материальная дисперсия. Выяснено, что для эффективной терагерцовой генерации в  $\text{LiNbO}_3$  импульсами титан-сапфирового лазера (длина волны 0.8 мкм) оптимальная длительность импульса составляет 200 фс, а при накачке  $\text{GaAs}$  на длине волны 1.8 мкм – 100 фс.

Показано, что охлаждение кристалла  $\text{LiNbO}_3$  с комнатной температуры до 10 К на порядок повышает эффективность оптико-терагерцового преобразования. Эффективность преобразования в кристалле  $\text{GaAs}$  при комнатной температуре примерно вдвое меньше, чем в охлажденном  $\text{LiNbO}_3$ , однако возможности управления частотой генерируемого терагерцового излучения путем изменения угла наклона фронта интенсивности лазерного импульса в  $\text{GaAs}$  существенно шире.

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

### **3 Публикации результатов НИР**

По результатам выполнения задач 3 этапа опубликовано 4 статьи в иностранных журналах, сделано 19 докладов на международных, всероссийских и региональных конференциях и семинарах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные на 3 этап задачи выполнены полностью. Разработан и изготовлен экспериментальный образец сэндвич-структуры с сердцевиной из ниобата лития. Разработан и изготовлен экспериментальный образец микроструктурированной металлической поверхности с полоской электрооптического материала. Модернизирован испытательный стенд для терагерцовых исследований. Разработана методика экспериментальных исследований по генерации терагерцового излучения в электрооптических кристаллах лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности. Разработанные методы будут использованы и при выполнении последующих этапов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Bodrov, S.B.** 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 // J. Appl. Phys. – 2008. – V. 104. – P. 093105-1–093105-11.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Bakunov, M.I.** Terahertz emission from a laser pulse with tilted front: Phase-matching versus Cherenkov effect / M.I. Bakunov, S.B. Bodrov, M.V. Tsarev // J. Appl. Phys. – 2008. – V. 104. – P. 073105-1–073105-13.
- 5 Martinez, O.E.** Pulse distortions in tilted pulse schemes for ultrashort pulses / Martinez O.E. // Optics Communications. – 1986. – V. 59. – P. 229–232.
- 6 Martinez, O.E.** Grating and prism compressors in the case of finite beam size / Martinez O.E. // J. Opt. Soc. Am. B. – 1986. – V. 3. – P. 929–934.
- 7 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 // JOSA B. – 2011. – Vol. 28. – P. 1724–1734.