

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Н.И.ЛОБАЧЕВСКОГО  
(ННГУ)

УДК 535

№ госрегистрации 01201057461

Инв.№ 1.1.2.0563.5

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

\_\_\_\_\_ С.Н.Гурбатов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры  
инновационной России» на 2009-2013 годы

по теме:

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В НЕОСВОЕННЫХ  
ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНАХ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

в рамках пятого этапа государственного контракта  
№ 02.740.11.0563 от 22 марта 2010 г.

Наименование этапа: «Сопоставление результатов экспериментов с расчетами,  
корректировка образцов, макетов и установок»

Руководитель НИР, зав. каф. общей физики  
ННГУ, д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

М.И.Бакунов

подпись, дата

Нижний Новгород 2012

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, зав. каф. общей физики ННГУ, д.ф.-м.н., профессор	_____ подпись, дата	М.И.Бакунов (введение, заключение)
Исполнители темы Зав. каф. квантовой радиофизики ННГУ, д.ф.-м.н., член-корр. РАН	_____ подпись, дата	Андронов А.А. (введение, разделы 1-3)
Профессор каф. квантовой радиофизики ННГУ, директор Отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, д.ф.-м.н., член-корр. РАН	_____ подпись, дата	Сергеев А.М. (введение, разделы 1, 2)
Профессор каф. электродинамики ННГУ, д.ф.-м.н., профессор	_____ подпись, дата	Гильденбург В.Б. (разделы 1, 2)
Ведущий научный сотрудник ННГУ, зав. лаб. ИПФ РАН, д.ф.-м.н.	_____ подпись, дата	Степанов А.Н. (разделы 1, 2)
Профессор каф. общей физики, д.ф.-м.н.	_____ подпись, дата	Грибова Е.З. (разделы 1, 2)
Доцент каф. общей физики ННГУ, к.ф.-м.н., доцент	_____ подпись, дата	Жуков С.Н. (разделы 1, 2)
Доцент каф. общей физики ННГУ, к.ф.-м.н., доцент	_____ подпись, дата	Захаров Ю.Н. (разделы 2, 3)
Ведущий научный сотрудник ННГУ, ведущий научный сотрудник ИПФ РАН, к.ф.-м.н.	_____ подпись, дата	Рябкин М.Ю. (разделы 1, 2)
Старший научный сотрудник ННГУ, старший научный сотрудник ИПФ РАН, к.ф.-м.н.	_____ подпись, дата	Корытин А.И. (разделы 2, 3)
Младший научный сотрудник ННГУ, младший научный сотрудник ИПФ РАН, к.ф.-м.н.	_____ подпись, дата	Емелин М.Ю. (разделы 1, 2)
Научный сотрудник ННГУ, научный сотрудник ИПФ РАН, к.ф.-м.н.	_____ подпись, дата	Быстров А.М. (разделы 1, 2)
Доцент каф. квантовой радиофизики ННГУ, к.ф.-м.н., доцент	_____ подпись, дата	Маругин А.В. (разделы 1-3)
Доцент каф. квантовой радиофизики ННГУ, к.ф.-м.н., доцент	_____ подпись, дата	Савикин А.П. (разделы 1-3)
Старший преподаватель каф. квантовой радиофизики ННГУ, к.ф.-м.н.	_____ подпись, дата	Шарков В.В. (разделы 1-3)

Старший преподаватель каф. общей физики ННГУ, к.ф.-м.н.	_____	Лонин А.Л. (раздел 1)
	подпись, дата	
Доцент каф. общей физики ННГУ, к.ф.-м.н.	_____	Бодров С.Б. (разделы 1-3)
	подпись, дата	
Доцент каф. электродинамики ННГУ, с.н.с. ИПФ РАН, к.ф.-м.н.	_____	Введенский Н. В. (раздел 1)
	подпись, дата	
Зав. лаб. каф. электроники, к.т.н.	_____	Павельев Д. Г. (раздел 3)
	подпись, дата	
Старший преподаватель каф. общей физики ННГУ, к.ф.-м.н.	_____	Царев М.В. (разделы 1-3)
	подпись, дата	
Младший научный сотрудник ННГУ, младший научный сотрудник ИПФ РАН, к.ф.-м.н.	_____	Коржиманов А. В. (разделы 1, 2)
	подпись, дата	
Младший научный сотрудник ННГУ, к.ф.-м.н.	_____	Бакунов Г.М. (разделы 1, 2)
	подпись, дата	
Ведущий инженер каф. электроники ННГУ	_____	Кошуринов Ю.И. (раздел 3)
	подпись, дата	
Ассистент каф. общей физики ННГУ	_____	Новоковская А.Л. (разделы 1, 2)
	подпись, дата	
Ведущий инженер	_____	Иванова С.В. (раздел 3)
	подпись, дата	
Инженер 1 категории	_____	Астафьева М.В. (раздел 3)
	подпись, дата	
Электроник каф. квантовой радиофизики, к.ф.-м.н.	_____	Еремейкин О.Н. (разделы 1-3)
	подпись, дата	
Электроник каф. общей физики ННГУ	_____	Лаврентьев С.А. (раздел 3)
	подпись, дата	
Аспирант ННГУ	_____	Михайловский Р.В. (раздел 2)
	подпись, дата	
Аспирант ННГУ	_____	Машкович Е.А. (раздел 2)
	подпись, дата	
Аспирант ННГУ	_____	Святошенко Д.Е. (разделы 1-3)
	подпись, дата	
Аспирант ННГУ	_____	Павленко К.Ю. (разделы 1-3)
	подпись, дата	

Аспирант ННГУ	_____	Скрыль А.С. (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант ННГУ	_____	Семиков С.А. (раздел 2)
	подпись, дата	
Аспирант ННГУ	_____	Егоров А.С. (разделы 1-3)
	подпись, дата	
Студент ННГУ	_____	Горохов А.К. (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент ННГУ	_____	Володин А.А. (раздел 2)
	подпись, дата	
Студент ННГУ	_____	Мальшев Н.К. (раздел 3)
	подпись, дата	
Студент ННГУ	_____	Вахитов Д.Н. (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент ННГУ	_____	Горелов С.Д. (раздел 2)
	подпись, дата	
Зав. лаб. каф. квантовой радиофизики ННГУ	_____	Нургалеев И.Ф. (разделы 1-3)
	подпись, дата	
Нормоконтролер Зав. лаб. каф. общей физики ННГУ	_____	Краснов В.А. (разделы 1 - 3)
	подпись, дата	

## РЕФЕРАТ

Отчет 53 с., 1 ч., 27 рис., 0 табл., 4 источн., 0 прил.

### ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ИК-ИЗЛУЧЕНИЕ, РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, УЛЬТРАКОРОТКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИМПУЛЬСЫ, НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОЛН

В отчете представлены результаты исследований по 5 этапу Государственного контракта № 02.740.11.0563 от 22 марта 2010 г. по теме: «Генерация электромагнитных излучений в неосвоенных частотных диапазонах на основе нелинейно-оптических преобразований» в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области оптики, лазерной физики и лазерных технологий» шифр «2010-1.1-122-012».

Цель работы – разработка новых высокоэффективных методов генерации терагерцового, среднего ИК, ВУФ и мягкого рентгеновского излучений 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 указанных излучений.

Компьютерное моделирование, теоретический анализ, изготовление образцов, проведение испытаний.

Отчет о НИР, в том числе: сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования, корректировка разработанной документации по результатам исследований и испытаний, изготовление и испытание образцов, макетов и установок, изготовленных по скорректированной документации

Научные результаты: сопоставлены теоретические расчеты и экспериментальные результаты при генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре, при прямом нелинейно-оптическом возбуждении терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами, при исследовании генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности, при испытаниях экспериментальной установки по когерентной генерации мягкого рентгеновского излучения при накачке многозарядных ионов инертных газов оптическим излучением фемтосекундного лазера тераваттного уровня мощности, при исследованиях

экспериментальных образцов гетероструктур на основе соединений InGaP–GaAs и InGaAlAs–GaAs для нелинейного преобразования частоты в полупроводниковых гетеролазерах с вертикальным резонатором и оптической накачкой диодными и твердотельными лазерами, проведена корректировка разработанной документации по результатам исследований и испытаний в целях повышения эффективности генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре с металлической подложкой путем использования фемтосекундного лазерного излучения инфракрасного диапазона, в целях визуализации пучка терагерцового излучения при генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности, при реализации метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами, при повышении эффективности работы лабораторной установки для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона, изготовлены и испытаны по скорректированной документации установка генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре фемтосекундными лазерными импульсами инфракрасного диапазона, экспериментальный образец для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами, лабораторная установка для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	10
1 Сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования	12
1.1 Сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных результатов при исследовании генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре	12
1.2 Сопоставление результатов для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами	18
1.3 Сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных результатов при исследовании генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности	20
1.4 Сопоставление результатов для экспериментальной установки по когерентной генерации мягкого рентгеновского излучения при накачке многозарядных ионов инертных газов оптическим излучением фемтосекундного лазера тераваттного уровня мощности	22
1.5 Сопоставление результатов исследований экспериментальных образцов гетероструктур на основе соединений InGaP–GaAs и InGaAlAs–GaAs для нелинейного преобразования частоты в полупроводниковых гетеролазерах с вертикальным резонатором и оптической накачкой диодными и твердотельными лазерами	25
2 Корректировка разработанной документации по результатам исследований и испытаний	36
2.1 Повышение эффективности генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре с металлической подложкой путем использования фемтосекундного лазерного излучения инфракрасного диапазона	36
2.2 Визуализация пучка терагерцового излучения при генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности	38
2.3 Корректировка разработанной документации для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами	40
2.4 Корректировка разработанной документации для лабораторной установки для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона	41
3 Изготовление и испытание образцов, макетов и установок, изготовленных по скорректированной документации	43
3.1 Испытание установки генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре фемтосекундными лазерными импульсами инфракрасного диапазона	43
3.2 Изготовление и испытание экспериментального образца по скорректированной документации для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами	46
3.3 Изготовление и испытание лабораторной установки для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона	47

Заключение	50
Список использованных источников	53

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете применяются следующие обозначения и сокращения:

ННГУ – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

НИР – научно исследовательская работа

ИК – инфракрасный

ТГц - терагерцовый

ВУФ – вакуумный ультрафиолет

LN – ниобат лития,  $\text{LiNbO}_3$

ПГС – параметрический генератор света

ФРЭЭ – функция распределения электронов по энергии

## ВВЕДЕНИЕ

В отчете представлены результаты исследований по 5 этапу Государственного контракта № 02.740.11.0563 от 22 марта 2010 г. по теме: «Генерация электромагнитных излучений в неосвоенных частотных диапазонах на основе нелинейно-оптических преобразований» в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области оптики, лазерной физики и лазерных технологий» шифр «2010-1.1-122-012».

По 5 этапу были запланированы следующие работы.

1. Сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования
2. Корректировка разработанной документации по результатам исследований и испытаний
3. Изготовление и испытание образцов, макетов и установок, изготовленных по скорректированной документации

Выполнение работ было направлено на достижение целей проекта - разработки новых высокоэффективных методов генерации терагерцового, среднего ИК, ВУФ и мягкого рентгеновского излучений 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 указанных излучений.

В результате выполнения работ достигнуты следующие научные результаты. Сопоставлены теоретические расчеты и экспериментальные результаты:

- при генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре,
- при прямом нелинейно-оптическом возбуждении терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами,

- при исследовании генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности,

- при испытаниях экспериментальной установки по когерентной генерации мягкого рентгеновского излучения при накачке многозарядных ионов инертных газов оптическим излучением фемтосекундного лазера тераваттного уровня мощности,

- при исследованиях экспериментальных образцов гетероструктур на основе соединений InGaP–GaAs и InGaAlAs-GaAs для нелинейного преобразования частоты в полупроводниковых гетеролазерах с вертикальным резонатором и оптической накачкой диодными и твердотельными лазерами

Проведена корректировка разработанной документации по результатам исследований и испытаний:

- в целях повышения эффективности генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре с металлической подложкой путем использования фемтосекундного лазерного излучения инфракрасного диапазона,

- в целях визуализации пучка терагерцового излучения при генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности,

- при реализации метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами,

- при повышении эффективности работы лабораторной установки для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона.

Изготовлены и испытаны образцы, макеты и установки, изготовленные по скорректированной документации:

- установка генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре фемтосекундными лазерными импульсами инфракрасного диапазона

- экспериментальный образец для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами

- лабораторная установка для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона.

# **1 Сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования**

## **1.1 Сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных результатов при исследовании генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре**

В ходе выполнения четвертого этапа проекта были проведены экспериментальные исследования генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в сэндвич-структуре, состоящей из кремниевой призмы, 30 мкм слоя ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) и металлической подложки, расположенной на некотором расстоянии от слоя  $\text{LiNbO}_3$ . Теоретические расчеты генерации ТГц излучения в такой сэндвич-структуре были проведены ранее на первом этапе проекта (см. также [1]). Ниже приведено сопоставление теоретических расчетов и экспериментальных данных.

На рисунке 1.1.1 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 1.1.1(а) при экспериментальных измерениях можно объяснить их подавлением при детектировании в кристалле  $\text{ZnTe}$  вследствие поглощения. Отметим, что провалы в теоретическом и экспериментальном спектрах на рисунке 1.1.1(а) при частоте 1.4 ТГц полностью совпадают. На рисунке 1.1.1(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 1.1.1 (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.

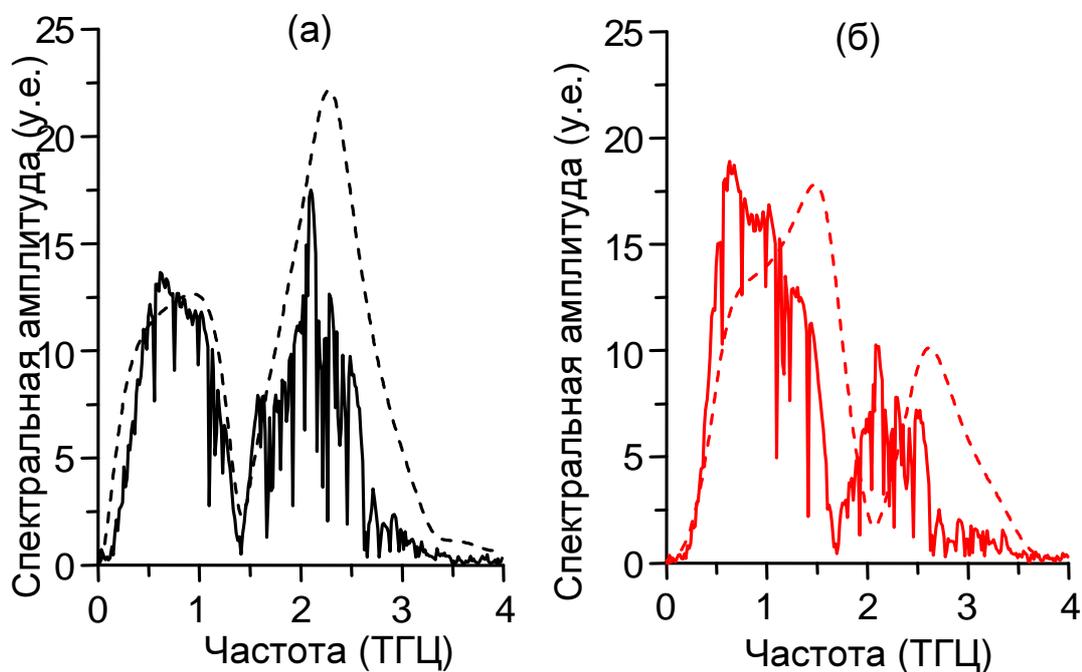


Рисунок 1.1.1 – Экспериментальные (сплошные кривые) и теоретические (пунктирные кривые) спектры терагерцового импульса, генерируемого в сэндвич-структуре когда металлическая подложка (а) удалена на значительное расстояние от  $\text{LiNbO}_3$  и (б) приближена вплотную к  $\text{LiNbO}_3$ .

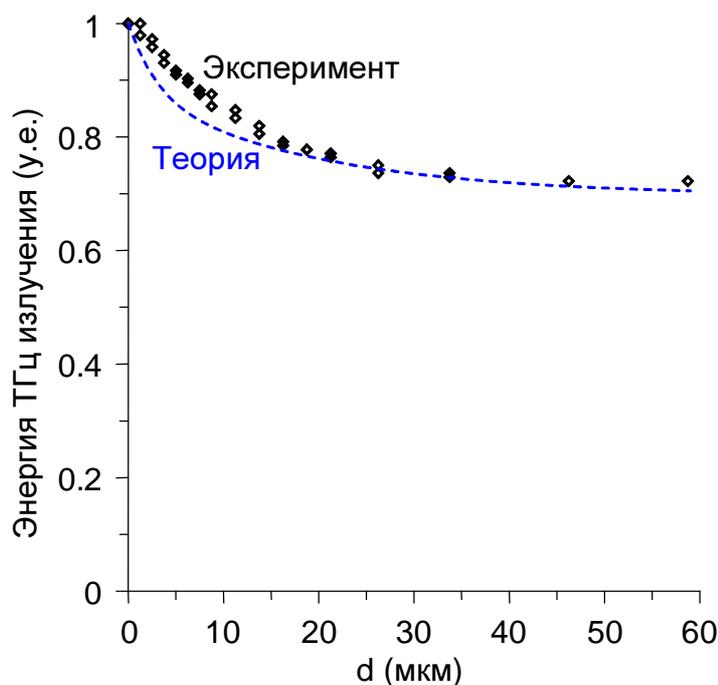


Рисунок 1.1.2 – Зависимость энергии терагерцового излучения от толщины воздушного зазора  $d$ . Ромбики – эксперимент. Пунктирная кривая – теоретический расчет. Длительность лазерного импульса 50 фс.

На рисунке 1.1.2 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  $\text{LiNbO}_3$  в эксперименте.

Эффективность оптико-терагерцовой конверсии в зависимости от энергии лазерного излучения показана на рисунке 1.1.3. 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, 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.

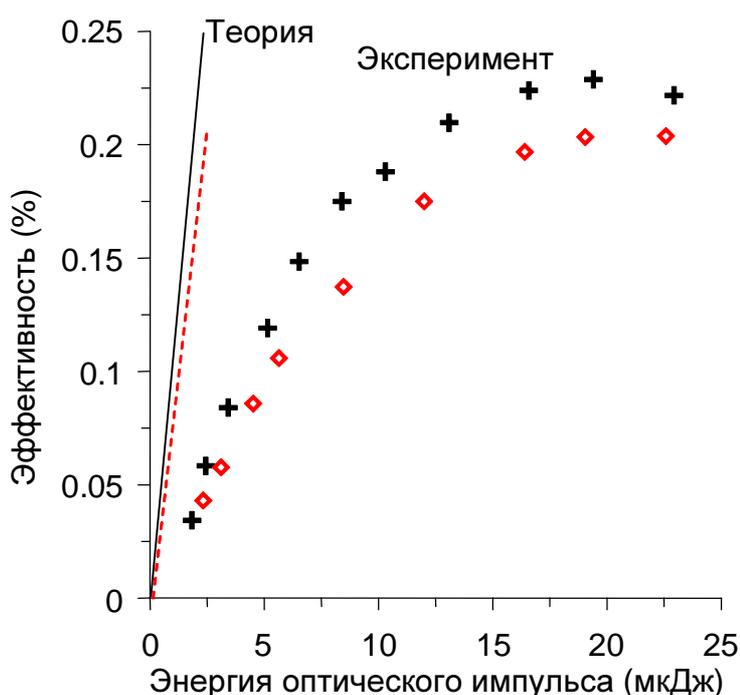


Рисунок 1.1.3 – Зависимость эффективности опико-терагерцовой конверсии от энергии лазерной накачки для металлической и воздушной подложки. Длительность лазерного импульса 50 фс.

В эксперименте были проведены исследования влияния длительности и частотной модуляции лазерного импульса (чирпа) на эффективность опико-терагерцовой конверсии. На рисунке 1.1.4 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 оптико-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.

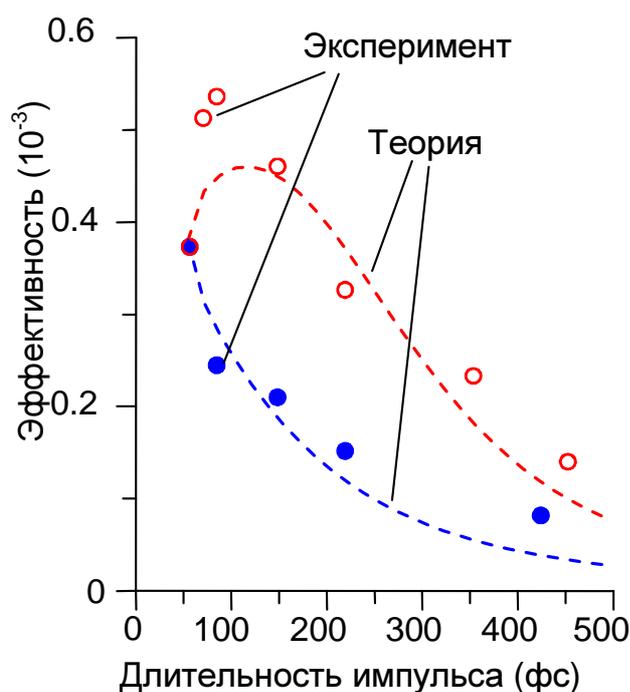


Рисунок 1.1.4 – Зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от длительности лазерного импульса при нормальном (кружочки) и обратном (ромбики) чирпе. Пунктирные кривые – теоретический расчет.

Для учета материальной дисперсии воспользуемся ранее развитой теорией генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре [2]. Из теории следует, что энергия

терагерцового излучения, генерируемая с единицы длины структуры определяется формулой

$$W_i \sim \frac{1}{(\tau^2 + (a\delta / 2.4c)^2)^{3/2}}, \quad (1.1)$$

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

$$W = \int_0^L \frac{const}{(\tau(z)^2 + (a\delta / 4c)^2)^{3/2}} dz \quad (1.2)$$

где

$$\tau(z) = \tau_0 \sqrt{(1 - \alpha_0 k_2 z)^2 + \left(\frac{k_2 z}{\tau_0}\right)^2}, \quad (1.3)$$

$const$  – некоторая нормировочная константа,  $k_2$  – дисперсионный коэффициент ниобата лития для лазерного излучения накачки,  $\tau_0$  – длительность лазерного импульса на входе в кристалл,  $\alpha_0$  – частотная модуляция определяемая формулой:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\tau_0^2} \sqrt{\left(\frac{\tau_0^2}{\tau_m^2}\right)^2 - 1}, \quad (1.4)$$

где  $\tau_m$  – длительность спектрально ограниченного импульса (минимальная длительность). Результаты расчета интеграла 1.2 показаны на рисунке 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.

## **1.2 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 [3]. 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 [4].

### 1.3 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  $\text{LiNbO}_3$  были проведены измерения энергии и спектра генерируемого ТГц излучения. На рисунке 1.3.1 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 1.3.1(б) при различных длинах кристалла ( $L$ ) и длительности лазерного импульса ( $\tau$ ) 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  $\text{LiNbO}_3$  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).

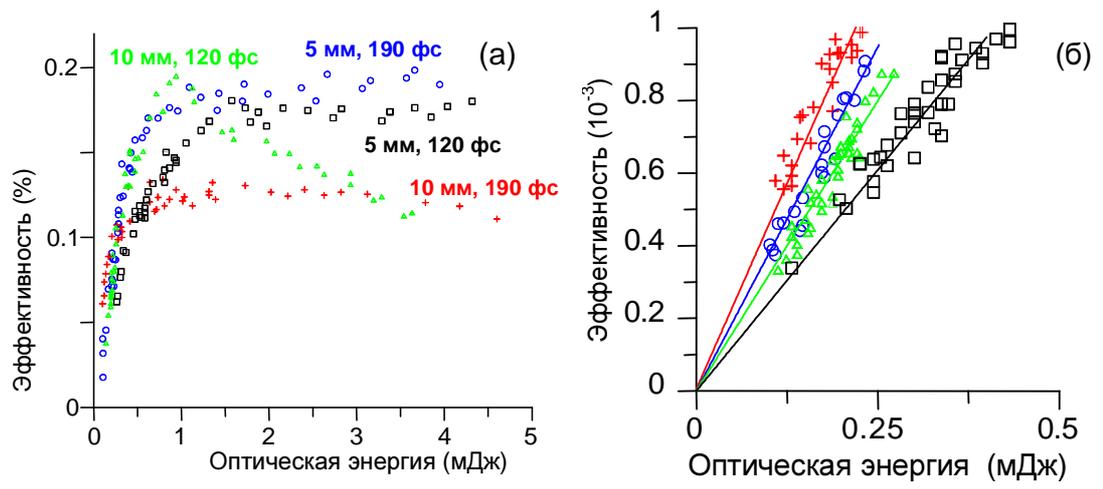


Рисунок 1.3.1 – Эффективность генерации в зависимости от энергии лазерного излучения

#### **1.4 Сопоставление результатов для экспериментальной установки по когерентной генерации мягкого рентгеновского излучения при накачке многозарядных ионов инертных газов оптическим излучением фемтосекундного лазера тераваттного уровня мощности**

В экспериментальной установке с накачкой многозарядных ионов ксенона ожидалось получить рентгеновское излучение на длине волны лазерного перехода восьмизарядных ионов ксенона (40.8 нм). На рисунке 1.4.1 показан спектр рентгеновского излучения, полученного при различных энергиях лазерного импульса накачки. Спектральная линия на длине волны 15.7 нм была идентифицирована как линия кислорода. Линии из континуума от 3 до 15 нм идентифицируются как линии твердотельной плазмы. Полученное спектральное распределение связано с излучением плазмы, возникающей при абляции входного отверстия капилляра при попадании интенсивного лазерного импульса, а также наносекундного предимпульса, на край капилляра из-за случайного ухода точки фокусировки лазерного пучка. Данное предположение согласуется с пространственным распределением рентгеновского излучения, имеющим в некоторых выстрелах неправильную форму (рисунок 1.4.2). Когерентное излучение в окрестности лазерной линии 40.8 нм зарегистрировано не было, т.к. возникающая на входном отверстии капилляра плазма приводит к отражению и рассеянию лазерного излучения, препятствуя созданию активной среды. Таким образом, потребовалась доработка созданного источника рентгеновского излучения для получения когерентного излучения. Такая доработка должна быть направлена на увеличение стабильности лазерного пучка. Контроль прохождения лазерного излучения через капилляр является надежным критерием отсутствия формирования плазмы на входном отверстии капилляра.

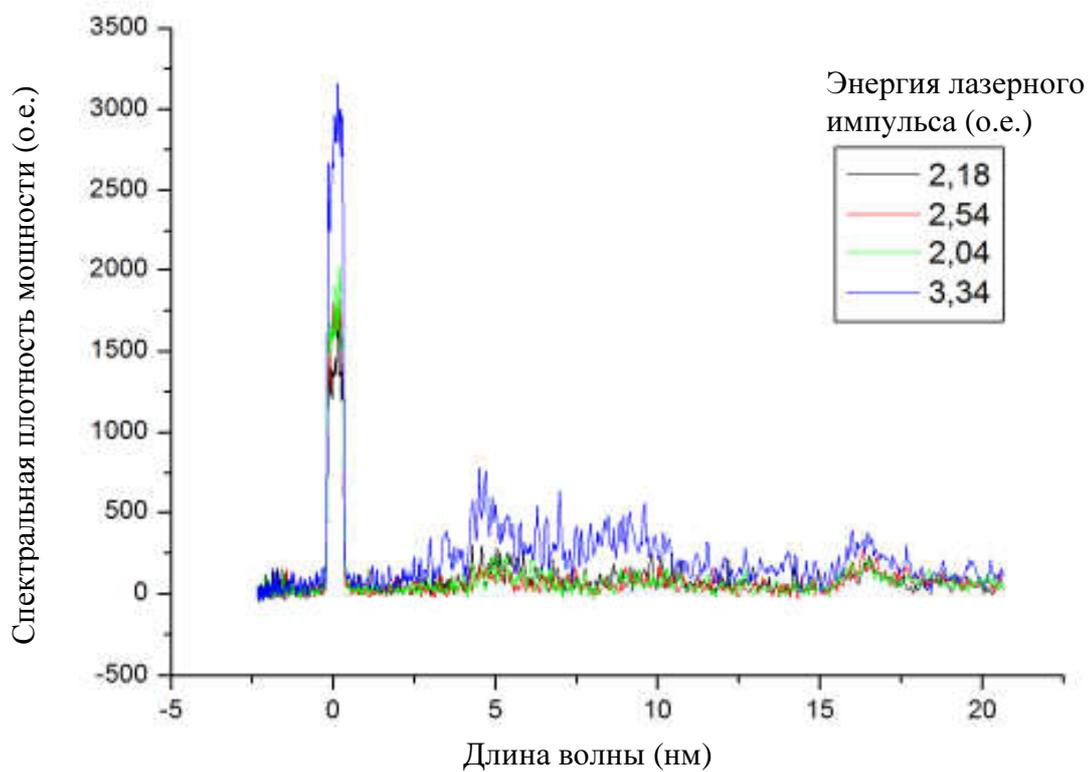


Рисунок 1.4.1 – Спектр рентгеновского излучения.

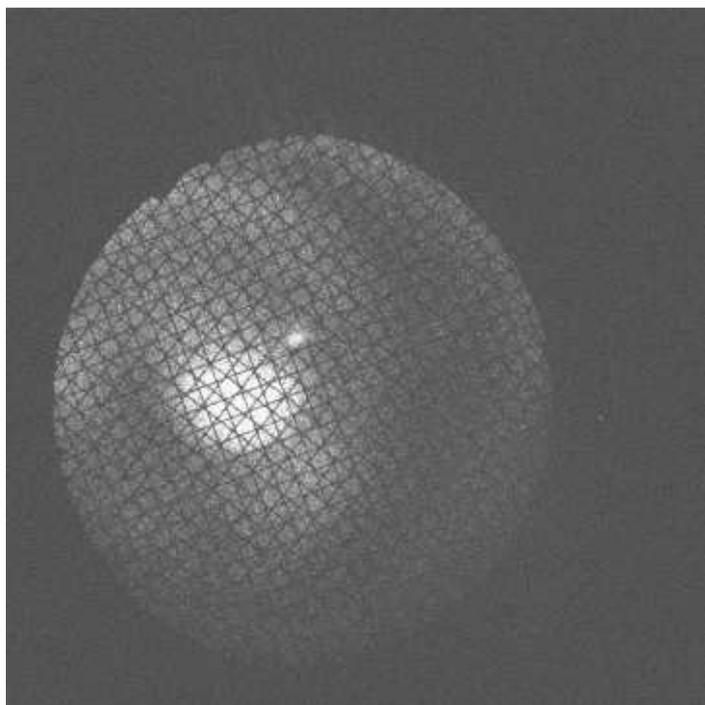


Рисунок 1.4.2 – Характерный вид рентгеновского пучка при наличии рассеяния на входе капилляра.



Из исходной пластины выкалывались образцы с различными длинами резонатора, формируя таким образом резонатор Фабри-Перо без поперечного оптического ограничения. Используя известные значения для коэффициентов отражения выходных зеркал резонатора, которыми являются естественные сколы полупроводник-воздух, можно произвести оценку достижимого уровня оптического усиления, создаваемого в исследуемой структуре при заданном уровне накачки.

Для образцов с длинами резонатора  $L$  меньше 0,8 мм генерации получено не было, что дает основания сделать вывод о значении максимального модального усиления  $g_{mod}$  в структуре в соответствии с выражением:

$$g_{mod} = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \approx 15 \text{ см}^{-1} = \Gamma_l g_{mat} - \alpha_{int},$$

где  $R \approx 0,31$  – коэффициент отражения границы полупроводник-воздух;  $\Gamma_l$  – коэффициент оптического ограничения в продольном направлении,  $g_{mat}$  – значение материального усиления и  $\alpha_{int} \approx 10 \text{ см}^{-1}$  – внутренние потери.

Значение материального усиления определяется в первую очередь уровнем накачки. Это позволяет произвести пересчёт усиления из значения в продольном направлении в вертикальное и получить оценку для возможного значения усиления (сверх потерь в резонаторе, связанных с внутренним поглощением) на уровне 0,7-0,9%. Таким для достижения структурой генерации в вертикальном направлении потери, связанные с пропусканием зеркал, а также потери на дифракционную расходимость должны составлять величину, меньшую полученного значения усиления. Теоретическое значение коэффициента отражения нижнего, полупроводникового, распределенного брегговского отражателя составляет величину 99,3-99,5% (для различных моделей законов дисперсии показателя преломления). Выходное внешнее зеркало должно иметь коэффициент отражения на уровне не более 99%, что делает выполнение условий генерации в данной структуре невозможной.

Принципиально важным в рассматриваемой конфигурации (с внешним резонатором) является дифракционный источник потерь, оценка которого для плоского выходного зеркала при предполагаемом диаметре пятна накачки 200 мкм даёт величину около нескольких единиц процентов. Влияние дифракционных

потерь может быть уменьшено посредством использования сферического входного зеркала, а также уменьшением длины резонатора. Последнее может быть достигнуто совмещением выходного зеркала с поверхностью структуры, например, путем напыления диэлектрического зеркала на имеющуюся структуру или в едином процессе роста новых полупроводниковых структур (рис. 1.5.2). Параметры внешнего зеркала необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить высокое значение коэффициента отражения на длине волны лазерного излучения  $\lambda_2 \approx 1000$  нм и одновременно достаточное пропускание на длине волны накачки  $\lambda_1 \approx 808$  нм. При этом, в случае полупроводникового верхнего (выходного) РБО необходимо подбирать состав материалов слоев зеркала, чтобы исключить материальное поглощение на длине волны накачки. Для этого вместо слоя  $GaAs$  следует растить  $Al_xGa_{1-x}As$  так, чтобы ширина запрещенной зоны  $Al_xGa_{1-x}As$  превышала энергию кванта накачки. В случае диэлектрического внешнего зеркала, в силу большей ширины спектральной области высокого значения коэффициента отражения (большее значение скачка показателя преломления на границе слоёв зеркала), а также коротковолнового сдвига спектра отражения при наклонном падении, расчёт максимума отражения зеркала необходимо проводить для больших значений брегговской длины волны зеркала, нежели предполагаемая длина волны генерации. Бреговская длина волны  $\lambda_0^*$  верхнего диэлектрического зеркала должна выбираться исходя из следующего соотношения:

$$\lambda_0^* - \lambda_1 > \frac{\Delta\lambda}{2} + \delta\lambda,$$

где  $\Delta\lambda = \frac{\pi\lambda_0^*}{2} \left( \frac{1}{\arccos(\rho)} - \frac{1}{\arccos(-\rho)} \right)$  – ширина спектра отражения;  $\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$ ;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления слоёв зеркала;  $\delta\lambda = \lambda_0^* (1 - 0.5(\cos\theta_1 + \cos\theta_2))$  – смещение спектра отражения вследствие наклонного падения,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – значения углов распространения волны в соответствующем слое зеркала, которые в свою очередь связаны с углом падения в соответствии с законом Снелля:  $n_0 \sin\theta_0 = n_i \sin\theta_i$ ,  $i=1,2$ ,  $\theta_0$  – угол падения в воздухе.

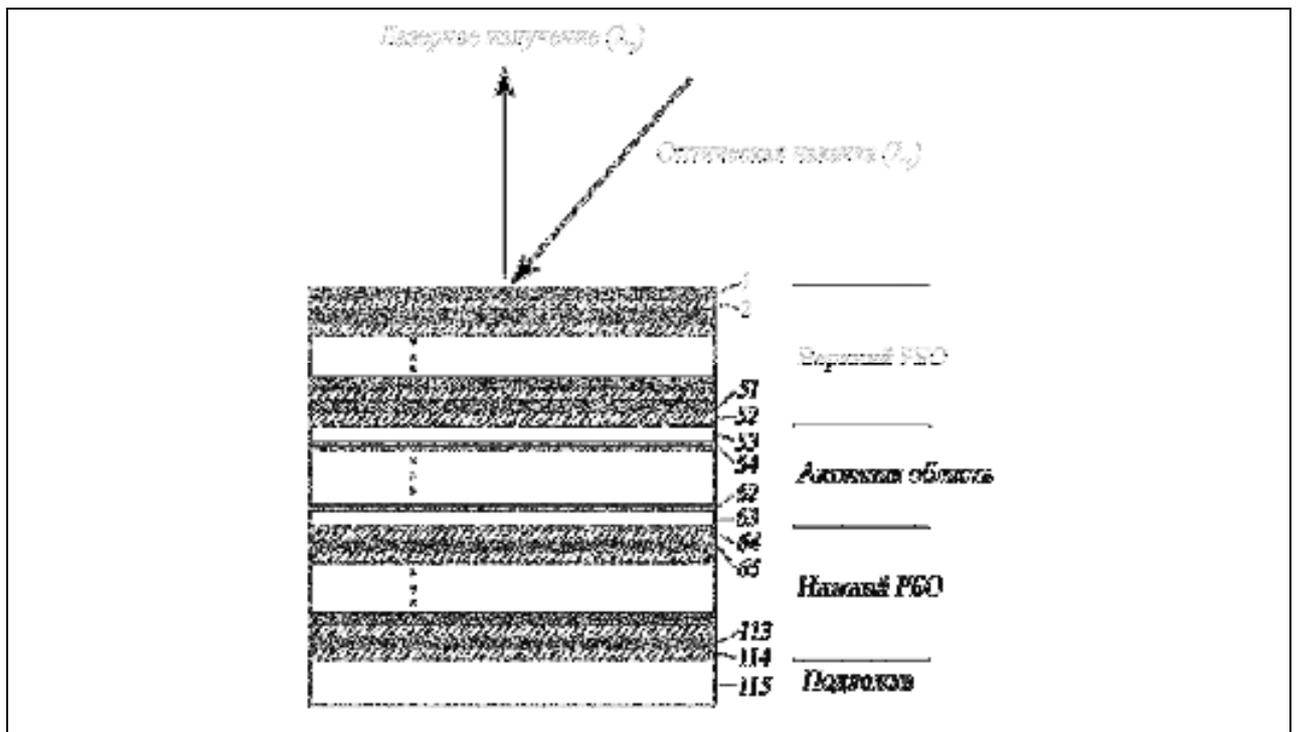


Рисунок 1.5.2. Схематическое изображение гетероструктуры для вертикально излучающего полупроводникового гетеролазера с оптической накачкой (в конфигурации с совмещенным зеркалом)

В результате серии вспомогательных калибровочных ростовых процессов и необходимых постростовых измерений, была выращена лазерная структура в соответствии с рис. 1.5.2, состоящая из двух полупроводниковых брэгговских зеркал, активной среды ( $5 \text{ In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$  квантовых ям), расположенных в пучностях поля микрорезонатора. Оптическая толщина микрорезонатора составила  $3\lambda_0$ . Нижнее зеркало состояло из 25,5  $\text{GaAs}/\text{AlAs}$  пар, а верхнее – из 26  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{AlAs}$  пар.

Для этой структуры были измерены: спектр отражения по нормали к поверхности, спектр фотолюминесценции с поверхности и с торца структуры. Результаты измерений представлены на рис. 1.5.3. Расчётный спектр отражения был получен в результате подгонки к экспериментальному в приближении периодичности структуры путём минимизации их среднеквадратичного отклонения. Из приведенного соответствия спектров отражения можно сделать вывод о хорошем качестве структуры на предмет оптического качества границ и периодичности толщин её слоёв. Периодичность следования квантовых ям была подтверждена результатами рентгенодифрактометрического анализа.

Провал в спектре отражения и соответствующий ему пик в фотолюминесценции по нормали к поверхности при длине волны 995 нм связан с модой микрорезонатора.

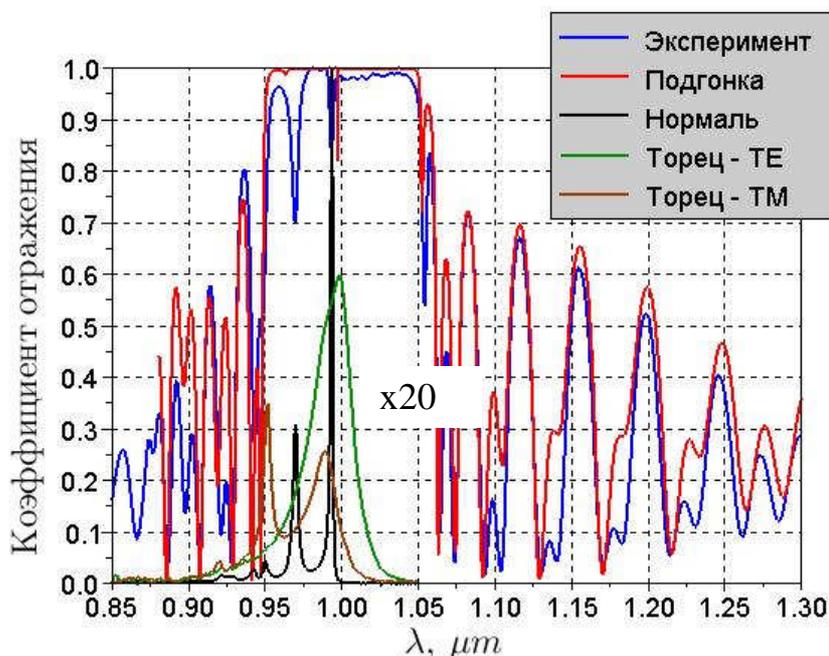


Рисунок 1.5.3. Спектры отражения (экспериментальный и теоретический) лазерной структуры по нормали к поверхности образца, спектры фотолюминесценции по нормали к поверхности образца и с торца структуры для различных поляризаций.

Для установления и подтверждения согласования линии усиления вещества и моды микрорезонатора на рис. 1.5.3 одновременно с фотолюминесценцией по нормали были измерены спектры фотолюминесценции с торца структуры. Измерение фотолюминесценции с торца структуры даёт максимально возможное представление о невозмущенной линии люминесценции вещества, поскольку все остальные направления искажены влиянием добротного микрорезонатора.

Ширина линии моды микрорезонатора в спектре фотолюминесценции по нормали к поверхности связана с добротностью моды и определяется внутренними потерями в среде и излучательными потерями: исходя из результатов измерения фотолюминесценции излучателя, представленных на рис. 1.5.3, можно провести оценку добротности микрорезонатора и соответствующих значений коэффициентов отражения брегговских зеркал.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} = \frac{\alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}}{2\pi}$$

При этом надо иметь в виду, что результирующее уменьшение добротности для линии люминесценции VCSEL-структуры по отношению к расчетному значению обусловлено в значительной степени уровнем дифракционных потерь, величина которых в нашем случае с трудом поддается контролю из-за слабого волноводного поперечного ограничения в микрорезонаторе.

На созданном в процессе выполнения этапа экспериментальном стенде были исследованы генерационные характеристики разработанной и описанной выше многослойной VCSEL-структуры. Образец исследуемой структуры монтировался на теплоотвод с воздушным охлаждением и элементом Пельтье через теплопроводящую пасту. Монтаж образца на термопасту через подложку GaAs неизбежно приводит к сильному разогреву активной области под действием накачки вследствие плохого отвода тепла, однако, именно этот вариант использовался по причине его простоты на данном этапе работ.

Для накачки использовался серийный полупроводниковый лазер JDSU 2495-L4 с волоконным выходом. Длина волны излучения  $808 \text{ нм}$ , максимальная мощность на выходе волокна –  $4.5 \text{ В}$  (диаметр сердцевины волокна -  $100 \text{ мкм}$ ).

На рис. 1.5.4 представлены зависимости выходной мощности вертикально излучающего лазера от полной падающей на образец мощности накачки при различных температурах и диаметре пятна накачки  $d \approx 100 \text{ мкм}$ .

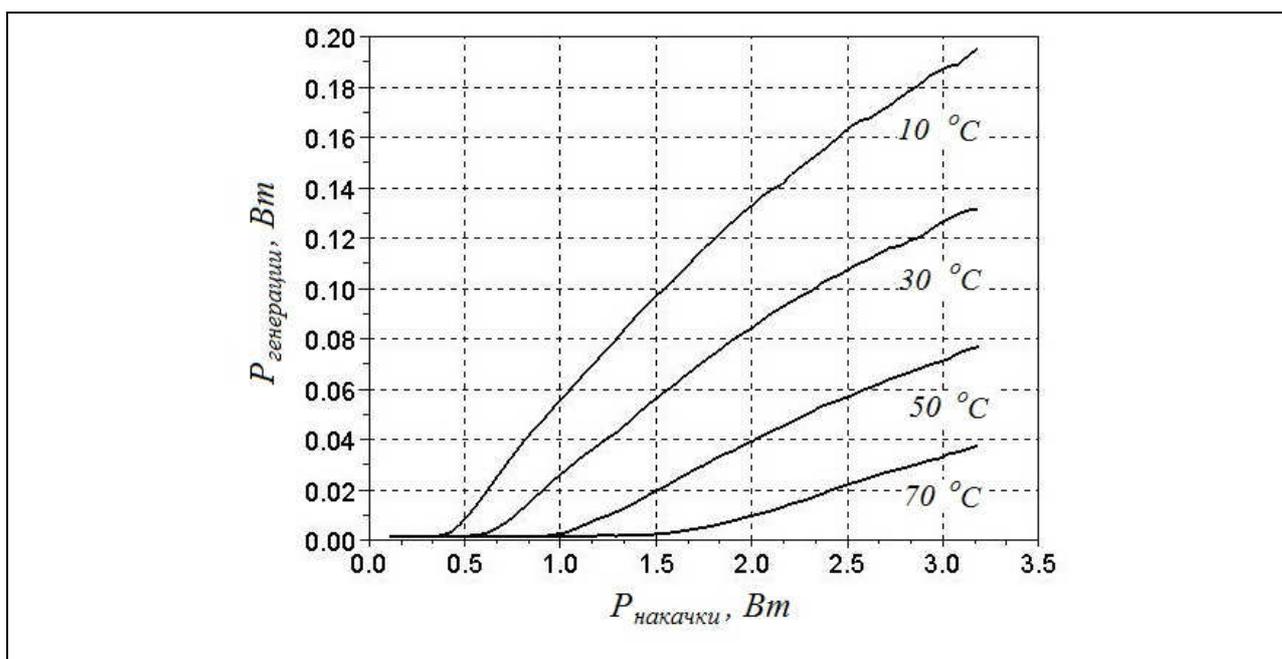


Рисунок 1.5.4. Зависимость выходной мощности вертикально излучающего лазера от мощности падающего излучения при различных температурах подложки

Накачка осуществлялась под углом, близким к  $45^\circ$ . Пороговая плотность мощности при комнатной температуре  $I_{th} = 5,5 \text{ KBm/cm}^2$ , что в пересчёте на поглощенную структурой плотность мощность накачки составляет величину около  $3,3 \text{ KBm/cm}^2$ .

Приведенные зависимости измерены в импульсном режиме при длительности импульса накачки  $100 \text{ мкс}$  и периоде повторения  $5 \text{ мс}$ . Такое значение периода повторения (при минимально достижимом значении длительности импульса, выдаваемого блоком питания) было выбрано с целью минимизации разогрева активной области структуры. При этом регистрируемая длительность импульса генерации для температур подложки образца, превышающих  $30^\circ\text{C}$ , оказалась меньше длительности импульса накачки, что свидетельствует о разогреве и срыве генерации за время действия импульса накачки. Ширина спектра генерации составляет величину  $1,4 \text{ нм}$  и в первую очередь определяется разогревом. Соответствующие зависимости и значения приведены на рис. 1.5.5 и 1.5.6.

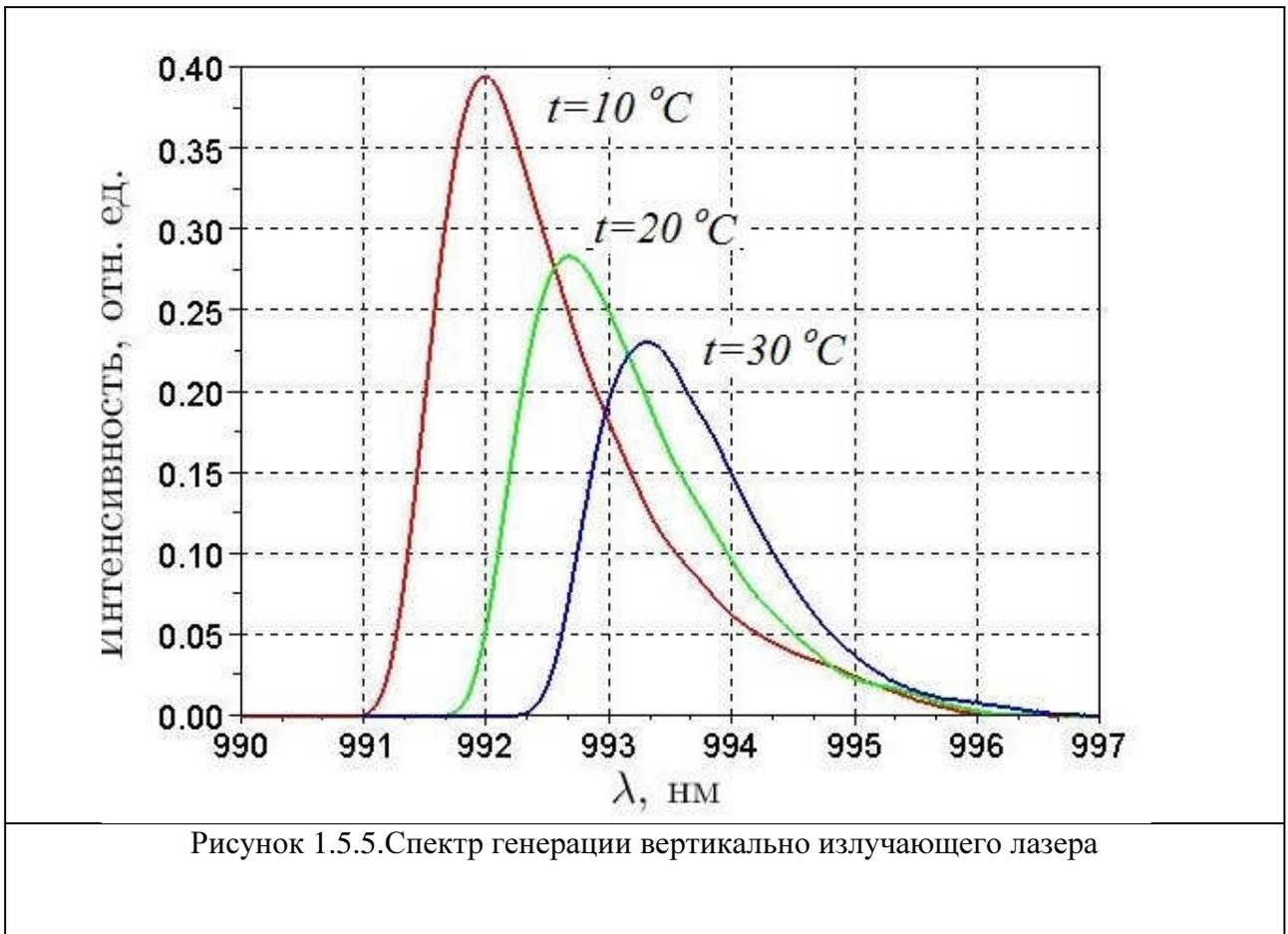


Рисунок 1.5.5. Спектр генерации вертикально излучающего лазера

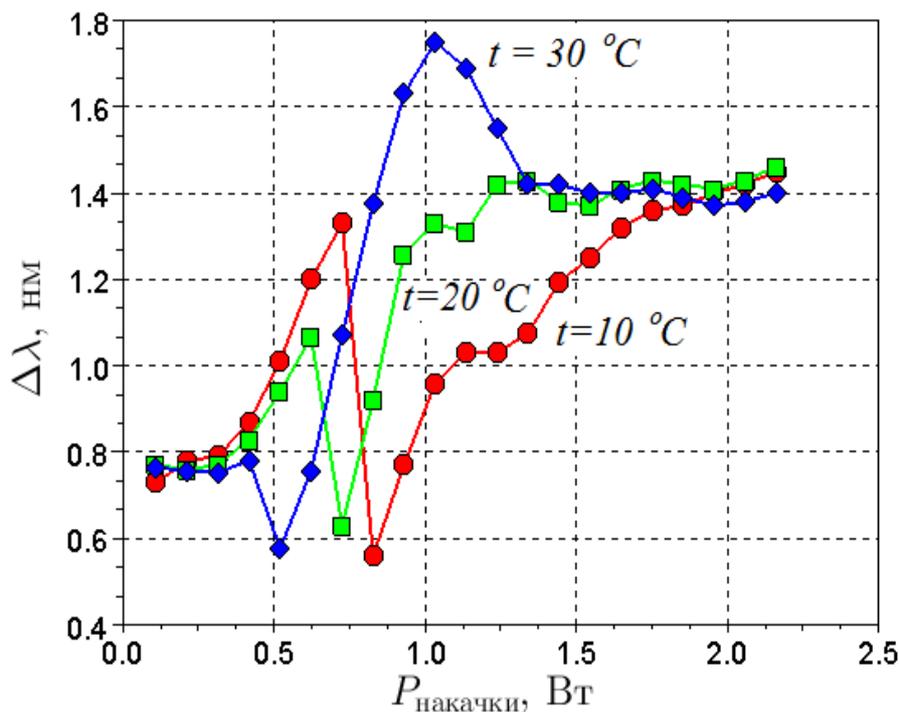


Рисунок 1.5.6. Зависимость ширины линии излучения по нормали к поверхности образца от мощности накачки при различных температурах подложки образца

При доступной мощности накачки генерация сохранялась при изменении площади излучающей апертуры в диапазоне от  $100$  до  $360$  мкм. Увеличение площади пятна накачки приводит к уменьшению длительности импульса генерации.

С целью изучения температурных особенностей согласования линии усиления вещества и моды микрорезонатора были проведены измерения генерационных характеристик в широком диапазоне температур: от комнатной до температуры жидкого азота. Для этого исследуемая структура помещалась в криостат. Излучение накачки фокусировалось на поверхность образца по нормали к поверхности при помощи объектива. Этот же объектив использовался для сбора излучения генерации. При постепенном понижении температуры подложки образца до  $77$  K, генерация в импульсном режиме сохраняется до значений температур  $200$  K с оптимумом по порогу генерации в области значений  $260$  K (см. рис. 1.5.7 и 1.5.8).

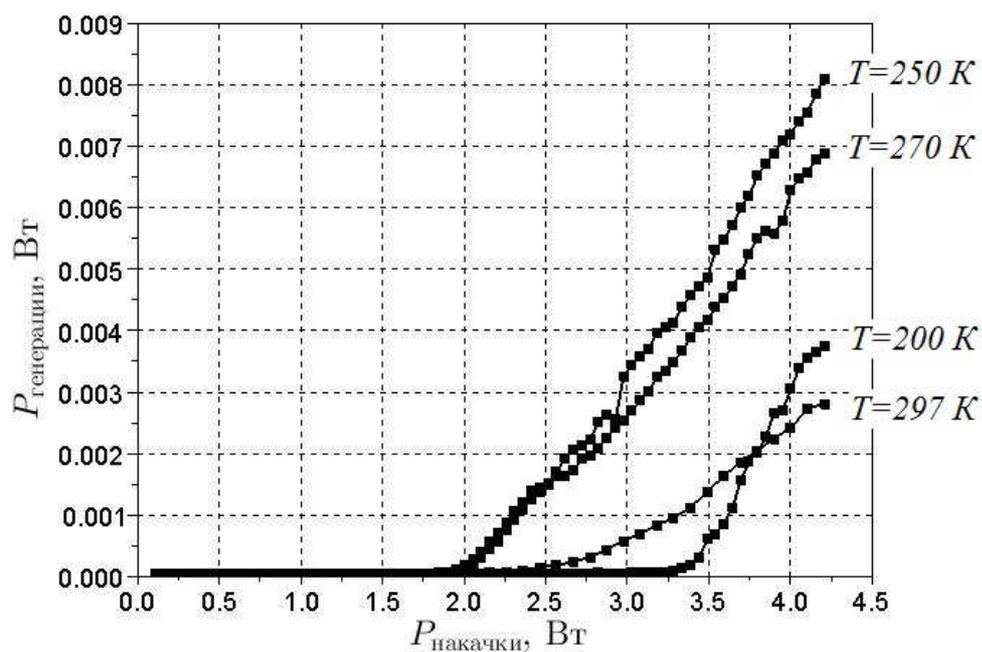


Рисунок 1.5.7. Зависимость выходной мощности генерации вертикально излучающего лазера от мощности падающего излучения при различных температурах подложки в импульсном режиме

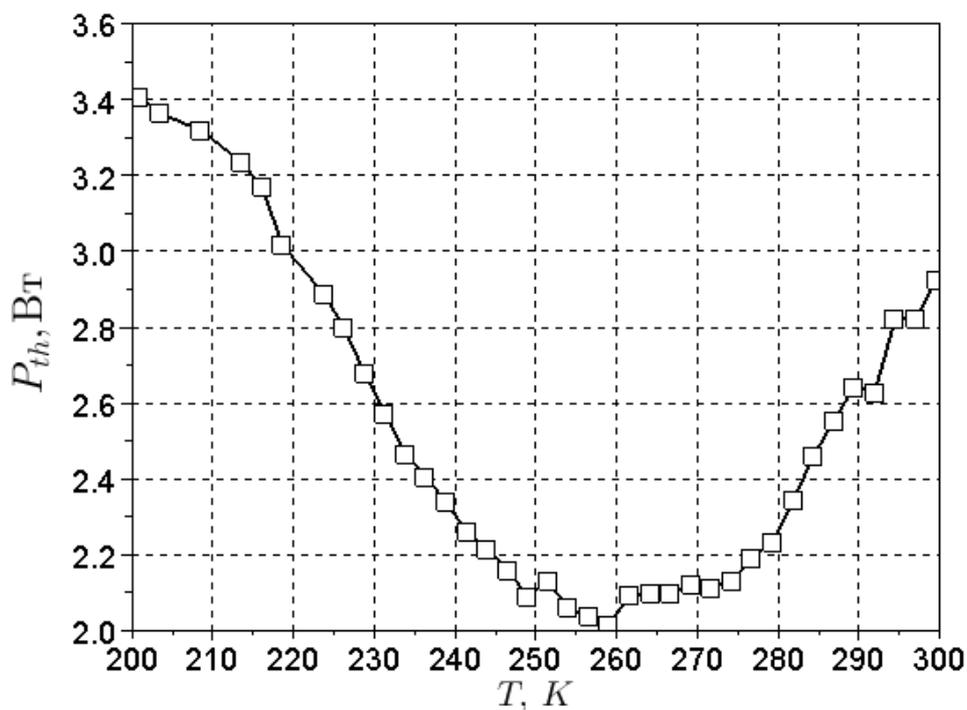
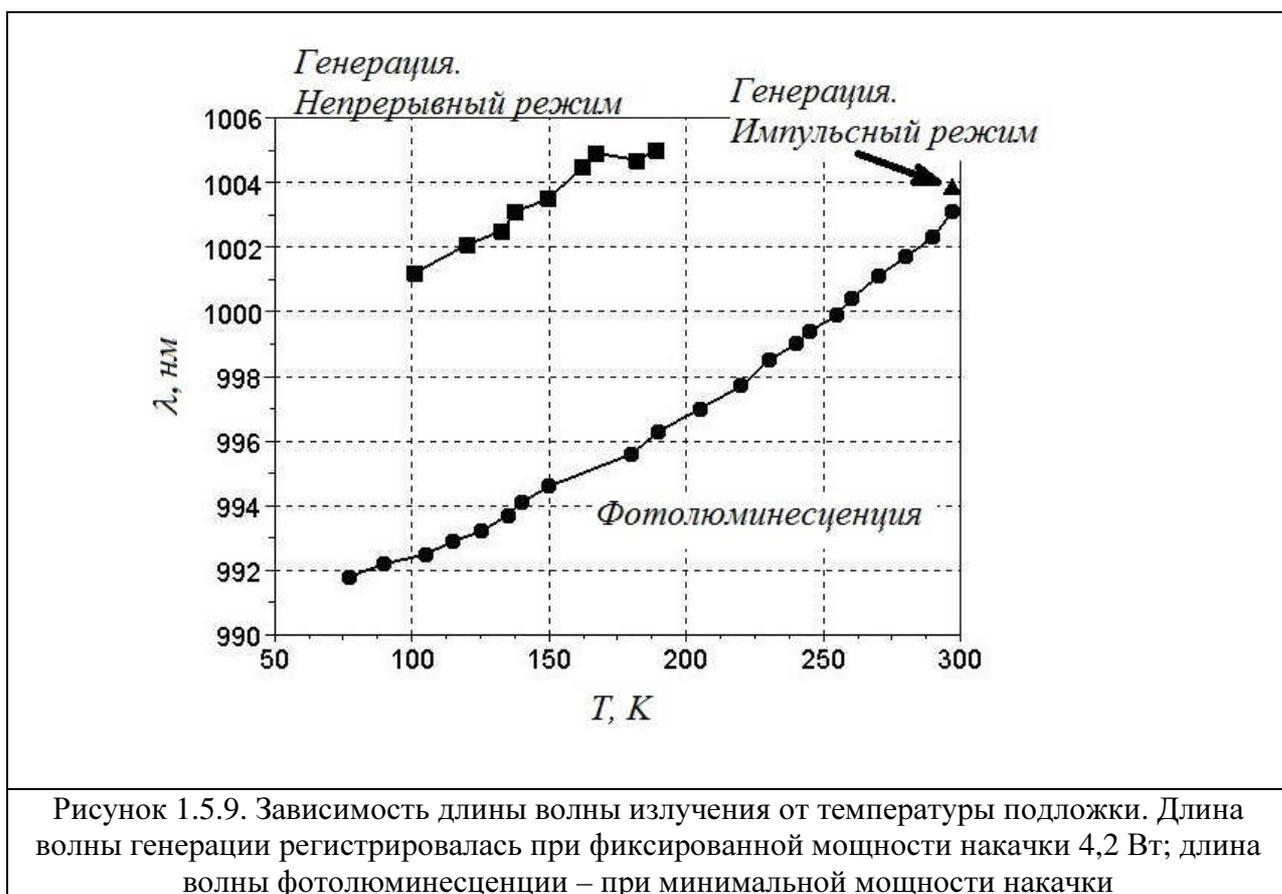


Рисунок 1.5.8. Зависимость порога генерации от температуры подложки

Такая зависимость связана с изначальным длинноволновым смещением линии усиления квантовых ям по отношению к моде микрорезонатора и, возможно неоднородным контуром усиления. Следует отметить, что значения пороговых мощностей на рис. 1.5.8 отличаются от приведенных на рис. 1.5.4 значений в силу дополнительных потерь мощности накачки при отражении на дополнительных элементах в схеме измерений с криостатом.

Была получена генерация для случая непрерывного режима. Исходя из сопоставления зависимостей измеренных длины волны фотолюминесценции (измерения при минимальной плотности мощности накачки), длины волны генерации в импульсном и непрерывном режимах от температуры (рис. 1.5.9), оценка локального разогрева активного слоя относительно подложки при  $4,2 \text{ Вт}$  накачки в непрерывном режиме составила величину  $150 \text{ }^\circ\text{К}$ . Сопоставление значений для порога генерации (рис. 1.5.6 и рис. 1.5.10) даёт меньшую оценку разогрева, -  $50 \text{ }^\circ\text{К}$ .



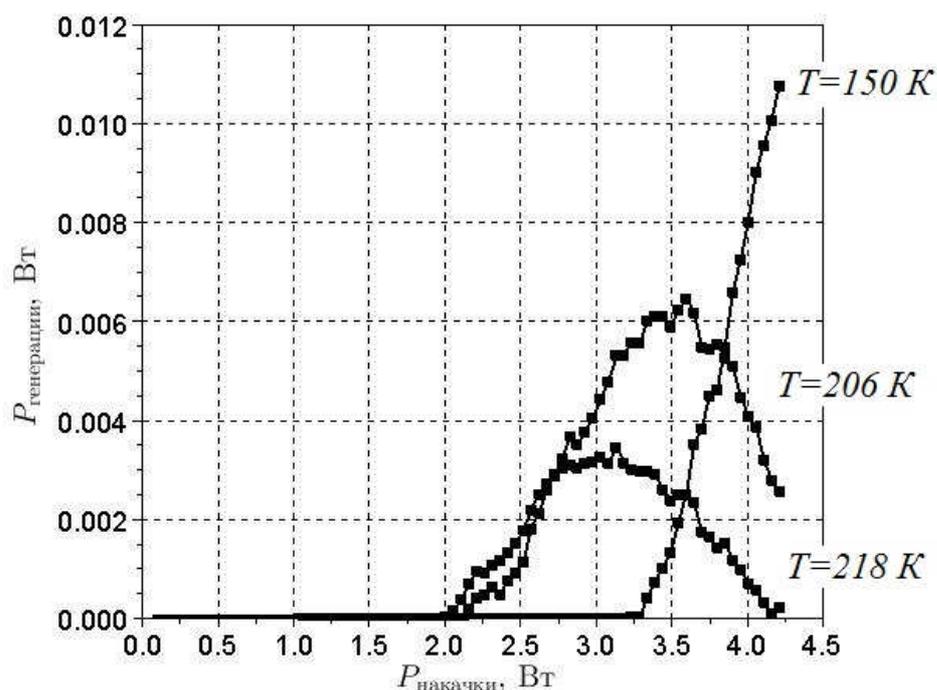


Рисунок 1.5.10. Зависимость выходной мощности генерации вертикально излучающего лазера от мощности падающего излучения при различных температурах подложки в непрерывном режиме

В заключение отметим, что в результате разработки новой конфигурации структуры, осуществленной с учетом сопоставления параметров расчетной модели и результатов серии предварительных калибровочных экспериментов, была реализована генерация в вертикально-излучающем лазере с оптической накачкой, и исследованы экспериментально основные генерационные характеристики. Показано, что основным препятствием для получения непрерывного режима генерации является чрезмерный разогрев структуры излучателя. Следует отметить, что представленная конфигурация вертикально излучающего лазера, отличающаяся от рассматриваемых ранее вариантов, также позволяет осуществить на ней нелинейное преобразование излучения накачки и лазерной генерации в излучение на разностной частоте.

## **2 Корректировка разработанной документации по результатам исследований и испытаний.**

### **2.1 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 2.1.1 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  $\text{LiNbO}_3$  и прохождения оптического излучения через сэндвич-структуру используется CCD камера.

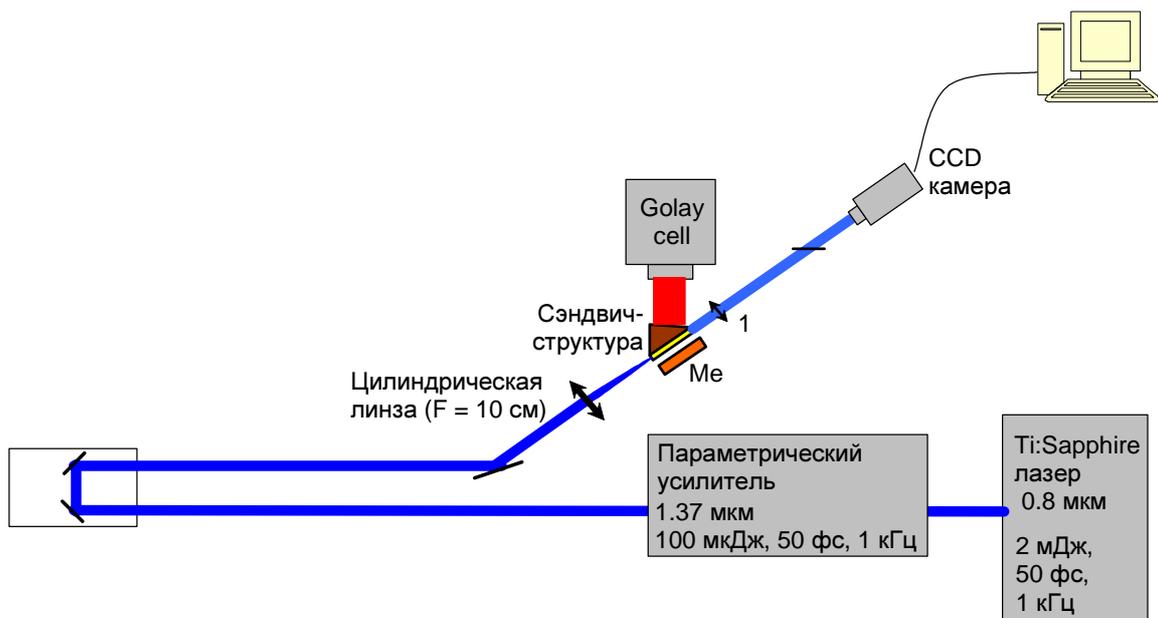


Рисунок 2.1.1. – Схема генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре при лазерной накачке на длине волны 1.37 мкм.

## **2.2 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 2.2.1. Схема генерации терагерцового излучения – левая часть схемы на рисунке – не изменяется: ТГц излучение генерируется в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  лазерным импульсом со скошенным фронтом интенсивности, формируемым при отражении от дифракционной решетки. Для измерения профиля терагерцового пучка используется зондирующий лазерный пучок большого поперечного размера ( $\sim 15$  мм). Такой лазерный пучок направляется через линию задержки в широкоапертурный кристалл  $\text{ZnTe}$ , на который также попадает генерируемый ТГц пучок. В кристалле  $\text{ZnTe}$  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  $\text{ZnTe}$  деполяризованное оптическое излучение частично проходит через поляризатор, при этом освещенность на CCD камере пропорциональна мгновенной интенсивности ТГц поля.

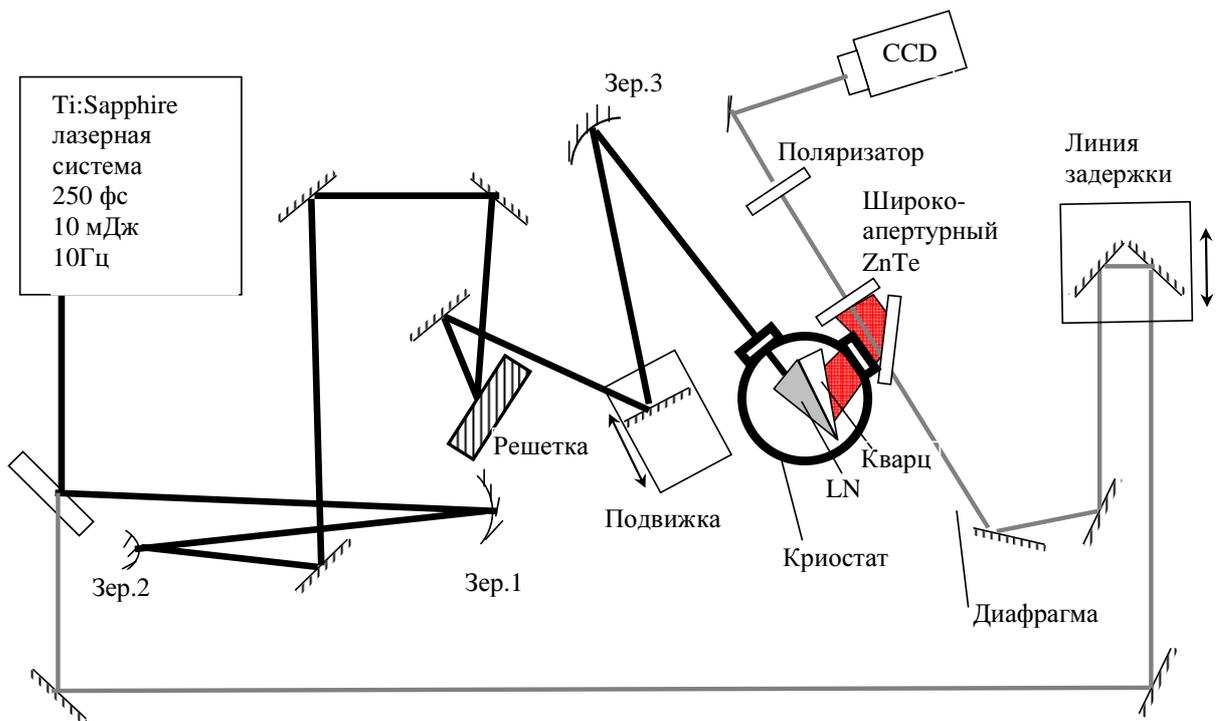


Рисунок 2.2.1. – Схема генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре при лазерной накачке на длине волны 1.37 мкм.

### 2.3 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 2.3.1.

№1

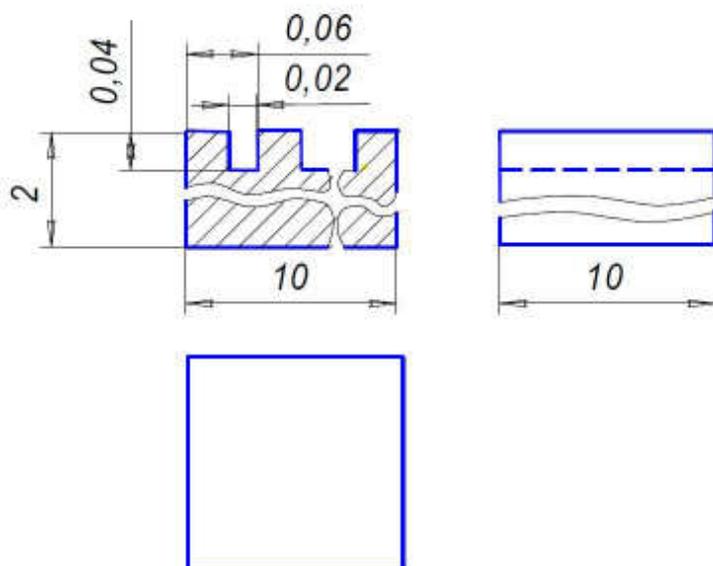


Рисунок 2.3.1 – Скорректированный эскиз экспериментального образца для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами

## 2.4 Корректировка разработанной документации для лабораторной установки для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона

Проведены экспериментальные исследования возможности использования кристалла MgO:PPLN в качестве параметрического усилителя излучения узкополосного DFB – лазера. Данная схема решает две задачи. Во-первых, это позволит увеличить мощность генерации DFB – лазера. Во-вторых, инжекция излучения узкополосного лазера, перестраиваемого по частоте, может представлять собой один из методов перестройки частоты ПГС.

В итоге, рассматриваемая система должна позволить увеличить чувствительность метода узкополосной абсорбционной лазерной спектроскопии.

Была собрана экспериментальная установка для исследования параметрического усиления излучения узкополосного DFB – лазера при прохождении через кристалл MgO:PPLN (рис. 2.4.1).

Излучение Nd:YAG лазера (длина волны 1,064 мкм) с диодной накачкой, работающего в режиме активной модуляции добротности (1) фокусировалось линзой (2) с фокусным расстоянием  $f = 300$  мм в структуру кристалла MgO:PPLN в пятно диаметром 250 мкм. Дихроичное зеркало (3) имело высокий коэффициент отражения  $R \sim 99\%$  под углом  $45^\circ$  на длине волны 1,064 мкм для  $S$  – поляризации и  $R < 1\%$  под углом  $0^\circ$  на длине волны 1,6 мкм для  $P$  – поляризации.

Длительность импульса генерации составляла 50 нс, частота повторения 3 кГц, средняя мощность до 900 мВт.

Излучение непрерывного DFB – лазера со средней мощностью 0,5 мВт на длине волны 1650 нм с диапазоном температурной перестройки 1649,6 – 1651,1 нм и шириной спектра генерации не более 500 кГц совмещалось с излучением лазера накачки. Поляризация излучения DFB – лазера ортогональна поляризации накачки. Температура и период структуры кристалла MgO:PPLN настраивалась на длину волны генерации DFB – лазера.

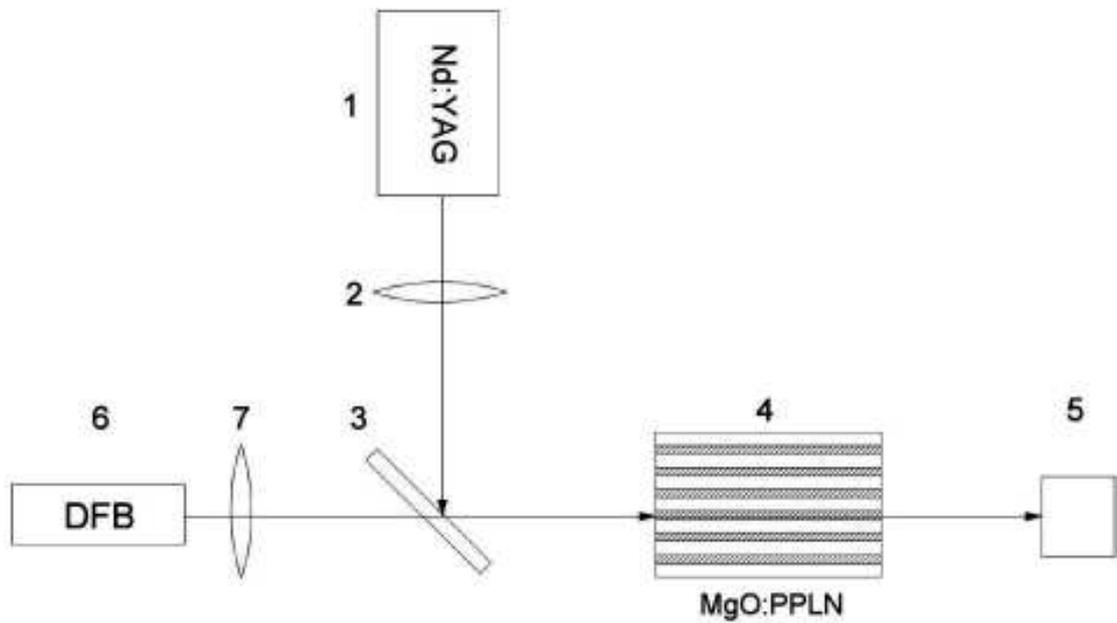


Рисунок 2.4.1 Схема для параметрического усиления излучения DFB – лазера

1 - Nd:YAG лазер накачки ( $\lambda_{\text{ген}} = 1064\text{нм}$ ; длительность импульса генерации  $\Delta t = 50$  нс; частота следования импульсов  $f = 3$  кГц; средняя мощность до 1Вт).

2, 7 – фокусирующая линза

3 – дихроичное зеркало ( $R \sim 99\%$  под углом  $45^\circ$ ,  $\lambda = 1064$  нм и  $R < 1\%$  под углом  $0^\circ$  на  $\lambda = 1650$  нм).

4 – кристалл MgO:PPLN

5 – регистрирующая система

6 - DFB – лазер ( $\lambda = 1649,6 \div 1651,1\text{нм}$ ; ширина линии генерации 500 кГц; средняя мощность излучения 0,5 мВт).

### **3 Изготовление и испытание образцов, макетов и установок, изготовленных по скорректированной документации**

#### **3.1 Испытание установки генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре фемтосекундными лазерными импульсами инфракрасного диапазона**

В результате испытания экспериментальной установки, схема которой приведена на рисунке 2.1.1, 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 3.1.1. 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  $\text{LiNbO}_3$  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.

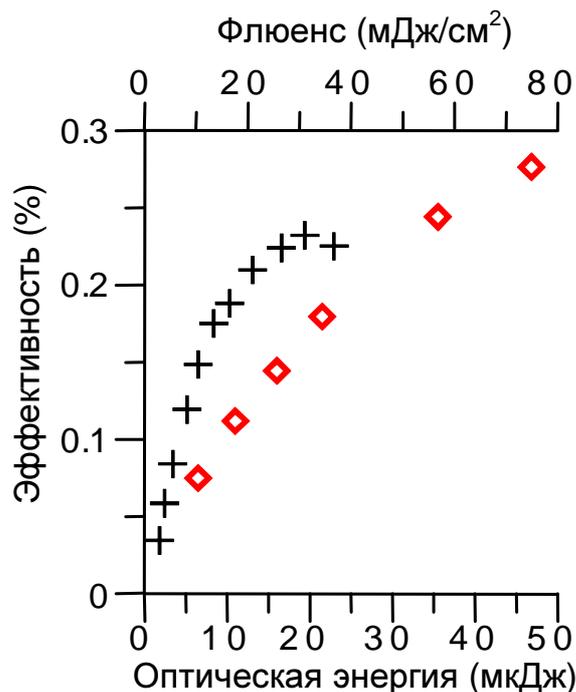


Рисунок 3.1.1. – Эффективность опико-терагерцовой конверсии в зависимости от энергии оптического излучения. Крестики – при накачке на длине волны 800 нм, ромбики – при накачке на длине волны 1.37 мкм.

Результаты измерения поперечного профиля мгновенной интенсивности терагерцового излучения приведены на рисунке 3.1.2(б). Для сравнения приведена также осциллограмма ТГц поля, измеренная в центральной точке терагерцового пучка (рисунок 3.1.2 (а)). Из рисунка 3.1.2 (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.

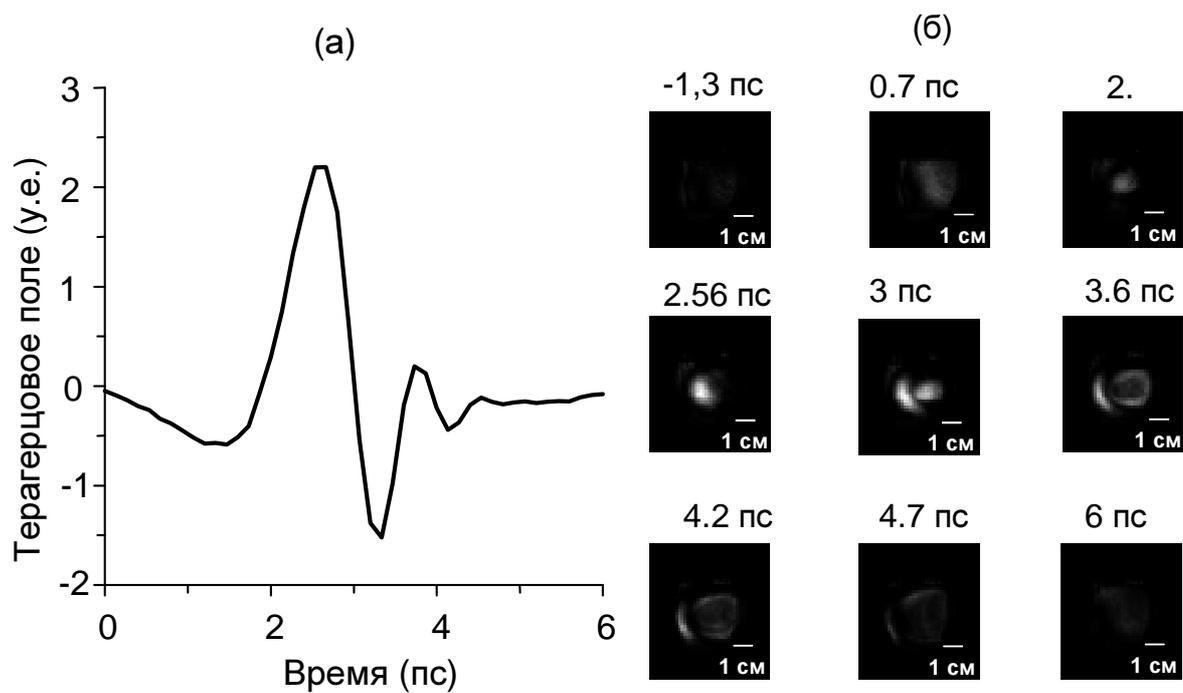


Рисунок 3.1.2. – (а) Осциллограмма терагерцового поля. (б) Поперечное распределение мгновенной интенсивности терагерцового поля в различные моменты времени.

### 3.2 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 3.2.1 представлены микрофотографии изготовленного по скорректированной документации экспериментального образца.

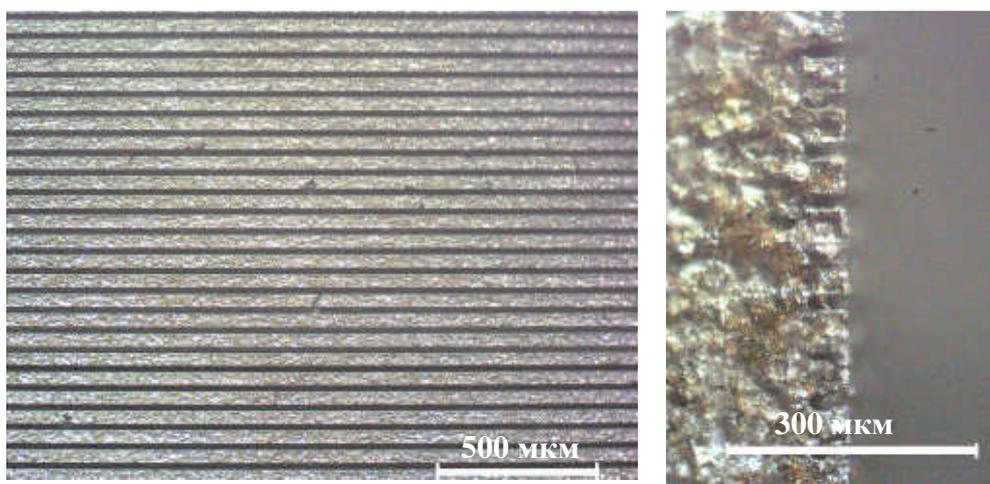


Рисунок 3.2.1 – Микрофотографии изготовленного по скорректированной документации экспериментального образца для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами. Слева: вид сверху, справа: вид сбоку.

### 3.3 Изготовление и испытание лабораторной установки для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона

Зависимость усиления от мощности накачки показана на рис. 3.3.1. Зависимость имела почти линейный характер. Максимальный коэффициент усиления по импульсной мощности составил  $4,5 \cdot 10^4$ . Энергия в импульсе увеличилась с  $3 \cdot 10^{-11}$  Дж до  $1,3 \cdot 10^{-6}$  Дж. При этом средняя мощность излучения на длине волны 1650 нм увеличилась в 2,5 раза. Невысокий коэффициент усиления по средней мощности объясняется тем, что лазер инжекции работал в непрерывном режиме генерации, в то время как лазер накачки генерировал импульсы длительностью 50 нс с частотой следования 3 кГц. Возможно увеличение средней мощности DFB лазера за счёт повышения частоты следования импульсов накачки.

Была измерена зависимость величины параметрического усиления при постоянной длине волны генерации DFB - лазера от температуры кристалла MgO:PPLN. Учитывая коэффициент температурной зависимости максимума усиления для данной структуры, имеющий величину 0,6 нм на 1°C, по полученным результатам была построена спектральная зависимость ширины полосы усиления рис. 3.3.2.

Были проведены измерения спектра линии параметрического усиления. На рис. 3.3.3 показаны спектры параметрического усиления, излучения DFB – лазера и генерации ПГС. Приведены усреднённые по времени (несколько десятков секунд) результаты. В работе использовался дифракционный спектрометр (МДР 41) спектральное разрешение которого, не превышающее величины  $\delta\lambda_{\text{ап}} \approx 0,1$  нм, не позволяло измерять истинную ширину излучения DFB – лазера. Поэтому полученный спектр (кривая 1, рис. 3.3.3) представляет собой прописанную аппаратную функцию монохроматора. Спектр параметрически усиленного излучения DFB – лазера имел ширину  $\delta\lambda_{\text{пу}} \approx 0,36$  нм (кривая 2, рис. 3.3.3), что превышает  $\delta\lambda_{\text{ап}}$ . Для сравнения на рисунке представлен спектр генерации ПГС в неселективном резонаторе (кривая 3, рис. 3.3.3), ширина которого примерно в 4 раза больше  $\delta\lambda_{\text{пу}}$ . Большая ширина спектра излучения ПУ возможно связана с нестабильностью частоты генерации DFB – лазера, а изрезанность контура кривой – температурной нестабильностью кристалла, достигающей величины  $\sim \pm 0,2^\circ\text{C}$ .

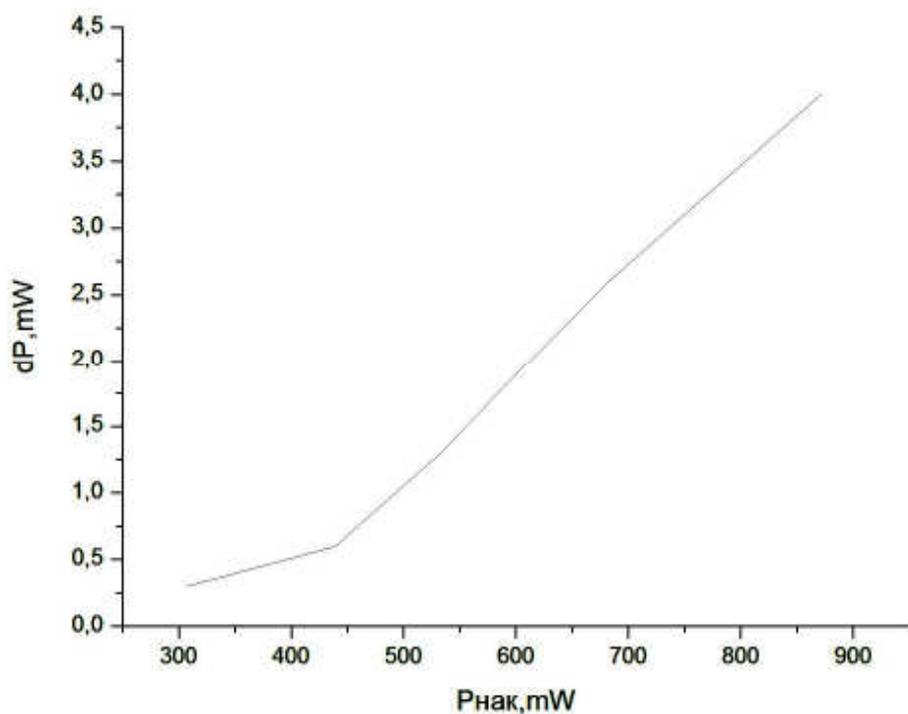


Рисунок 3.3.1. Зависимость усиления излучения DFB – лазера от мощности накачки.

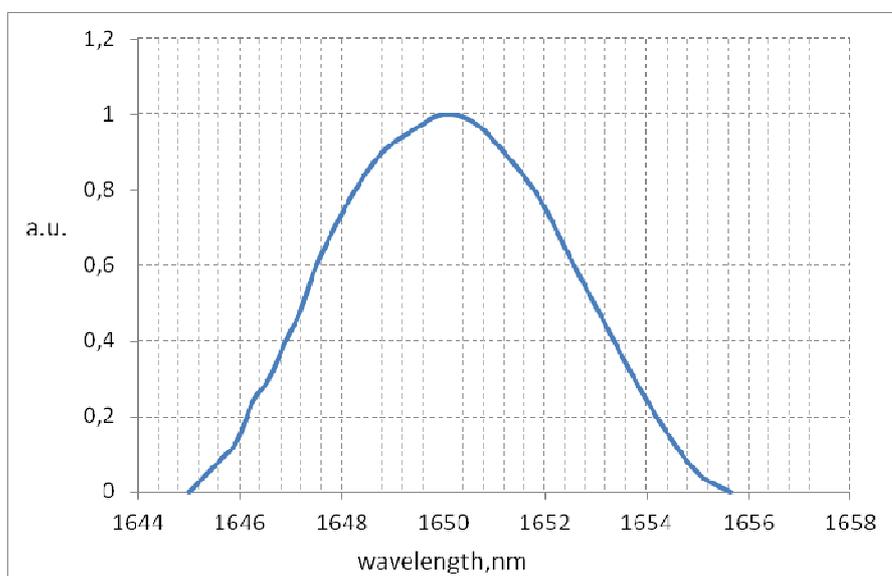


Рисунок 3.3.2. Спектр параметрической люминесценции кристалла MgO:PPLN

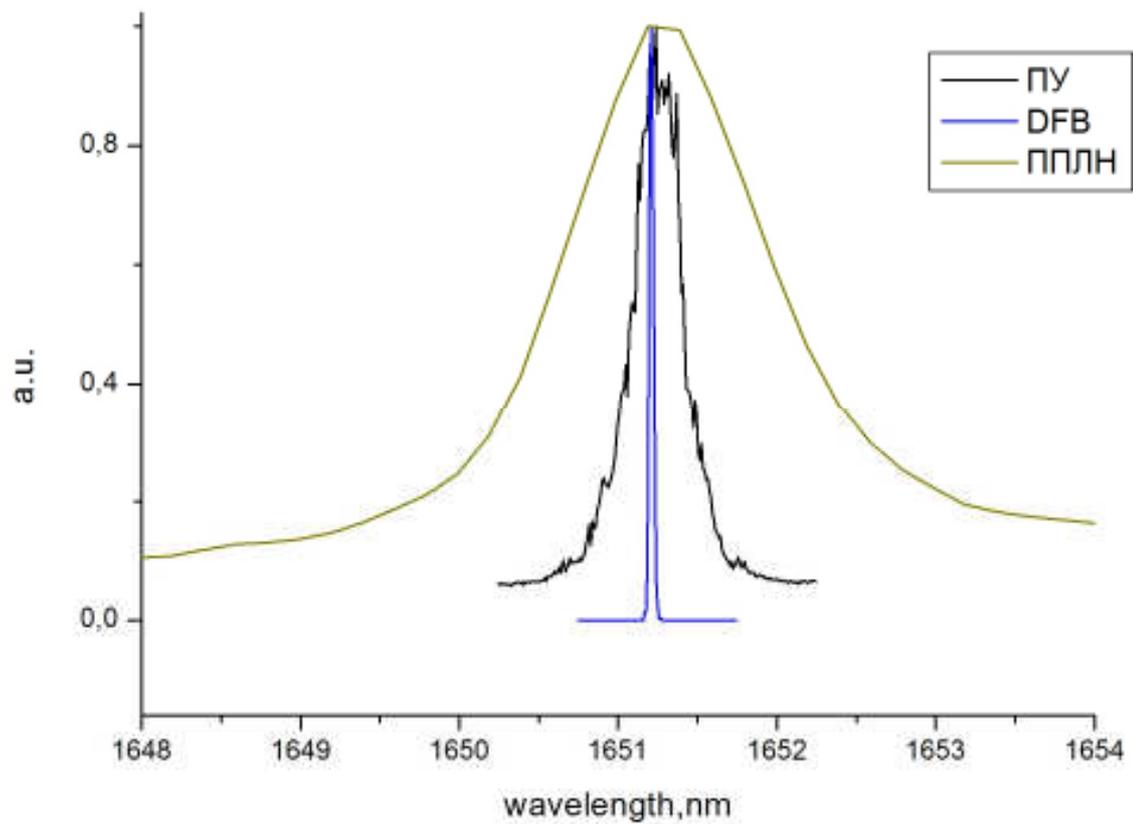


Рисунок 3.3.3. Спектральные зависимости: 1 – излучения DFB – лазера; 2 – усиленного излучения на выходе из кристалла MgO:PPLN; 3 – генерации кристалла MgO:PPLN с неселективным резонатором.

## Заключение

Поставленные на 5этап задачи выполнены полностью.

В ходе выполненных на этапе работ сопоставлены теоретические расчеты и экспериментальные результаты при генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре, сопоставлены экспериментальные и теоретические спектры генерируемого терагерцового поля при различной величине воздушного зазора между металлом и ниобатом лития, исследована эффективность оптико-терагерцовой конверсии в зависимости от энергии лазерного излучения, изучено влияние длительности и частотной модуляции лазерного импульса (чирпа) на эффективность оптико-терагерцовой конверсии.

Проведено сравнение теоретической эффективности предложенного метода генерации терагерцовых поверхностных плазмонов с соответствующей экспериментально измеренной величиной при прямом нелинейно-оптическом возбуждении терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами.

Сопоставлены теоретические расчеты и экспериментальные результаты при исследовании генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности, изучена зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от энергии лазерного излучения.

Сопоставлены теоретические расчеты и экспериментальные результаты при испытаниях экспериментальной установки по когерентной генерации мягкого рентгеновского излучения при накачке многозарядных ионов инертных газов оптическим излучением фемтосекундного лазера тераваттного уровня мощности, получено рентгеновское излучение на длине волны лазерного перехода восьмизарядных ионов ксенона, исследован спектр рентгеновского излучения, полученного при различных энергиях лазерного импульса накачки.

Сопоставлены теоретические расчеты и экспериментальные результаты при исследованиях экспериментальных образцов гетероструктур на основе соединений InGaP–GaAs и InGaAlAs–GaAs для нелинейного преобразования частоты в полупроводниковых гетеролазерах с вертикальным резонатором и оптической накачкой диодными и твердотельными лазерами, выращена лазерная структура,

состоящая из двух полупроводниковых брэгговских зеркал и активной среды, расположенных в пучностях поля микрорезонатора. Для этой структуры были измерены: спектр отражения по нормали к поверхности, спектр фотолюминесценции с поверхности и с торца структуры, измерены спектры фотолюминесценции с торца структуры, исследованы генерационные характеристики, проведены измерения генерационных характеристик в широком диапазоне температур, получена генерация для случая непрерывного режима.

Проведена корректировка разработанной документации по результатам исследований и испытаний в целях повышения эффективности генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре с металлической подложкой для уменьшения эффекта насыщения и повышения энергии генерируемого ТГц излучения путем использования фемтосекундного лазерного излучения инфракрасного диапазона.

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.

Проведена корректировка разработанной документации при создании экспериментального образца для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами.

Проведена корректировка разработанной документации при повышении эффективности работы лабораторной установки для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона. Проведены экспериментальные исследования возможности использования кристалла MgO:PPLN в качестве параметрического усилителя излучения узкополосного DFB – лазера.

Испытана установка генерации ТГц излучения в сэндвич-структуре фемтосекундными лазерными импульсами инфракрасного диапазона, проведены измерения энергии генерируемого терагерцового излучения в зависимости от энергии лазерной накачки.

Изготовлен по скорректированной документации экспериментальный образец для метода прямого нелинейно-оптического возбуждения терагерцовых поверхностных плазмонов на микроструктурированной поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами.

Испытана лабораторная установка для анализа состава газовых смесей на основе ПГС среднего ИК диапазона. Измерена зависимость величины параметрического усиления при постоянной длине волны генерации DFB - лазера от температуры кристалла MgO:PPLN, проведены измерения спектра линии параметрического усиления.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

**1 Bakunov, M.I.** M.I. Terahertz generation with tilted-front laser pulses: dynamic theory for low-absorbing crystals / Bakunov, S.B. Bodrov, E.A. Mashkovich // J. Opt. Soc. Am. B. - 2011. - Vol. 28. - P.1724-1734.

**2 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. - Vol. 104. – P. 093105.

**3** Научно-технический отчет о выполнении 4 этапа Государственного контракта № 02.740.11.0563 от 22 марта 2010 г. «Генерация электромагнитных излучений в неосвоенных частотных диапазонах на основе нелинейно-оптических преобразований» / М.И. Бакунов и др. Нижний Новгород, 2011.

**4 Bodrov, S. B.** Highly efficient optical-to-terahertz conversion in a sandwich structure with LiNbO<sub>3</sub> core / S. B. Bodrov, A. N. Stepanov, M. I. Bakunov, B. V. Shishkin, I. E. Plyakov, R. A. Akhmedzhanov // Optics Express. – 2009. – Vol. 17. – P. 1871–1879.