

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»
Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Уменьшение длительности фемтосекундных импульсов
УДК <u>537.862-044.74:535.33</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В81	Емельянов Константин Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Полисадова Е.Ф.	Д.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Главный научный сотрудник ИСЭ СО РАН	Лосев В.Ф.	Д.ф.-м.н., профессор		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов Сергей Александрович	К.ф.-м.н.		

Томск – 2022 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т. ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен применять естественнонаучные и общепрофессиональные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с проектированием и конструированием, технологиями производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов
ОПК(У)-2	Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, интеллектуально

	правовых, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного цикла технических объектов и процессов
ОПК(У)-3	Способен проводить экспериментальные исследования и измерения, обрабатывать и представлять полученные данные с учетом специфики оптических измерений
ОПК(У)-4	Способен использовать современные информационные технологии и программное обеспечение при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности
ОПК(У)-5	Способен участвовать в разработке текстовой, проектной и конструкторской документации в соответствии с нормативными требованиями
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность к формированию технических требований и заданий на проектирование и конструирование оптических и оптико-электронных приборов, комплексов и их составных частей
ПК(У)-2	Способность к математическому моделированию процессов и объектов оплотехники и их исследованию на базе профессиональных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов
ПК(У)-3	Способность к анализу, расчету, проектированию и конструированию в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов оплотехники на схематехническом и элементном уровнях, в том числе с использованием систем автоматизированного проектирования
ПК(У)-4	Способность к разработке технологических процессов и технической документации на изготовление, сборку, юстировку и контроль механических, оптических, оптико-электронных блоков, узлов и деталей
ПК(У)-5	Способность к внедрению технологических процессов производства, метрологического обеспечения и контроля качества изделий оптических, оптико-электронных систем, приборов, деталей, элементов и оптических покрытий различного назначения
ПК(У)-6	Способность к проектированию оснастки и специального инструмента, предусмотренных технологией изготовления оптических и оптико-электронных приборов, комплексов и их составных частей
ПК(У)-7	Способность к организации контроля качества выпускаемой оптической продукции

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»
 Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Степанов С.А.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4B81	Емельянов Константин Андреевич

Тема работы:

Уменьшение длительности фемтосекундных импульсов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№105-13/с от 15.04.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Фемтосекундный комплекс “Старт” с центральной длиной волны 950 нм, длительностью импульса 60-70 фс и энергией до 15 мДж.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>1) Уширение спектра за счёт использования нелинейных кристаллов, уширение спектра за счёт чирпирования основной частоты, за счёт нарушения фазового синхронизма. 2) Компрессия импульса до фемтосекундной длительности. 3) Изучение эффективности генерации второй гармоники при уширении её спектра</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Оптические схемы экспериментов по уширению спектра и компрессии импульса, результаты экспериментов.</p>

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Старший преподаватель Черемискина Мария Сергеевна</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент ОСГН ШБИП к.т.н. Кашук Ирина Вадимовна</p>
<p>Объект и методы исследования, расчёт и аналитика</p>	<p>Главный научный сотрудник ИСЭ СО РАН, д.ф.-м.н., профессор Лосев Валерий Федорович</p>
<p></p>	<p></p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p></p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>21.09.2021</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ ИШНПТ	Полисадова Е.Ф.	Д.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В81	Емельянов К.А.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
4В81		Емельянов Константин Андреевич	
Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Материаловедение
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Оптотехника 12.03.02

Тема ВКР:

Уменьшение длительности фемтосекундных импульсов	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения 	<p>Объект исследования: методики уширения спектра фемтосекундных импульсов Область применения: в исследовательских и лабораторных установках для достижения необходимых параметров Рабочая зона: лаборатория Размеры помещения: 150 м² Количество и наименование оборудования рабочей зоны: задающий титан-сапфировый лазерный комплекс Start-480, решёточные стретчер и компрессор, два многопроходных усилителя и лазеры накачки</p> <p>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: юстировка лазерной системы, измерение оптических характеристик лазерного пучка при различных начальных параметрах оптической системы</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 22.11.2021) – ГОСТ 12.2.033-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования – Федеральный закон №426-ФЗ от 28 декабря 2013 года «О специальной оценке условий труда»
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов 	<p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – диффузно рассеянное излучение; – инфракрасное излучение; – умственное перенапряжение, в том числе вызванное информационной нагрузкой; – нервно-психологические перегрузки вследствие работы с оптическими приборами. <p>Опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – лазерное излучение; – наличие электромагнитного поля, чрезмерно отличающегося от поля Земли; – пожар; – повышенный уровень электромагнитного излучения (озон). <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной</p>

	защиты от выявленных факторов: рекомендации по улучшению микроклимата в рабочем помещении, рекомендации к мерам пожарной безопасности, способы защиты от электрического тока, обязательное ношение СИЗ (очки, перчатки, халат)
3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения	Атмосфера: загрязнение химически активными веществами Литосфера: мусор и прочие отходы жизнедеятельности и организации работы лаборатории Гидросфера: увеличение потока городских сточных вод, загрязнение химически активными веществами Селитебная зона: нет воздействия
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения	Возможные ЧС: пожар, взрыв, терроризм Наиболее типичная ЧС: пожар
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина Мария Сергеевна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В81	Емельянов Константин Андреевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4В81	Емельянов Константин Андреевич

Школа	ИШНПТ	Отделение Школа	Материаловедение
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	12.03.02 «Оптотехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
<i>2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
<i>3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ
<i>4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности ИР
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н доцент		28.02.22

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В81	Емельянов Константин Андреевич		28.02.22

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 85 с., 18 рис., 23 табл., 40 источников.

Ключевые слова: лазерные импульсы, фемтосекундная длительность, длина волны, основная гармоника, ширина спектра, фазовая самомодуляция, вторая гармоника, нелинейный кристалл.

Объектом исследования является длительность импульса излучения второй гармоники, которая формируется при накачке нелинейного кристалла KDP фемтосекундным импульсом излучения Ti:Sa комплекса, работающего на краю контура усиления (950 нм). Эта длительность составляла ~ 50 фс. Для ее уменьшения было необходимо найти и выбрать наиболее эффективный метод.

Целью работы является поиск условий сокращения длительности 50 фс импульса. Для этого было необходимо ознакомиться с методами формирования ультракоротких импульсов излучения и исследовать возможности и особенности дополнительного уменьшения длительности в нелинейном кристалле на фемтосекундном Ti:Sa лазерном комплексе.

В процессе исследования проводились сбор, обработка и анализ литературных данных о возможностях уменьшения длительности фемтосекундных импульсов различными методами, разработка оптических схем эксперимента, аналитическая оценка параметров пучка, проведение экспериментов, анализ и сравнение полученных результатов с расчётными значениями.

Степень внедрения: результаты выполненной работы могут быть полезны для повышения мощности фемтосекундной лазерной системы ТНЛ-100 за счет сокращения длительности импульса.

Область применения: исследования взаимодействия импульсов высокой мощности и критически малой длительности с веществом.

В дальнейшем планируется проведение экспериментов по усилению полученных фемтосекундных импульсов в выходном газовом усилителе лазерной системы THL-100.

Обозначения и сокращения

УКИ – ультракороткий импульс;

ВГ – вторая гармоника;

ГВГ – генерация второй гармоники;

ДГС – дисперсия групповых скоростей;

ОА – одноимпульсный автокоррелятор.

Оглавление

Введение.....	16
1 Обзор литературы	18
1.1 Современные методы уменьшения длительности фемтосекундных импульсов. Преимущества, недостатки и области применимости	18
1.1.1 Уширение спектра импульса при фазовой самомодуляции в газонаполненном капилляре	18
1.1.2 Уширение спектра в процессе генерации второй гармоники в нелинейном кристалле.....	22
1.2 Сокращение длительности импульса второй гармоники за счет дополнительного уширения спектра в нелинейном кристалле	26
Вывод по разделу	30
2 Объект и методы исследования	32
2.1 Определение ширины спектра.....	32
2.2 Определение энергии в лазерном импульсе приёмником на базе пироэлектрического эффекта.....	33
2.3 Автокорреляционный метод определения длительности ультракоротких лазерных импульсов.....	34
3 Расчёт и аналитика	38
3.1 Обоснование применяемых методов расчёта и описание блок схем экспериментальной установки.....	38
3.2 Экспериментальные и расчётные результаты исследований	43
Вывод по разделу	48
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	49

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	49
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	49
4.1.2 SWOT-анализ	51
На первом этапе составим матрицу SWOT (табл.4.2).....	51
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	55
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	55
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения НИР	56
4.3 Бюджет научно-технического исследования	59
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования ..	59
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования.....	60
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	61
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	63
4.3.5 Накладные расходы	63
4.3.6 Формирование бюджета затрат НИР	64
4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	65
5 Социальная ответственность	69
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	69
5.2 Производственная безопасность	71
5.3 Анализ вредных и опасных факторов	72
5.3.1 Возможность поражения электрическим током	72
5.3.2 Лазерное излучения	73

5.3.3. Повышенный уровень ионизированного излучения	74
5.3.4 Инфракрасное излучение	75
5.3.5 Умственное перенапряжение, в том числе вызванное информационной нагрузкой	75
5.3.6 Нервно-психологические перегрузки вследствие работы с оптическими приборами	76
5.4 Экологическая безопасность.....	77
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	78
Заключение	80
Список используемой литературы	83

Введение

Современные лазерные системы генерируют импульсы излучения с длительностью вблизи границы существующих физических моделей (десятки фемтосекунд). Для достижения предельно коротких длительностей применяются различные методики, которые, так или иначе, связаны с нелинейными процессами взаимодействия излучения со средой. При этом каждая лазерная система является уникальной и требует индивидуального подхода.

Мощная фемтосекундная лазерная система ТНЛ-100, которая создана в лаборатории газовых лазеров ИСЭ СО РАН, является уникальной, поскольку она работает в видимой области спектра (все подобные системы работают в инфракрасной области спектра). На ней ведутся исследования возможностей повышения пиковой мощности выходного излучения. Одним из способов увеличения мощности импульса излучения является укорочение длительности при сохранении его энергии. Однако из-за того, что фемтосекундный импульс формируется на краю контура усиления Ti:Sa кристалла (950 нм), то в задающем генераторе не удастся получить импульс короче 50 фс. Хотя при работе в области спектра с максимальным коэффициентом усиления (800 нм) удастся формировать импульсы с длительностью 10 фс. В связи с этим актуальной задачей является отработка стабильного и наиболее практичного метода получения импульсов минимальной длительности для конкретной лазерной системы.

Целью исследования в настоящей работе являлся поиск и разработка метода дополнительного уменьшения длительности фемтосекундных импульсов второй гармоники. Для этого было необходимо проанализировать известные возможности и особенности дополнительного уменьшения длительности фемтосекундных импульсов второй гармоники, провести эксперименты на фемтосекундном Ti:Sa комплексе и сравнить полученные результаты с теоретическими.

Для выполнения поставленной цели был проведён анализ литературы в области формирования фемтосекундных импульсов на установках коллег из других НИИ, так же выявлены особенности формирования импульсов с минимальной длительностью в зависимости от различных факторов. Составлен план эксперимента и выбран оптимальный метод укорочения длительности импульсов. Проведены эксперименты и проанализированы полученные результаты, проведено сравнение с результатами математического моделирования коллег из НГУ, предложены объяснения некоторых расхождений между расчётными и экспериментальными данными.

1 Обзор литературы

1.1 Современные методы уменьшения длительности фемтосекундных импульсов. Преимущества, недостатки и области применимости

Для различных оптических систем и типов лазеров существуют конкретные методы уширения спектра ультракоротких импульсов с последующей их компрессией. В данном разделе производится анализ современных методик уширения и области их приложения в конкретных системах. На данном этапе появляется возможность конкретно определиться с методом укорочения длительности импульсов, который будет являться пригодным и эффективным для эксплуатации на комплексе ТНЛ-100 в ИСЭ СО РАН.

1.1.1 Уширение спектра импульса при фазовой самомодуляции в газонаполненном капилляре

Технологию уширения импульсов в капилляре, наполненном инертным газом, начали практиковать в последней декаде прошлого века [1]. Физика уширения кроется в эффекте фазовой самомодуляции, которая возникает в процессе распространения импульса по капилляру.

В работах зарубежных коллег [2] описаны возможности для уширения и последующего сжатия импульсов с 600 фс до ~ 70 фс, при этом энергия сжатого импульса составляла ~ 100 мкДж. Вследствие невысокого коэффициента пропускания капилляра (порядка 20%) наблюдалась невысокая эффективность нелинейного преобразования, что, очевидно, накладывает некоторые ограничения на системы с относительно невысокой выходной энергетикой.

В более поздней работе [3] были рассмотрены две схемы компрессии импульсов, но нас будет интересовать именно сокращение длительности импульса за счет уширения спектра. Эксперимент проводился на фемтосекундной лазерной системе ТЕТА-3 (ООО «Авеста-Проект»). Это волоконная система с диодной накачкой и волокном легированным ионами Yb^{3+} (иттербиевый лазер). Лазер генерирует импульсы излучения с длительностью 290 фс, выходной энергией 150 мкДж на центральной длине волны 1028 нм. На уровне интенсивности $1/e^2$ диаметр пучка составляет 4 мм, его расходимость была близка к дифракционной [3].

Теоретически было показано, что для генерации импульса в капилляре с максимальной шириной спектра и отсутствием плотности потока, необходимого для возбуждения высших пространственных мод, отсутствует зависимость от типа используемого газа и влияние оказывает выбранная длина капилляра и действующая центральная длина волны лазера накачки [2]:

$$\frac{\Delta\omega}{(\Delta\omega)_0} \sim \left(\frac{L}{\lambda}\right)^{1/3}, \quad (1)$$

где $\Delta\omega$ – ширина спектра выходного импульса излучения; $(\Delta\omega)_0$ – ширина спектра, входящего в капилляр; L – длина капилляра; λ – выбранная длина волны лазера накачки.

Коэффициент ослабления интенсивности в капилляре α определяется для моды, обладающей минимальными потерями, т.е. для низшей моды EH_{11} , следующим уравнением [4]:

$$\alpha = 0.146 \cdot \frac{\lambda^2}{a^3} \cdot \frac{\nu^2 + 1}{\sqrt{\nu^2 - 1}}, \quad (2)$$

где λ – выбранная длина волны лазерного излучения; ν – отношение показателей преломления материала стенки и заполняющего его газа, a – радиус капилляра.

Для того чтобы коэффициент пропускания составлял величину не менее 80% и соотношений выше, был выбран капилляр длиной 20 см с радиусом 72 мкм [3].

Излучение заводилось в капилляр диаметром ~ 140 мкм и длиной 20 см линзой с фокусным расстоянием 20 см. Сам капилляр размещался в кювете длиной 30 см и заполненной ксеноном (рис.1). Компрессия осуществлялась за счёт системы из двух кварцевых призм, расстояние между призмами в компрессоре было ~ 2 м. Регистрация спектра импульса производилась спектрометром ASP-100M, длительность импульса измерялась автокоррелятором ASF-20 [3].

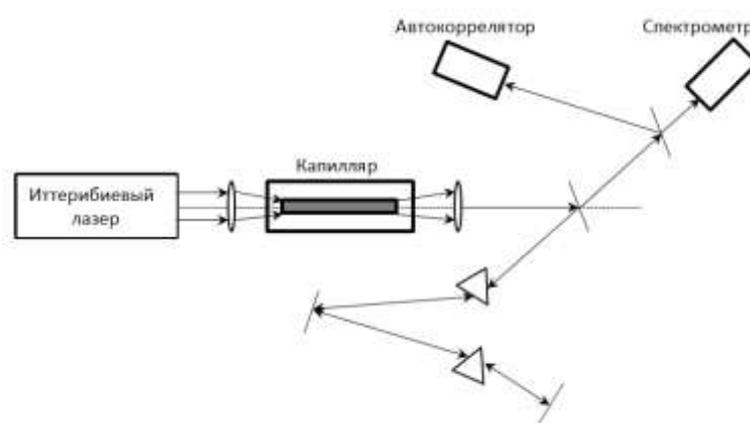


Рисунок 1 – Оптическая схема компрессора фемтосекундных импульсов для излучения иттербиевого лазера

Измерения ширины импульса производились при давлении ксенона в капилляре ~ 7 атм, выше данного значения исследователи наблюдали резкое снижение коэффициента пропускания (рис.2). Таким образом, спектр исходного лазерного импульса шириной ~ 7 нм после прохождения через капилляр был уширен до ~ 70 нм [3]. Ребристая форма импульса характерна для эффекта фазовой само модуляции [5].

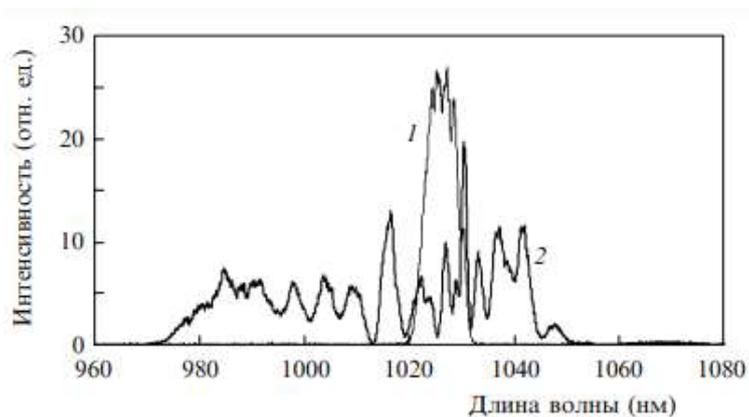


Рисунок 2 – Спектры лазерных импульсов на входе в капилляр (1) и на выходе из него (2) [3]

Формы входного и сжатого импульсов, зарегистрированные автокоррелятором, изображены на рисунке 3. При условии, что форма импульса имеет вид sech^2x , то в таком случае длительность импульса после компрессии составила 27 фс [3].

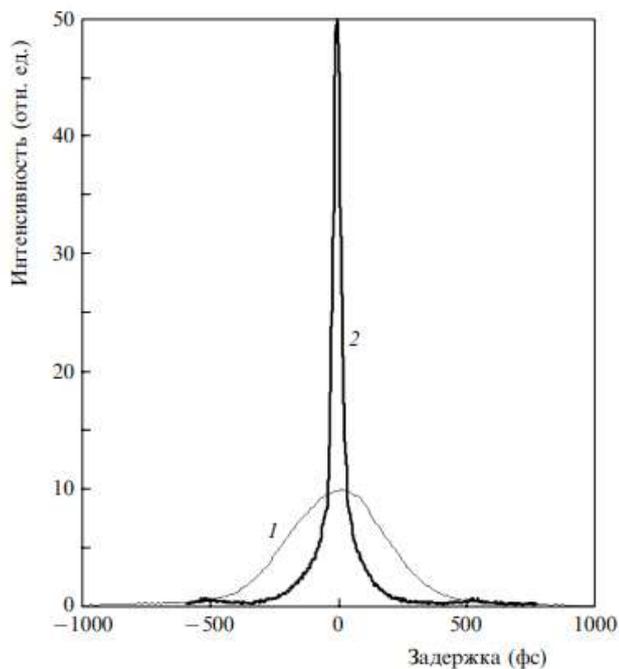


Рисунок 3 – Автокорреляционные формы исходного (1) и сжатого (2) импульсов [3]

Таким образом, исследователям удалось сжать в стеклянном капилляре, заполненном ксеноном, импульс иттербиевого лазера длительностью 290 фс до длительности в 27 фс.

Для более высокоэнергетичных импульсов (энергия свыше 10 мДж) может быть применена схема с chirпированием импульсов в капилляре с ионизированным в нем газом [3].

1.1.2 Уширение спектра в процессе генерации второй гармоники в нелинейном кристалле

Генерация второй гармоники в лазерных системах имеет обширный спектр по применению. Конкретно для Ti:сапфирового лазера, расположенного в лаборатории газовых лазеров ИСЭ СО РАН, на базе которого я выполнял выпускную работу, генерируемая вторая гармоника (ГВГ) на выходе стартового комплекса используется для последующего усиления в мощном выходном усилителе лазерной системы THL-100. Так же ГВГ позволяет контролировать временные параметры усиливаемых импульсов и повышать временной контраст за счёт нелинейной зависимости эффективности преобразования в ВГ от интенсивности импульса накачки [7].

В данном разделе обсудим конкретно возможности уменьшения длительности импульсов ВГ вследствие ГВГ за счёт уширения спектра в нелинейных кристаллах. Известно, что для эффективного преобразования в ВГ необходимо соблюсти условие фазового синхронизма между генерируемой волной ВГ и накачки. Так же стоит упомянуть о возникновении волн с кубической поляризацией для систем с петаваттной мощностью, эти волны могут вступать в резонанс с волнами второй гармоники (ВГ) и основной частоты, тем самым нарушая синхронизм созданием дополнительного набега фаз [8] – это при большой интенсивности (ТВт/см^2).

Дополнительный фазовый набег может быть скомпенсирован за счёт корректировки угла между волновым вектором первой гармоники и оптической осью кристалла на величину $\Delta\theta$ [9]. Согласно [7] оптимальное преобразование ВГ определится следующим выражением:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta n}{n_1^3(n_1^{-2} - n_0^{-2})} \sqrt{\frac{n_1^{-2} - n_0^{-2}}{n_e^{-2} - n_1^{-2}}} \quad (3)$$

где $\Delta n = (2\pi/k_1)A_{10}^2(2\gamma_{11} + 2\gamma_{12} - \gamma_{21} - \gamma_{22})/8\pi$; n_1 – показатель преломления для первой гармоники; n_0 , n_e – главные значения показателя преломления для излучения второй гармоники. Значения для коэффициентов KDP кристалла γ_{ij} ($i, j = 1, 2$) опубликованы в работах [7,10]. Таким образом, угловая отстройка $\Delta\theta$, необходимая для эффективной ГВГ в кристалле KDP, составляет $-0,35^\circ$ [9].

В работе [9] было произведено исследование уширения вследствие возникновения само- и кроссвоздействия взаимодействующих волн первой и второй гармоник за счёт присутствия кубической нелинейности среды. Полученные спектры в результате преобразования для различных энергетик представлены на рисунке 4. Ширина спектра основного излучения на энергетике 2,7 мДж составила ~ 35 нм, в свою очередь ширина спектра второй гармоники ~ 8 нм. При увеличении энергетике почти в два раза ширина спектров увеличилась так же почти в два раза. Как результат, импульсы приобретают фазовую модуляцию и больше не являются спектрально ограниченными [9]. Нежелательно для дополнительной компрессии применять призмные компрессоры, из-за высокого риска оптического пробоя в стекле вследствие эффектов самофокусировки, а так же возникновение дополнительных нелинейных эффектов для пучков с высокой интенсивностью. Таким образом, компенсацию фазовой самомодуляции необходимо производить на чирпирующих зеркалах с аномальной дисперсией. Недостаток такого метода: плохое качество пучка (однородность, расходимость) и плохой временной контраст при фазовой самомодуляции ФСМ.

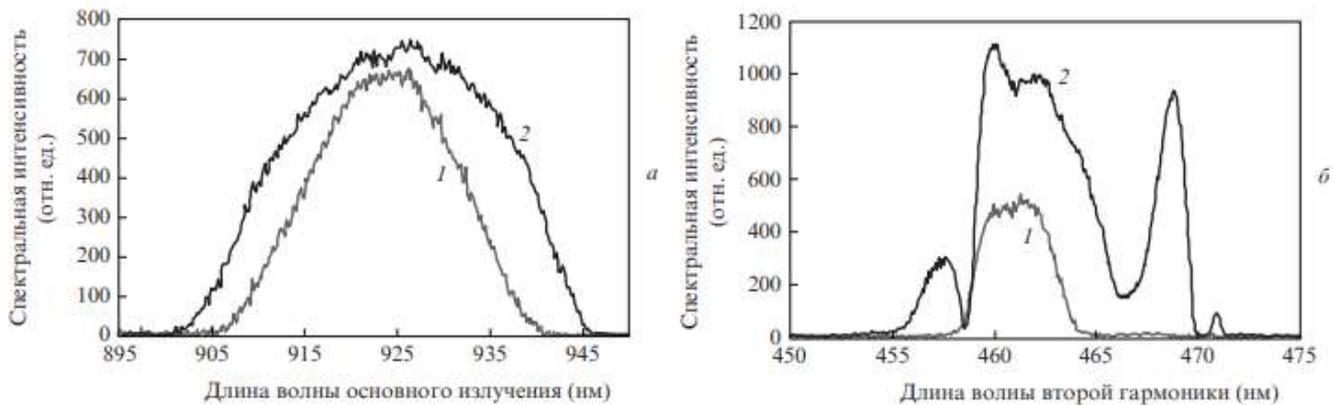


Рисунок 4 – Характерные спектры излучения первой гармоники до входа в нелинейный кристалл (а) и соответствующие им спектры излучения второй гармоники, полученной в кристалле KDP толщиной 1 мм (б), при энергии излучения первой гармоники на входе в кристалл 2,7 (1) и 4,7 мДж (2). Значения В-интеграла для излучения второй гармоники составляют 2,2.(1) и 3,7 (2) [9]

Отдельный интерес в работе [9] вызывает анализ зависимости KDP преобразования ВГ в KDP кристаллах различной толщины. Так для кристалла толщиной 1 мм KDP преобразования составило 73 % при пиковой интенсивности 2 ТВт/см^2 , на кристалле толщиной 0,5 мм удалось достичь лишь 50 %-го преобразования во ВГ с плотностью потока $3,5 \text{ ТВт/см}^2$.

Теоретические расчёты показывают возможность дополнительного уширения импульсов с последующей их компрессией методом газонаполненного капилляра с 70 до 20 фс [9].

Интересные результаты были получены в работе [16]. Входной импульс лазера PEARL с энергией 18 Дж и длительностью импульса около 60 фс был сжат до 10 фс после прохождения через кристалл KDP толщиной 4 мм и отражение на двух чирпированных зеркалах с суммарной дисперсией -200 фс^2 . Эксперименты проводились для значений В-интеграла в диапазоне от 5 до 19 без видимых повреждений оптических элементов, что указывает на

то, что мелкомасштабная самофокусировка не стала серьезной проблемой. Показано, что в силу малой дисперсии групповой скорости, кристалл KDP имеет некоторые преимущества перед тем же силикагелем: больший коэффициент сжатия импульса, особенно на малое значение В-интеграла ($B = 5, \dots, 9$), меньшие абсолютные значения дисперсии chirпированных зеркал, а также возможность контролировать величину нелинейности и дисперсии, изменяя ориентацию кристалла, что было описано выше.

Больше всего интересует график зависимости длительности выходящего после компрессии импульса от обратной дисперсии для уширения в двух различных средах с разной толщиной: KDP кристалле и кристалле кварца. Наикротчайший полученный импульс был получен при использовании KDP кристалла толщиной 5 мм со значением В-интеграла от 5 до 9 (рис.5) [16].

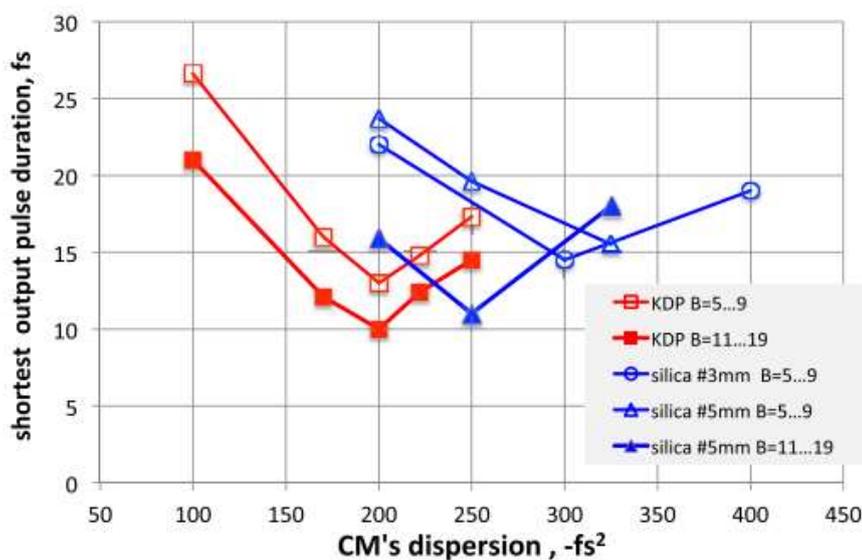


Рисунок 5 – Экспериментально полученные минимальные значения длительности импульсов τ_{out} для KDP ($L=4$ мм), кварца ($L=5$ мм) и кварца толщиной $L=3$ мм при двух различных диапазонах значений В-интеграла [16]

В той же работе [16] рассмотрены зависимости фактора компрессии выходного импульса от входных параметров системы с демонстрацией фактора компрессии (рис.6).

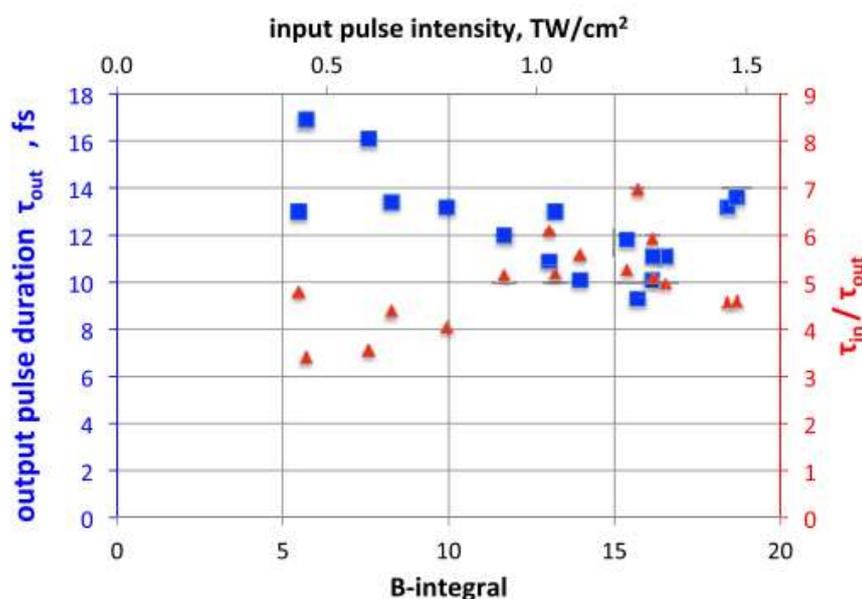


Рисунок 6 – Выходная длительность импульса τ_{out} (синим) и фактора компрессии импульса $F_{\tau} = \tau_{in}/\tau_{out}$ (красным) при значениях отрицательной дисперсии -200 фс^2 ; $\tau_{in} = 55, \dots, 67 \text{ фс}$ [16]

Пиковая мощность для сжатого импульса $\tau_{out} \approx 10 \text{ фс}$ составила 1,5 ПВт (результат с учётом возможных потерь на периферии). Несмотря на разброс значений, исследователи утверждают, что при заданных значениях отрицательной дисперсии существует оптимальное значение В-интеграла (порядка 15), при котором коэффициент компрессии максимален, а длительность импульса минимальна.

1.2 Сокращение длительности импульса второй гармоники за счет дополнительного уширения спектра в нелинейном кристалле

В данном параграфе хотелось бы разобрать статью авторов из ИСЭ СО РАН [11]. В этой статье получены результаты по уширению спектра ВГ в

нелинейном кристалле KDP и его компрессии с целью усиления полученного пучка в мощном эксимерном усилителе XeF(C-A).

При этом был выбран метод уширения спектра ВГ при невысоких интенсивностях излучения накачки нелинейного кристалла. В одном случае уширение спектра ВГ создавалось за счет нарушения угла фазового синхронизма между обыкновенной и необыкновенной волной в нелинейном кристалле. Во втором случае импульсу излучения на основной гармонике с спектрально ограниченной длительностью 60-70 фс обеспечивался положительный или отрицательный чирп в выходном компрессоре лазерного комплекса. Затем данный импульс преобразовывался в KDP кристалле во вторую гармонику (475 нм) и сжимался в компрессоре с противоположной дисперсией групповых скоростей (ДГС). В этом случае при компрессии отрицательно чирпированного импульса ВГ с длительностью 700 фс была получена длительность 29 фс.

В табл.1 представлены полученные значения энергии ВГ и эффективности для различных энергий накачки импульса с длительностью 700 фс (отрицательная ДГС порядка -40000 фс^2). Как можно заметить, эффективность варьируется от 10 до 27,7 %.

Таблица 1 – Эффективность ВГ импульса длительностью 700 фс

$E_{OG}, \text{ мДж}$	10	13	17	21	26	30
$E_{VG}, \text{ мДж}$	0,98	1,9	3	4,7	6,1	8,3
$\eta, \%$	9,3	14,6	17,6	22,4	23,5	27,7

Изучение влияния интенсивности и знака чирпа накачки, имеющего в своём составе компонент ВГ, показали, что наиболее стабильный спектральный контур был получен при слабом положительном чирпе. Избыток положительной дисперсии около 4000 фс^2 увеличивает ширину спектра на полувысоте более, чем в два раза (рис.7) с 5,2 до 11 нм. В эксперименте, спектрально ограниченная длительность импульса ВГ была 66 фс, в то время как чирпированный импульс равнялся 107 фс. В данном

случае, во время компрессии импульса на паре призм полученная длительность составила порядка 35 фс [11].

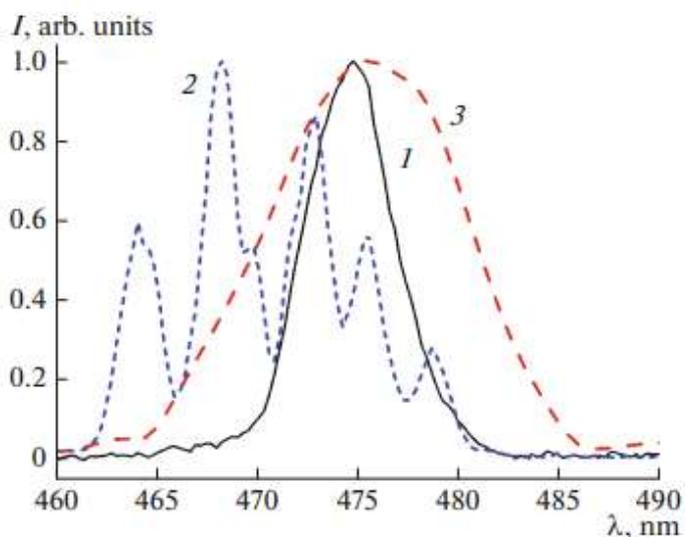


Рисунок 7 – Спектр импульса излучения ВГ: (1) спектрально ограниченный импульс, (2) отрицательно chirпированный импульс, (3) импульс, полученный в результате изменения угла фазового синхронизма [11]

Во многих случаях уширение спектра сопровождалось появлением коротковолновой компоненты спектра. Тем временем, структура спектра сильно варьировалась в зависимости от значения chirпа. Модуляция интенсивности в спектральном контуре второй гармоники есть результат деструктивной интерференции (рис.7, кривая 2), где форма импульса нестабильна и наблюдаются несколько кратковременных пиков. Рисунок 8 демонстрирует примеры импульсов, полученных с длительностью около 25-30 фс [11].

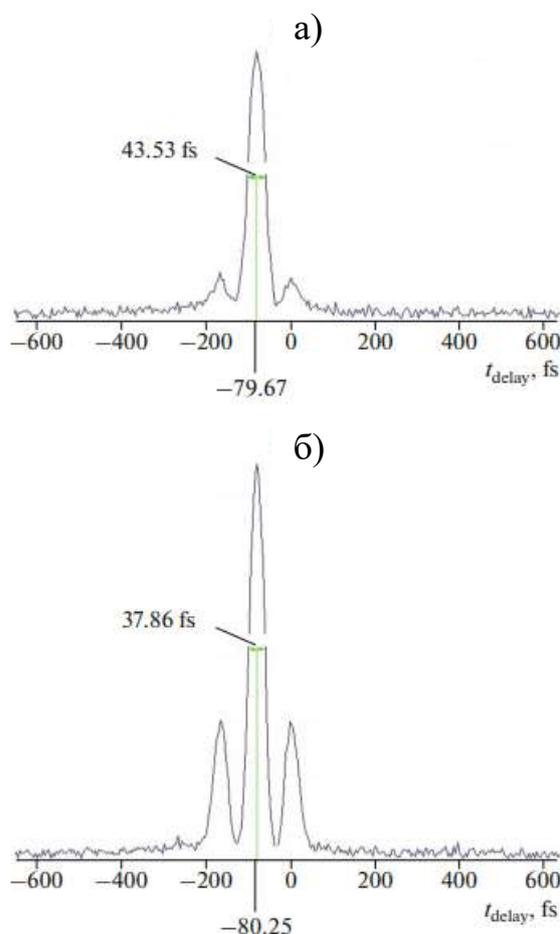


Рисунок 8 – Автокорреляционная функция импульса излучения ВГ в эксперименте с отрицательным чирпом и фундаментальной частотой: (а) 30,8 фс, (б) 26,8 фс [11]

При исследовании возможности уширения спектра ВГ за счет расстройки угла фазового синхронизма одного KDP кристалла толщиной 1,8 мм было показано, что ширина спектра может почти удвоиться (рис.7 кривая 3), с 5,2 до 11,5 нм. С небольшим наклоном двух кристаллов спектральная композиция может быть скорректирована за счёт коротковолновых или длинноволновых компонент спектра (рис.9). Один кристалл в данном случае настроен на коротковолновый диапазон спектра, пока другой кристалл настроен на длинноволновую область спектра. Энергия ВГ уменьшается практически вдвое при уширении спектра. Максимум полученной энергии ВГ был равен 2 мДж.

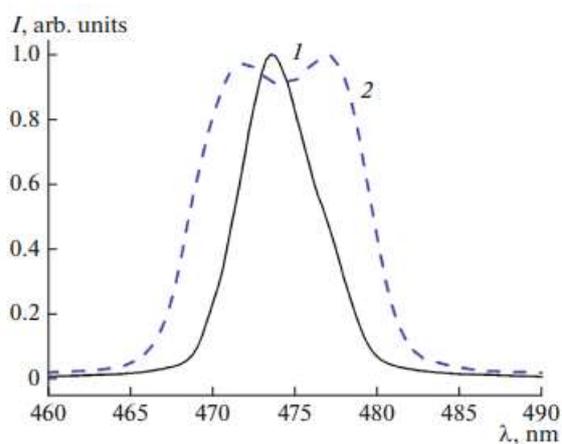


Рисунок 9 – Спектры (1) изначального и (2) уширенного импульсов ВГ, полученные в двух кристаллах KDP на основной частоте, с длительностью импульса 100 фс [11]

Вывод по разделу

Анализ литературы показал, что наиболее подходящим методом дополнительного уширения спектра ВГ для последующей компрессии является уширение в процессе преобразования основного излучения во вторую гармонику при умеренной интенсивности накачки (50-100 ГВт/см²) на нелинейном кристалле.

Применение газонаполненного капилляра в нашем случае не применимо, вследствие того, что в экспериментах [3] используется иттербиевый волоконный лазер, пространственные характеристики пучка которого выше твердотельных аналогов, то без ощутимых потерь введения нашего пучка в капилляр выступит отдельной сложной задачей.

Интерес для построения плана эксперимента представляет работа [16], в которой были получены зависимости выходной длительности импульса от В-интеграла для различных сред и форм пространственного распределения пучка. В работе заключено, что возможность получения минимальной длительности импульса ($\tau_{out} \approx 10$ фс) явилось возможным при использовании KDP кристалла с толщиной 5 мм для пучков, форма

распределения которых близка к гауссовым. Однако при этом требуется решать задачу по улучшению качества пучка.

Из предшествующих работ лаборатории газовых лазеров в ИСЭ СО РАН и литературных данных делаем вывод о перспективах исследования уширения спектров импульсов излучения с применением двух KDP кристаллов, отстроенных по отдельности на длинноволновую и коротковолновую области спектра, за счет отстройки угла синхронизма для одного кристалла, либо использования небольшого положительного чирпа основной частоты. В таком случае есть перспектива работать с вдвое уширенным спектром относительно изначального при сохранении высокого качества пучка ВГ.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном разделе будет производиться оценка перспективности финансового и коммерческого развития итогового продукта, а так же его конечная ценность в рамках исследовательской программы.

В раздел включены такие этапы анализа, как:

- Оценка коммерческого потенциала разработки;
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчёт бюджетного научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Основным продуктом научно-исследовательской работы является методика уширения фемтосекундных импульсов с применением двух нелинейных KDP кристаллов за счёт симметричного фазового синхронизма. Для получения максимальных плотностей потока в пучке необходимо добиться максимально возможного сокращения длительности импульса, так же требуется сохранить спектральную ограниченность импульса для должного контроля уширения.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

При оценке основных методик уширения были рассмотрены два основных конкурентных метода уширения:

- Метод контроля фемтосекундных импульсов FemtoControl от компании APE;
- Метод уширения УКИ в пластинках и плавленого кварца от Института прикладной физики РАН на лазерном комплексе PEARL.

Разберём достоинства и недостатки каждого из приведённых выше методов. В таблице 4.1 показано сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4.1 – Сравнение конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	4	4	5	0,8	0,8	1
2. Надежность	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
3. Безопасность	0,05	5	4	5	0,25	0,2	0,25
4. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
5. Простота эксплуатации	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
6. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,05	3	4	3	0,15	0,2	0,15
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена	0,2	4	4	5	0,8	0,8	1
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,15	5	3	5	0,75	0,45	0,75
3. Послепродажное обслуживание	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
Итого	1				4,1	3,85	4,2

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

Выводы:

- по техническим критериям рассматриваемый метод незначительно уступает только методике уширения от Института прикладной физики РАН;
- по экономическим критериям не уступает ни одному из методов.

4.1.2 SWOT-анализ

Для детального анализа сильных и слабых сторон проекта, его возможностей и угроз, а так же оценки внешней и внутренней среды проекта.

На первом этапе составим матрицу SWOT (табл.4.2).

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
<p>С1. Низкая стоимость компонентов</p> <p>С2. Сравнительно малые габаритные размеры</p> <p>С3. Работа в маломощном режиме</p> <p>С4. Наличие информационных ресурсов по данной теме</p> <p>С5. Довольно быстрая подготовка экспериментального оборудования</p>	<p>Сл1. Тонкая настройка положения кристаллов относительно друг друга</p> <p>Сл2. Уширение только для длительностей менее сотен пикосекунд</p> <p>Сл3. Вероятность разрушения кристаллов</p> <p>Сл4. Необходима высокая точность юстировки и стабильность задающего лазера</p>

Продолжение таблицы 4.2

Возможности	Угрозы
В1. Возможность производить уширение для обеих ветвей спектра импульса	У1. Увеличение стоимости импортных компонентов
В2. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ и ИСЭ СО РАН.	У2. Снижение стоимости разработок конкурентов
В3. Появление потенциального спроса на новые разработки.	

Далее составим интерактивные матрицы возможностей и угроз. На основании данных матриц оценим эффективность проекта и надёжность её реализации. Ряд интерактивных матрицы приведён ниже в таблицах 4.3 – 4.6. Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	-	+	-	-
	B2	-	-	+	-	-
	B3	0	+	+	0	-

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	+	-	-	+
	B2	-	-	-	+
	B3	-	+	+	-

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	+	0	0	-	-
	У2	0	-	-	-	-

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	-	-	+	-
	У2	-	-	-	-

Результаты анализа интерактивных матриц представлены в итоговой таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>С1. Низкая стоимость компонентов</p> <p>С2. Сравнительно малые габаритные размеры</p> <p>С3. Работа в маломощном режиме</p> <p>С4. Наличие информационных ресурсов по данной теме</p> <p>С5. Довольно быстрая подготовка экспериментального оборудования</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>Сл1. Тонкая настройка положения кристаллов относительно друг друга</p> <p>Сл2. Уширение только для длительностей менее сотен пикосекунд</p> <p>Сл3. Вероятность разрушения кристаллов</p> <p>Сл4. Необходима высокая точность юстировки и стабильность задающего лазера</p>
<p>Возможности</p> <p>В1. Возможность производить уширение для обеих ветвей спектра импульса</p> <p>В2. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ и</p>	<p>Направления развития</p> <p>В3С2. Малые габариты могут заинтересовать производителей тем, что технологию можно будет выводить на коммерческий уровень и, соответственно, привлечёт дополнительный интерес.</p> <p>С3В1В2В3. Возможность</p>	<p>Сдерживающие факторы</p> <p>Сл1Сл4В1. Необходимость точной фокусировки ограничивает применение этого метода для ряда организаций, за то даёт преимущества для исследователей ИСЭ РАН.</p> <p>Сл2В3. Сдерживающий</p>

<p>ИСЭ СО РАН.</p> <p>В3. Появление потенциального спроса на новые разработки.</p>	<p>работы в маломощном режиме так же позволяет проявить интерес сообщества к данному исследованию, нет необходимости использовать дополнительные средства защиты. Есть возможность развивать прикладные области.</p>	<p>фактор в диапазоне уширения может возбудить новые исследования по составным технологиям.</p> <p>СЛ2В3. Нелинейные кристаллы со временем деградируют и разрушаются, для нивелирования данного недостатка необходимы исследования в сфере выращивания кристаллов</p>
<p>Угрозы</p> <p>У1. Увеличение стоимости импортных компонентов</p> <p>У2. Снижение стоимости разработок конкурентов</p>	<p>Угрозы развития</p> <p>У1С1. На данный момент наше исследование не затрачивает денег больше, чем у конкурентов, но будут появляться всё новые исследования, которые станут более привлекательными по ценовой политике.</p>	<p>Уязвимости:</p> <p>У1Сл3. Инвестиции в производство отечественных компонентов и, соответственно, удешевление их стоимости</p>

SWOT-анализ проекта показал, что он обладает большим потенциалом и превосходит конкурентов по возможностям дальнейшего развития. Так же было выявлено то, как можно компенсировать слабые стороны проекта за счет его возможностей и нейтрализовать угрозы с помощью сильных сторон проекта. Результаты SWOT анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

В рамках данного раздела необходимо так же распланировать комплекс научно-исследовательских работ. Для этого произведём определение структуры работы, определим количество исполнителей для каждой из работ, установим продолжительность работ, построим график проведения научных исследований.

Применять будем метод линейного планирования и управления. Этот метод позволяет в достаточной мере оптимизировать план работ.

Результатом планирования выступает в данном случае линейный график выполнения работ. Порядок выполнения этапов работ и распределение исполнителей для выполнения НИР приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения НИР	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель
	6	Подготовка и настройка оборудования	Инженер, научный руководитель
	7	Проведение эксперимента	Инженер

Продолжение таблицы 4.8

Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер
	9	Оценка правильности полученных результатов	Научный руководитель, инженер
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление пояснительной записки	Инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения НИР

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожi}$ используется формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{минi} + 2t_{маxi}}{5}, \quad (4.2)$$

где $t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел. – дн.; $t_{минi}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел. – дн.; $t_{маxi}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел. – дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{ч_i}, \quad (4.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.; $t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел. – дн; $ч_i$ –

численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Следующим этапом, для последующего удобства построения диаграммы Ганта, необходимо перевести рабочие дни в календарные по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; T_{pi} – рассчитанная выше продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях; $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Таким образом, первоначально для расчёта необходимо определить коэффициент календарности. Сделать это можно по формуле ниже:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Все необходимые данные нам известны, так что в результате получаем:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1.48. \quad (4.6)$$

Все временные показатели проведения НИР занесены в таблицу 4.9 (T_{ki} необходимо округлить до целого числа).

Таблица 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{\text{ожг}}$, чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	4	-	8	-	5.6	-	5.6	8
2. Календарное планирование выполнения НИР	1	2	3	5	1.8	3.2	2.5	4
3. Обзор научной литературы	-	10	-	15	-	12	12	18

4. Выбор методов исследования	-	6	-	10	-	7.6	7.6	11
5. Планирование эксперимента	3	5	6	9	4.2	6.6	5.4	8
6. Подготовка и настройка оборудования	1	1	2	2	1.4	1.4	1.4	2
7. Проведение эксперимента	-	5	-	8	-	6.2	6.2	9
8. Обработка полученных данных	-	10	-	16	-	12.4	12.4	18
9. Оценка правильности полученных результатов	3	4	6	7	4.2	5.2	4.7	7
10. Составление пояснительной записки	-	10	-	12	-	10.8	10.8	16
ИТОГО	8	53	25	84	17.2	65.4	68.6	101

Примечание: Исп.1 – научный руководитель, Исп.2 – инженер.

На основании таблицы 4.9 построим календарный план-график выполнения НИР с применением диаграммы Ганта (Табл. 4.10)

Таблица 4.10 – Календарный план-график проведения НИОКР

№	Вид работ	Исп.	T _{Ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				февр.		март			апрель			май			июнь			
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп.1	8	2	3													
2	Календарное планирование выполнения НИР	Исп.1, Исп.2	4	2	3													
3	Обзор научной литературы	Исп.2	18			1	2	3										
4	Выбор методов исследования	Исп.2	11				1	2	3									
5	Планирование эксперимента	Исп.1, Исп.2	8						1	2	3							
6	Подготовка и настройка оборудования	Исп.1, Исп.2	2							1	2							
7	Проведение эксперимента	Исп.2	9								1	2	3					
8	Обработка полученных данных	Исп.2	18											1	2	3		
9	Оценка правильности полученных результатов	Исп.1, Исп.2	7													1	2	
10	Составление пояснительной записки	Исп.2	16														1	2

 – руководитель  – инженер

4.3 Бюджет научно-технического исследования

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям: материальные затраты НТИ:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты — это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

Данная часть включает затраты всех материалов, используемых при исследовании свойств уширения в нелинейных кристаллах.

Таблица 4.11 – Материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование статей	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Ацетон	л.	10	192	1920
Салфетки для очистки оптики MC-5	шт.	10	2149	21490
Конверты для оптики BAG10GL	шт.	5	1094	5470
Оптический пинцет из нейлона TZ2	шт.	2	1094	3188

Продолжение таблицы 4.11

Ватные палочки СТА-10	шт.	10	924	9240
Перчатки «Fotokvant GLOVES-01»	пар.	10	360	3600
Итого:				44908

4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

- 1) Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.7)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

- 2) Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_{AI}}{12} \cdot m, \quad (4.8)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Таблица 4.12 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	H_A , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Одноимпульсный автокоррелятор ASF-20-480	1	10	0.1	10	380000	317
2	Измеритель фазовых характеристик модели SPIDER SPIDER SP-120	1	10	0.15	10	650000	813

Продолжение таблицы 4.12

3	Нелинейный KDP кристалл	2	20	0.15	5	160000	100
4	Лазер VERDY-8	1	15	1	6,7	4000000	22333
Итого:		23563 руб.					

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.9)$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается для шестидневной рабочей недели по формуле (для руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{62127 \cdot 10,3}{246} = 2601,3 \text{ руб.}, \quad (4.10)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11.2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10.3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя младшего научного сотрудника):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{27545 \cdot 11,2}{213} = 1448,4 \text{ руб.} \quad (4.11)$$

Должностной оклад работника за месяц:

- для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}}) \cdot k_p = 36762 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 62127 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

- для инженера:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}}) \cdot k_p = 16299 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 27545 \text{ руб.} \quad (4.13)$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.13 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{\text{тс}}, \text{руб}$	$k_{\text{пр}}$	k_p	$Z_{\text{м}}, \text{руб}$	$Z_{\text{дн}}, \text{руб}$	$T_p, \text{раб.дн.}$	$Z_{\text{осн}}, \text{руб}$
Руководитель	36762	0.3	1.3	62127	2601.3	17.2	44742.4
м.н. сотрудник	16299	0.3	1.3	27545	1448.4	65.4	94725.4
Итого:							139467.8

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

- для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0.15 \cdot 44742.4 = 6711.36 \text{ руб.}$$

- для инженера:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0.15 \cdot 94725.4 = 14208.81 \text{ руб.}$$

Где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

- для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб}(З_{осн} + З_{доп}) = 0.3 \cdot (44742.4 + 6711.36) = 15436.13 \text{ руб.}$$

- для м. н. сотрудника:

$$З_{внеб} = 0.3 \cdot (94725.4 + 14208.8) = 32680.26 \text{ руб.}$$

Где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2022 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д.

Величина накладных расходов определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{нр}$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице 4.15 и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 4.15 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
23563	44908	139467.8	20920.2	48116.4	276975.4

Таким образом, накладные расходы составляют:

$$Z_{\text{накл}} = 276975.4 \cdot 0.2 = 55395.1 \text{ руб.}$$

4.3.6 Формирование бюджета затрат НИР

В данном параграфе, наконец, произведём сводку бюджета затрат НИР по трём различным вариантам исполнения (табл. 4.16). Итоговая рассчитанная величина является ключевой для формирования бюджета при формировании договора с заказчиком.

Таблица 4.16 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3	
1	Материальные затраты НИР	44908	42680	50448	Пункт 4.3.1
2	Затраты на специальное оборудование	23563	23563	30489	Пункт 4.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	139467.8	139467.8	139467.8	Пункт 4.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	20920.2	20920.2	20920.2	Пункт 4.3.3

Продолжение таблицы 4.16

5	Отчисления во внебюджетные фонды	48116.4	48116.4	48116.4	Пункт 4.3.4
6	Накладные расходы	55395.1	54949.48	57888,28	Пункт 4.3.5
Бюджет затрат НИР		332370.5	329696,9	347329,7	Сумма ст. 1- 6

4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где Φ_{pi} - стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} - максимальная стоимость исполнения научно исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

В качестве аналогов данной НИР рассмотрены:

- Реализация уширения и последующей компрессии импульсов на волоконном лазере посредством газонаполненного капилляра;
- Укорочение длительности фемтосекундных импульсов за счёт процесса преобразования во вторую гармонику одним KDP кристаллом и последующей компрессии на зеркалах с обратным чирпом.

Непосредственно произведём расчёт интегрального финансового показателя для трёх разработок, основываясь на данных из таблицы 4.16.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр.}} = \frac{332370,5}{347329,7} = 0,96$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{329696,9}{347329,7} = 0,94;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{347329,7}{347329,7} = 1.$$

По результатам расчёта делаем вывод о том, что с точки зрения финансовой эффективности текущий проект несколько отстаёт от варианта во втором исполнении.

Далее рассчитаем интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения НИР (I_{pi}) определяется путём сравнительной оценки их исполнения, распределённых с учётом весового коэффициента для каждого из важных параметров (Табл. 4.17).

Таблица 4.17 - Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования / Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Безопасность при использовании установки	0.2	4	4	5
2. Стабильность работы	0.3	4	3	5
3. Оптические параметры выходного пучка	0.3	5	3	4
4. Материалоёмкость	0.2	4	5	3
ИТОГО	1	4,3	3,6	4,3

Расчёт интегрального показателя для текущего проекта и ещё двух вариантов исполнения:

$$I_{p1} = 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,2 = 4,3;$$

$$I_{p2} = 4 \cdot 0.2 + 3 \cdot 0.3 + 3 \cdot 0.3 + 5 \cdot 0.2 = 3.6;$$

$$I_{p3} = 5 \cdot 0.2 + 5 \cdot 0.3 + 4 \cdot 0.3 + 3 \cdot 0.2 = 4.3.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{pi}}{I_{\text{финр}}};$$

$$I_1 = \frac{4.3}{0.96} = 4.48;$$

$$I_2 = \frac{3.6}{0.94} = 3.8;$$

$$I_3 = \frac{4.3}{1} = 4.3.$$

Окончательное сравнение эффективности каждого из вариантов НИР по интегральным показателям произведём в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,96	0,94	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,3	3,6	4,3
3	Интегральный показатель эффективности	4.48	3.8	4,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0.85	0,96

На основании данных из таблицы 4.18 можно сделать выводы об эффективности текущего исполнения проекта в сравнение с аналогами. Анализ показал, что текущий проект превосходит аналоги по среднему

интегральному показателю и лишь немного уступает одному из вариантов по финансовому интегральному показателю. Следовательно, проект является более привлекательным и эффективным для заказчика вследствие высокого показателя ресурсоэффективности.