

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.03.02 Опотехника
 Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Лазерная установка для зажигания энергетических материалов

УДК 621.373.826:662.58

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В51	Журавлева Дарья Валерьевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов Сергей Александрович	к.ф. – м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Форат Егор Викторович	–		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко Валентин Сергеевич	–		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	–		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов Сергей Александрович	к.ф. – м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические, гуманитарные, общепрофессиональные знания в области оптотехники
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области световой, оптической и лазерной техники, оптического и светотехнического материаловедения и оптических и светотехнических технологий
P3	Применять полученные знания для решения задач, возникающих при эксплуатации новой техники и технологий оптотехники
P4	Владеть методами и компьютерными системами проектирования и исследования световой, оптической и лазерной техники, оптических и светотехнических материалов и технологий
P5	Владеть методами проведения фотометрических и оптических измерений и исследований, включая применение готовых методик, технических средств и обработку полученных результатов
P6	Владеть общими правилами и методами наладки, настройки и эксплуатации оптической, световой и лазерной техники для решения различных задач
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Проявлять творческий подход при решении конкретных научных, технологических и опытно-конструкторских задач в области оптотехники
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности
P9	Уметь эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научной, педагогической и производственной деятельности
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

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 (специальность) 12.03.02 «Оптотехника»
 Отделение школы (НОЦ) материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ С.А.Степанов
 (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
4В51	Журавлева Дарья Валерьевна

Тема работы:

Лазерная установка для зажигания энергетических материалов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	21.05.2019г. №4034/с

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>Лазерный исследовательский комплекс на основе неодимового лазера импульсного действия, применяемый для исследования процессов лазерного зажигания энергетических материалов. Лазерное излучение должно обладать высокой однородностью, быть регулируемым по времени и энергии.</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>В работе должны быть отражены результаты литературного анализа по следующим вопросам: принцип работы и устройство лазера, преобразование излучения оптическими системами, принципы измерения параметров лазерного излучения. Работа направлена на оценку применимости лазерного комплекса к изучению процессов зажигания энергетических материалов, тем самым необходимо выявить основные требования к подобным системам и провести сравнение характеристик комплекса с требуемыми. В этой связи, необходимо провести серию различных измерений основных характеристик лазерного комплекса.</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Николаенко Валентин Сергеевич</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Скачкова Лариса Александровна</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>28.09.2018</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов Сергей Александрович	к.ф.– м.н.		
Ассистент	Форат Егор Викторович	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В51	Журавлева Дарья Валерьевна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4В51	Журавлева Дарья Валерьевна

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ЛиСТ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Оптотехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Определение стоимости ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых информационных и человеческих
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Знакомство и отбор норм и нормативов расходования ресурсов
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Знакомство с системой налогообложения, со ставками налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение ресурсной, финансовой, экономической составляющей

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. График проведения и бюджет НИ
2. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко Валентин Сергеевич	—		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В51	Журавлева Дарья Валерьевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4В51	Журавлевой Дарье Валерьевне

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	12.03.02 «Оптотехника»

Тема ВКР:

Лазерная установка для зажигания энергетических материалов

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Лазерная установка для исследования процессов зажигания. Разработка и анализ вариантов ее модернизации и практическое применение для процессов зажигания. Областью применения является ракетостроение, горновзрывные работы, военное дело.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	- ТК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019) - ГОСТ 12.2.032-78
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– Отклонение температуры и влажности воздуха от нормы; – Высокий уровень шума; – Воздействие электрического тока на человека
3. Экологическая безопасность:	– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – наличие отходов.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Планирование защиты населения и территорий от ЧС на уровне предприятия (организации); – Создание запасов средств индивидуальной защиты и поддержание их в готовности; – Выявление угроз пожара и оповещение персонала; – Подготовка работающих к действиям в условиях ЧС; – Подготовка и поддержание в постоянной готовности сил и средств для ликвидации ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	—		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В51	Журавлева Дарья Валерьевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 94с., 39 рис., 14 табл., 22 источников, 0 прил.

Ключевые слова: лазер, энергетические материалы, оптическая накачка, генерация, резонатор

Объектом исследования является лазерная установка для зажигания энергетических материалов.

Цель работы – Изучить возможность применения исследуемой лазерной установки для зажигания энергетических материалов.

В процессе работы проводилось исследование зависимости энергии генерации лазера от напряжения накачки и КПД лазера от напряжения накачки, создана методика контроля энергии излучения на облучаемом образце, изучался способ преобразования лазерного пучка, рассчитывалась угловая расходимость лазерного излучения, изучался способ изменения длительности лазерного излучения, исследовалось распределение энергии в пучке на поверхности образца.

В результате исследования были сделаны выводы о возможности применения исследуемой лазерной установки для зажигания энергетических материалов.

Степень внедрения: результаты проделанной работы будут использоваться в дальнейшем для изучения энергетических материалов.

Область применения: фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом

В будущем планируется улучшить установку, с помощью модификации электрической схемы накачки с целью достижения прямоугольного импульса, кроме этого, на установке планируется достижение одномодового, одночастотного режима.

Оглавление

Введение	10
1. Обзор литературы	12
1.1 Принцип работы лазера.....	12
1.2 Активные элементы твердотельных лазеров	16
1.3 Оптический резонатор.....	20
1.4 Оптическая накачка	21
1.5 Электрическая схема оптического квантового генератора	30
2. Методика исследования	32
2.1 Описание экспериментальной установки.....	33
2.2 Описание приборов	35
3. Результаты исследования.....	42
3.1 Исследование зависимости энергии генерации лазера от напряжения накачки и КПД лазера от напряжения накачки.	42
3.2 Определение коэффициента деления	48
3.3 Исследование осциллограмм лазерной генерации в резонаторе с линзой и без линзы.....	50
3.4 Исследование проекционной схемы	51
3.5 Расчет угловой расходимости лазерного излучения.....	54
3.6 Изучение кинетики лазерного излучения	55
3.7 Исследование распределения энергии в пучке на поверхности образца	58
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	61
5. Социальная ответственность	77
Заключение	90
Список используемых источников.....	92

Введение

Процессы горения конденсированных веществ представляют огромный практический интерес, данные процессы применяются в огнестрельном оружии разных типов, в пиротехнических изделиях, электродетонаторах при взрывных работах и т.д.

Наряду с практическим значением вопросы горения энергетических материалов представляют большой теоретический интерес. Исследуя процессы горения возможно изучать течение химических реакций в экстремальных условиях (при высоких давлениях и температурах).

Применение лазерного инициирования горения и взрыва энергетических материалов позволило бы значительно удешевить взрывные работы и сделать их безопаснее благодаря помехоустойчивости, что является огромным преимуществом оптических систем над электрическими системами инициирования.

Подвод лазерного излучения к взрывчатым веществам выгоднее всего производить с помощью оптических волокон, поскольку с их помощью возможно подводить излучение в труднодоступные места.

Твердотельные лазеры (например Nd: YAG) широко используются в данных научных исследованиях, поскольку они обладают большой мощностью излучения в широком интервале длительностей импульсов, а также могут иметь минимальные размеры по сравнению с другими видами лазеров.

Целью данной работы является – изучение возможности применения исследуемой лазерной установки для зажигания энергетических материалов.

Для того, чтобы исследуемая лазерная установка применялась для изучения процессов горения конденсированных веществ необходимо, чтобы она соответствовала следующим требованиям:

- Возможность регулировки энергии излучения

- Возможность регистрации нескольких параметров одновременно (кинетика излучения лазера, энергия лазерного излучения, сигнал с образца)
- Возможность изменения диаметра пучка на образце
- Возможность изменять длительность излучения лазера
- Лазерное излучение должно иметь однородное распределение энергии в пучке на поверхности образца

В процессе данной работы изучалось каждое из требований на исследуемой установке.

Результаты исследований могут быть применены в горнодобывающей промышленности, ракетно-космических технологиях и т.д.

1 Обзор литературы

1.1 Принцип работы лазера

В любом твердом, жидком или газообразном теле молекулы и атомы движутся, колеблются вращаются. В атомах переходят между орбитами электроны, обмениваясь при этом энергией [1].

Квантовая теория излучения утверждает, что энергия колебаний атома или молекулы равна $h\nu, 2h\nu$ и т.д. То есть не существует колебаний с промежуточной энергией между $h\nu$ и $2h\nu$. Энергия не является непрерывной, она существует в строго определенных дискретных порциях. Минимальная порция энергии называется квантом энергии [2].

Энергия кванта равна:

$$E = h\nu,$$

где $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка;

ν – частота электромагнитного излучения, Гц.

Излучение – это поток элементарных частиц, которые называются фотонами.

Фотон обладает импульсом:

$$P = \frac{h\nu}{c},$$

где c – скорость света.

Это основные формулы в квантовой теории света, поскольку связывают энергию кванта света с частотой и длиной волны.

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где λ – длина монохроматической плоской волны.

Таким образом, фотон демонстрирует и свойства волны, и свойства частицы. Фотон является электромагнитной волной, когда размеры препятствия

сравнимы с длиной волны фотона. Если же размеры препятствия много меньше длины волны фотона, то он ведет себя как частица. Это явление носит название корпускулярно-волновой дуализм [1].

Как было сказано выше энергия принимает строго определенные значения, этим значениям энергии соответствуют энергетические уровни, на которых находятся атомы или молекулы. Атомы или молекулы с одного уровня на другой переходят скачкообразно. При этом происходит поглощение или излучение фотонов [3].

Фотон поглощается, когда атом переходит на более высокий энергетический уровень. Фотон испускается, когда атом переходит на низкий уровень.

Рассмотрим схему, состоящую из двух энергетических уровней. Энергию частиц, находящихся на нижнем уровне обозначим E_1 , на верхнем E_2 , причем E_2 больше, чем E_1 . Затем будем облучать систему фотонами с энергией $E_2 - E_1$. Частота такого света будет равна $\frac{E_2 - E_1}{h}$ [3].

Рассмотрим схему, состоящую из двух энергетических уровней.

Атом находится на нижнем энергетическом уровне E_1 , фотон с энергией $E_2 - E_1$, вызывает переход атома на уровень выше E_2 , этот процесс называется единичным актом поглощения (Рисунок 1). [3]

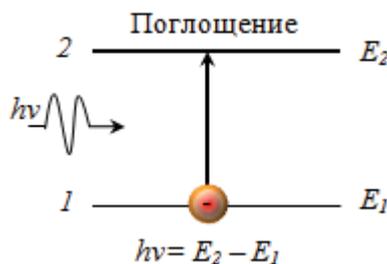


Рисунок 1 – Поглощение света

Атом находится на верхнем энергетическом уровне E_2 , под воздействием фотона с энергией $E_2 - E_1$ переходит на уровень E_1 . При этом появляется новый

фотон с энергией $E_2 - E_1$. Данный процесс называется вынужденное испускание света. Фотон с энергией $E_2 - E_1$ выступает в роли «спускового механизма» и вынуждает атом спуститься с верхнего уровня на нижний, при этом появляется новый (вторичный) фотон. Вторичный фотон – точная копия инициирующего, оба фотона имеют одинаковую энергию, импульс, фазу, поляризацию, направление распространения (Рисунок 2) [3].

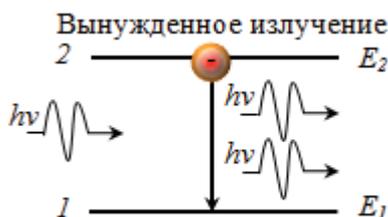


Рисунок 2– Вынужденное испускание света

Если представить, что на верхнем энергетическом уровне не один атом, а несколько. То первичный фотон будет инициировать переход с E_2 на E_1 во многих атомах. Таким образом, получится лавина фотонов с одинаковой энергией, одинаковым направлением.

Если атом находится на верхнем энергетическом уровне E_2 , но инициирующего фотона нет, то он может возвратиться на E_1 самопроизвольно. Этот процесс называется спонтанным испусканием света. Фотон, который при этом родится, будет иметь энергию $E_2 - E_1$, но направление его движения будет произвольное (Рисунок 3)

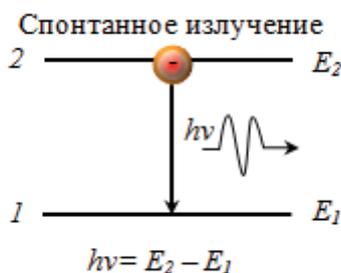


Рисунок 3– Спонтанное испускание света

Подводя итог можно сказать, что есть два процесса испускания света атомами и молекулами: вынужденное испускание и спонтанное. Вынужденное испускание - это управляемый процесс, поскольку инициирующий фотон, не только вызывает переход атома с верхнего уровня на нижний, но и определяет направление вторичного фотона. Спонтанное испускание не поддается управлению, так как моменты рождения фотонов случайны [3].

Всем известно, что излучение, проходя через вещество, ослабляется. Но есть такие ситуации, когда происходит наоборот.

Рассмотренный нами первый случай, когда количество атомов на нижнем уровне больше, чем на верхнем, чаще будут происходить акты поглощения фотонов и световой поток будет ослабляться.

Во втором случае, когда количество атомов на E_2 больше, чем на E_1 , чаще будут происходить акты вынужденного испускания фотонов. Этот случай называется инверсная населенность энергетических уровней, вынужденное испускание, преобладает над поглощением света, при таких условиях происходит усиление.

Для того, чтобы создать среду с инверсной населенностью, необходимо вспомогательное излучение, которое предварительно перекинет часть атомов с нижнего уровня на верхний. Инверсную населенность можно создавать не только вспомогательным излучением, но и другими методами, например, электрический разряд в газе, химическая реакция.

Чтобы получить генератор излучения, нужно обеспечить положительную обратную связь, благодаря которой вторичные фотоны будут вызывать последующие акты индуцированного излучения. Для осуществления положительной обратной связи используют систему, в простейшем случае, состоящую из 2х зеркал, поставленных друг на против друга, между которыми располагается среда. Одно из зеркал полупрозрачное, для того, чтобы луч лазера частично выходил из резонатора. Излучение, проходя через зеркала,

многократного отражается, что приводит к усилению электромагнитной энергии.

Характеристики лазерного излучения:

Узконаправленность, испускаются лишь те волны, которые распространяются вдоль оптической оси.

Монохроматичность, способность лазера излучать в узком диапазоне длин волн.

Пространственная когерентность, все волновые фронты являются плоскими и перпендикулярны направлению распространения волны.

Временная когерентность, сохранение фазового соответствия между волнами, которые испускаются в разные интервалы времени, поскольку излучение монохроматично.

Значительная выходная мощность, в излучении участвуют практически одновременно большое количество возбужденных частиц, а совпадение фаз отдельных колебаний приводит к значительному увеличению амплитуды выходной волны [1].

1.2 Активные элементы твердотельных лазеров

Активный элемент является «сердцем» лазера. Основу активного элемента твердотельных лазеров составляет матрица. Генерирующими центрами являются частицы - активаторы, введенные в матрицу. В качестве активных центров используются ионы переходных металлов, редкоземельных элементов (скандий, иттрий, церий, празеодим, неодим и т.д.), их энергетические уровни служат для создания инверсной населенности. Относительная концентрация активных частиц невелика, около единицы и доли процентов от полного числа атомов в среде. Сама матрица непосредственно не участвует в процессе, который приводит к генерации, но она определяет технические свойства активной среды.

Вещество матрицы должно удовлетворять следующим требованиям:

- Допускать введение и равномерное распределение активных ионов на переходах, на которых осуществляется генерация;
- Обладать химической стойкостью;
- Обладать оптической и механической прочностью;
- Быть прозрачным для излучения накачки и генерации;
- Выдерживать значительный нагрев, который возникает в процессе создания инверсии и генерации излучения;
- Обладать хорошей теплопроводностью;
- Обладать высокой фотохимической стойкостью.

Наиболее распространенные активные элементы твердотельных лазеров: рубин, различные сорта стекол, активированные трехвалентным неодимом, иттриево-алюминиевый гранат, активированный ионом неодима (YAG), вольфрам кальция, активированный неодимом [4].

Рубин – это кристалл Al_2O_3 в котором часть ионов Al^{3+} замещена ионами Cr^{3+} . Содержание хрома в рубине колеблется от 0.05%-5%. Рубин по сравнению со стеклом очень неоднороден. Также он поляризует излучение. Фотохимически устойчив. Обладает трехуровневой системой. Чувствителен к перегреву. Обладает высоким порогом накачки, так как нижний лазерный уровень соответствует основному состоянию и тем самым сильно заселен. Для того чтобы создать инверсную населенность, необходимо возбудить как минимум половину ионов Cr^{3+} , для этого нужны высокие мощности накачки, причем такие, чтобы спектр источника света совпадал со спектром поглощения ионов Cr^{3+} [5].

Рубиновые лазеры применяются менее широко, чаще применяются лазеры на основе Nd: YAG или лазеры на стекле с неодимом.

Рассмотрим иттриево-алюминиевый гранат, он представляет собой прозрачный кристалл, в качестве активных элементов выступают ионы неодима.

Преимущества иттриево-алюминиевого граната:

- Низкий порог генерации
- Высокое оптическое качество,
- Устойчивость к перепадам температур
- Хорошая теплопроводность
- Низкий порог генерации

На рисунке 4 показана упрощенная схема энергетических уровней иона неодима в гранате.

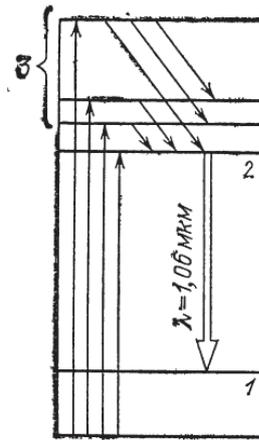


Рисунок 4 – Схема уровней иона неодима и квантовые переходы

Ионы неодима переходят на верхний энергетический уровень (на рисунке 4 обозначен цифрой 3), поглощая излучение лампы-накачки. На этом уровне они долго не задерживаются и спускаются на метастабильный уровень (на рисунке 4 обозначен цифрой 2), избыток энергии уходит на нагревание кристалла. Активный элемент будет готов к работе, когда количество ионов неодима на уровне 2 будет больше, чем на уровне 1. Лазерное излучение начнется, когда фотон, выступающий в качестве спускового механизма с энергией $E_2 - E_1$, вынудит ион неодима спуститься со второго уровня на первый. В результате возникнет лавина фотонов, которая и называется лазерным излучением.

На рисунке 5 схематически показано, как осуществляется возбуждение частиц. Цилиндрический активный элемент и цилиндрическая лампа-вспышки помещаются в корпус, покрытый слоем отражателя. Таким образом, вся световая

энергия, испускаемая лампой-вспышки, концентрируется на активном элементе
рисунок 6.

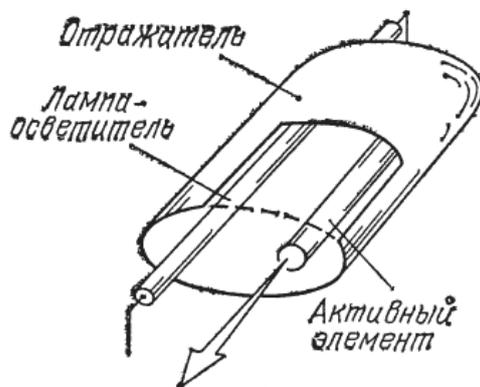


Рисунок 5 – Лазер на гранате с неодимом

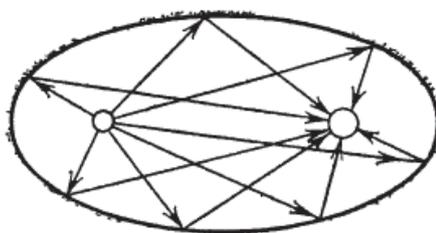


Рисунок 6 – Фокусировка световых лучей на активный элемент при помощи отражателя

Оптическая накачка производится светом для возбуждения активных центров. С помощью лампы–осветителя (непрерывная накачка) или с помощью мощных световых импульсов, генерируемых лампой вспышкой (импульсная накачка).

Чтобы появилось лазерное излучение, необходим первичный фотон, он инициирует вынужденное испускание вторичных фотонов и дает начало лазерной генерации. Первичный фотон появляется в результате спонтанного испускания света. Как было описано выше спонтанное излучение не согласованно по времени и направлению, чтобы его согласовать в схему вводят оптический резонатор, о нем будет рассказано в следующем пункте.

Рассмотрим неодимовое стекло.

Широко используемым в качестве матрицы активного элемента является стекло. Тело аморфного строения. Ионы неодима входят в стекло в качестве его компонента, они не внедряются в узлы решетки, как в кристаллической матрице, из-за этого допускается большее введение активных центров от 0.5 до 8 %. Силикатное стекло имеет наибольшее время жизни метастабильного состояния и наибольший квантовый выход люминесценции по сравнению с другими марками стекол. Так как неодимовые стекла лучше накапливают энергию, в силу больших объемов и высокой концентрации активатора, то это позволяет их использовать в импульсных лазерах с высокой выходной энергией.

Преимущества стекол:

- могут быть получены детали большей формы и размеров
- стекла имеют высокую оптическую однородность

Недостатки стекол:

- Низкая термостойкость и плохая теплопроводность
- Неоднородности температурного поля и термоупругие напряжения, так как излучение накачки неравномерно нагревает активный элемент, в силу низкой теплопроводности.
- Фотохимическая неустойчивость

1.3 Оптический резонатор

Оптический резонатор в простейшем случае представляет собой два зеркала с оптической осью. Оптическая ось фиксирует в пространстве направление лазерного луча. Активный элемент располагается внутри между зеркалами. На рисунке 7 представлена схема простейшего резонатора.

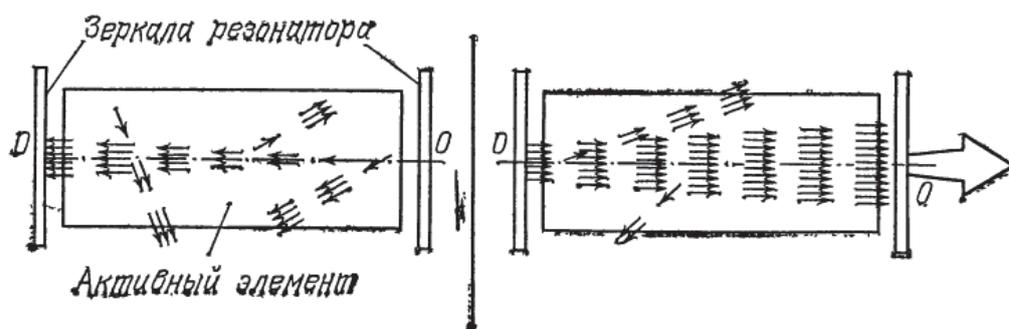


Рисунок 7— Схема простейшего резонатора и развитие фотонной лавины в нем вдоль оси резонатора OO'

Вдоль оси резонатора OO' происходит развитие фотонной лавины. Фотоны, которые родились спонтанно будут проходить длинный путь внутри активного элемента, вследствие многократного отражения излучения от зеркал. Фотоны, взаимодействуя с возбужденными активными центрами, инициируют мощную лавину вынужденного излучения, которая образует лазерный луч. Спонтанные фотоны, которые идут не вдоль оптической оси, быстро покидают активный элемент и выходят из резонатора, на рисунке 7 они показаны как линии, которые под углом к оси OO' .

Таким образом, зеркала оптического резонатора выделяют в пространстве направление, вдоль которого образуются благоприятные условия для создания фотонных лавин. Оптический резонатор упорядочивает процессы вынужденного испускания, которые возникли благодаря хаотичному спонтанному излучению, тем самым формируя лазерное излучение.

Из огромного многообразия конструкций резонаторов наибольшее значение имеют резонаторы со сферическими и плоскими зеркалами.

Резонаторы со сферическими зеркалами разделяются на устойчивые и неустойчивые.

В устойчивых резонаторах имеет место периодическая фокусировка луча, попеременно отражающегося от зеркал, то есть луч остается в пределах ограниченной области. В неустойчивых резонаторах луч по мере отражения от зеркал расширяется и выходит из системы, удаляясь на неограниченно большое расстояние от оси резонатора.

Условие устойчивости выражается через безразмерный параметр q :

$$q = 1 - \frac{L}{R_i},$$

где L – длина резонатора;

R_i – радиус зеркала.

R_i берется положительным для вогнутого зеркала и отрицательным для выпуклого.

Резонатор устойчивый если выполняется условие:

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1$$

За этими границами резонатор неустойчивый.

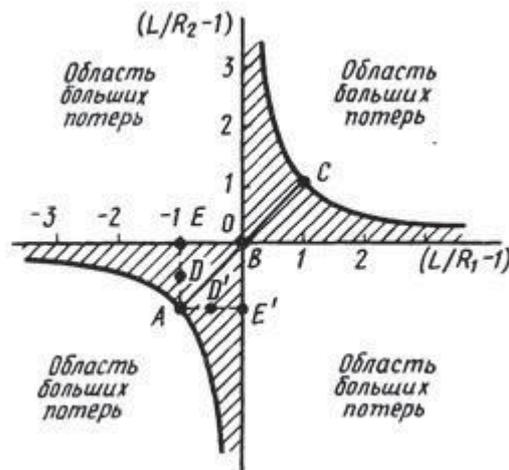


Рисунок 8 – Диаграмма устойчивости оптических резонаторов со сферическими зеркалами

На рисунке 8 диаграмма, которая позволяет оценить устойчивость различных резонаторов с произвольными сферическими зеркалами. Устойчивые области заштрихованы и ограничены гиперболой. Отметим характерные точки.

Точка А соответствует резонатору с плоскими зеркалами, данный резонатор находится на границе устойчивости ($R_1 = R_2 = \infty$). Точка В соответствует конфокальному резонатору ($R_1 = R_2 = L$). Точка С соответствует концентрическому резонатору ($R_1 = R_2 = \frac{L}{2}$), лежит на границе устойчивости.

У устойчивых резонаторов моды сконцентрированы возле оси сильнее, чем у неустойчивых, следовательно, у неустойчивых резонаторов дифракционные потери намного больше, чем для устойчивых.

Точки D и D' соответствуют полуконфокальному. Точки E и E' соответствуют полуконцентрическому резонатору. Полуконфокальный резонатор состоит из одного плоского зеркала и одного сферического, радиус кривизны сферического зеркала равен $2L$. Данный резонатор находится в середине устойчивой области и его свойства аналогичны конфокальному резонатору с удвоенной длиной. Полуконцентрический состоит из плоского и сферического зеркал, обладает свойствами концентрического резонатора.

Плоскопараллельный резонатор или резонатор Фабри-Перо. Данный резонатор состоит из двух плоских зеркал, которые параллельны друг другу [5]. Моды резонатора можно представить, как суперпозицию двух плоских электромагнитных волн, которые распространяются в противоположных направлениях вдоль оси резонатора. Исходя из этого нетрудно получить резонансные частоты, если положить условие, что длина резонатора L должна быть равна целому числу полуволен, то есть

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2},$$

где n – положительное целое число.

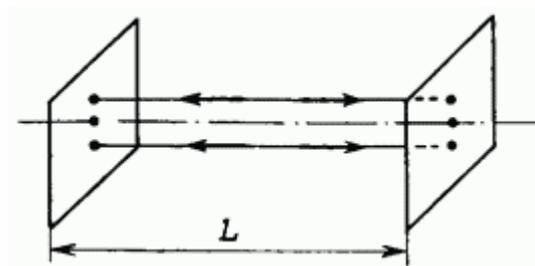


Рисунок 9 – Плоскопараллельный резонатор.

Данное условие необходимо, чтобы на обоих зеркалах электрическое поле электромагнитной стоячей волны было равно нулю. Резонансные частоты определяются следующим образом:

$$v = n \cdot \left(\frac{c}{2L}\right)$$

К плюсам резонатора с плоскими зеркалами относится их простота, они применяются тогда, когда наличие большого количества типов колебаний не имеет значение. Также эти резонаторы сильно чувствительны к деформациям и перекосам зеркал, что ограничивает их применение.

Концентрический резонатор, состоит из двух сферических зеркал, которые имеют одинаковые радиусы кривизны, центры кривизны этих зеркал совпадают, расстояние между зеркалами равно $L=2R$. Данный резонатор является устойчивым.

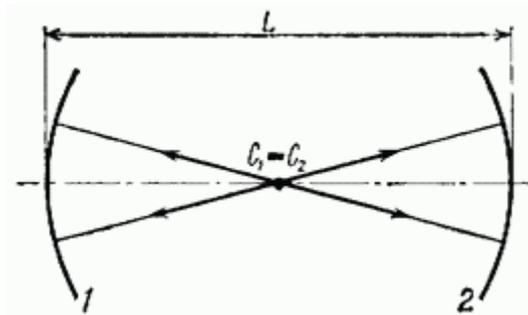


Рисунок 10 – Концентрический резонатор

На рисунке 10 показан ход лучей в данном резонаторе. Моды концентрического резонатора представляют суперпозицию двух волн, который исходят из центра С и распространяются в противоположных направлениях [5].

Концентрический резонатор не критичен к юстировке, небольшой сбой не приводит к ухудшению генерационных характеристик. Пространственное распределение имеет не ярко выраженную пиковую структуру, как у плоского резонатора, из-за пространственного перемешивания пучков с различными начальными моментами развития процесса генерации.

Конфокальный резонатор представляет собой два сферических зеркала с одинаковыми радиусами кривизны, зеркала друг от друга находятся на расстоянии L так, что фокусы зеркал совпадают, центр кривизны одного зеркала лежит на поверхности второго. Начало пучка в перетяжке, перетяжка находится в центре резонатора. В перетяжке расходимость пучка наибольшая, затем она

уменьшается к периферии пучка. Диаметры луча на зеркалах и внутри конфокального резонатора малы и не зависят от размеров зеркал. Данный тип резонатора редко применяется в технологических лазерах, так как активный элемент используется не эффективно, прокачивается не весь его объем, диаметр пучка в перетяжке в 1.4 раза меньше, чем на зеркале.

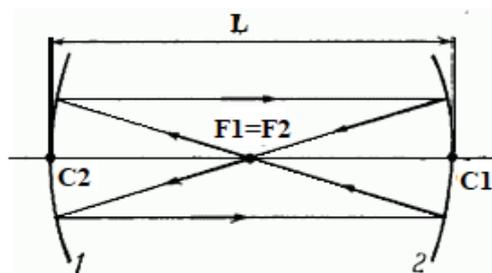


Рисунок 11 – Конфокальный резонатор

Резонаторы из плоского и сферического зеркал называются полуконфокальными и полусферическими. Данные резонаторы занимают промежуточное положение между конфокальным и концентрическим резонатором.

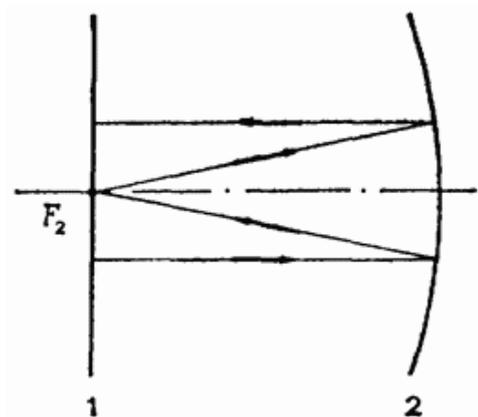


Рисунок 12 – Полуконфокальный резонатор

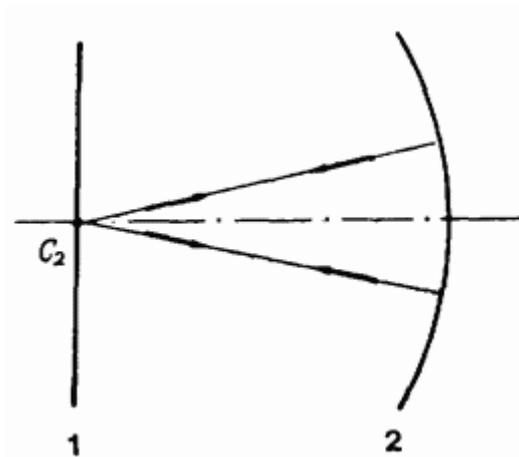


Рисунок 13 – Полусферический резонатор

1.4 Оптическая накачка

Оптической накачкой называется способ создания инверсной населенности при облучении активного вещества излучением специального внешнего источника. Для лазеров важно, достигнуть инверсной населенности в активной среде, чтобы получить оптическое усиление посредством индуцированного излучения. Оптическая накачка содержит в общем случае лампы накачки и светооптическую арматуру. Лампы накачки излучают лучистый поток, светооптическая арматура концентрирует поток накачки на активный элемент. Тип лампы и рабочее тело лазера должны подходить друг другу по спектрам излучения и поглощения.

Оптическая накачка обладает высокой селективностью возбуждения. Если хорошо подобрать спектр частот, то можно возбудить определенную группу уровней или же какой-то конкретный уровень. При когерентной накачке можно накачивать энергию в конкретную линию спектра поглощения активатора.

Существует некогерентная и когерентная накачка. В когерентной накачке источником излучения служит вспомогательный лазер.

В твердотельных лазерах наибольшее распространение получила некогерентная накачка. В качестве некогерентной накачки может быть

использовано излучение естественных источников света (солнечный свет), излучение искусственных источников: газоразрядные импульсные лампы, дуговые, лампы непрерывного горения такие как, газоразрядные и лампы накаливания и т.д. Эффективность накачки зависит от ширины уровня возбуждения активного центра, он должен быть достаточно широким. Для эффективности также необходимо, чтобы максимум линии поглощения активатора попадал в область спектра частот излучения накачки. Эффективность системы накачки определяется как отношение поглощаемого в активной среде потока к мощности, которую потребляют все лампы накачки.

Важные параметры газоразрядных ламп накачки:

- Эффективность преобразования электрической энергии в световое излучение
- Спектральный состав излучения
- Предельная мощность, при которой не нарушается работоспособность лампы.

Наибольшее распространение получили ксеноновые и криптоновые лампы накачки, так как они являются экономичными преобразователями электрической энергии в энергию оптического излучения и их спектр излучения близок к спектру абсолютно черного тела с температурой 8000-12000К [6].

Чтобы повысить эффективность ламп накачки, лампу и активный элемент помещают в осветитель. Эффективность светоотдачи осветителя очень сильно влияет на КПД всего лазера. Потери в осветителе составляют от 20 до 70 %, что в основном и обуславливает низкий КПД твердотельных лазеров

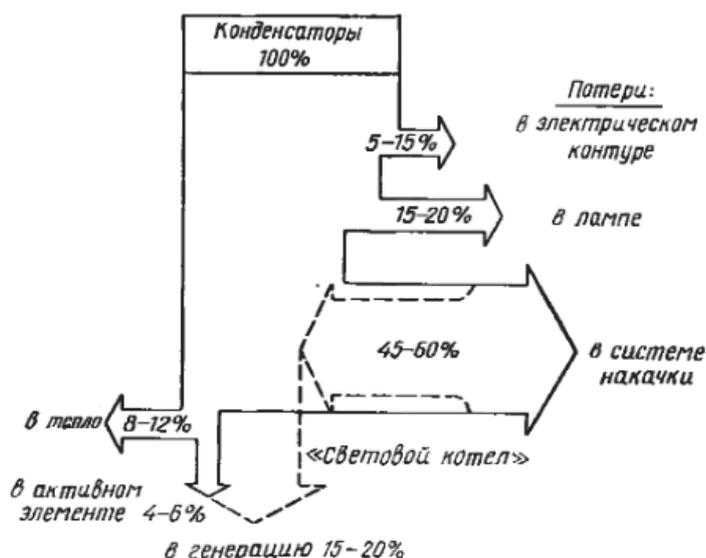


Рисунок 14 — Баланс энергии в лазере на неодимовом стекле

Из рисунка 14 видно, что подавляющая часть энергии (45-60%) теряется в системе накачки, поскольку она приходится на спектральные компоненты, которые не поглощаются или слабо поглощаются в активном элементе. Эта часть энергии составляет основной резерв для повышения КПД лазера.

Осветители, в которые заключены лампа накачки и активный элемент бывают с диффузионными и зеркальными покрытиями.

Диффузионные покрытия обеспечивают равномерное распределение энергии излучения на активном элементе. Они состоят из четыреххлористого кремния или керамики, или оксида магния.

Зеркальные покрытия имеют высокий коэффициент отражения порядка 90-95%, с их помощью можно осуществить селективное отражение, той части спектра, на которую приходится поглощение активного элемента. Недостаток данных покрытий в том, что они не обеспечивают равномерное распределение отраженной энергии на поверхности активного элемента. Зеркальные покрытия выполняют из золота, серебра, алюминия, меди.

Наибольшее применение получили отражатели, которые фокусируют излучение на активном элементе.

На рисунке 15 представлен отражатель с сечением в виде эллипса, вдоль фокусных линий размещен активный элемент и лампа накачки. На рисунке 16 представлен осветитель кругового сечения, лампа и активный элемент симметричны относительно продольной оси цилиндра. На рисунке 17 отражатель образован несколькими эллиптическими цилиндрами, которые имеют общую фокальную линию [7].

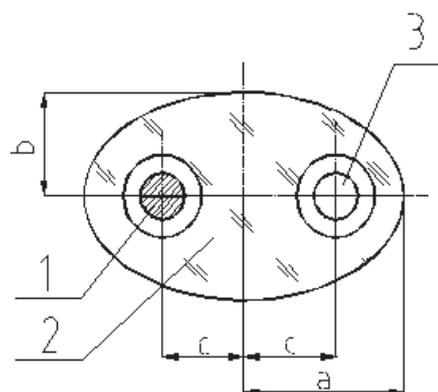


Рисунок 15 – Отражатель с сечением в виде эллипса

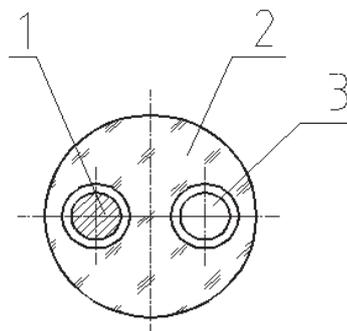


Рисунок 16 – Отражатель с сечением в виде круга

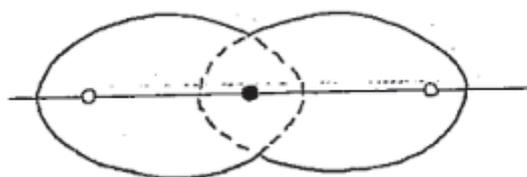


Рисунок 17 – Отражатель образован несколькими эллиптическими цилиндрами

1.5 Электрическая схема оптического квантового генератора

Электрические схемы ОКГ предназначены для накопления энергии и преобразование этой энергии в энергию мощных световых импульсов, которые необходимы для оптической накачки активного элемента.

Основные узлы электрической схемы ОКГ: накопители энергии, лампы накачки, устройства для управления зарядом и разрядом накопителей.

На рисунке 18 показана Функциональная электрическая схема.



Рисунок 18 – Функциональная электрическая схема устройства ОКГ

Функции схемы управления зарядом – включение источника питания, управление режимом заряда, отключение от сети при достижении заданного напряжения, поддержание напряжения на заданном уровне.

Наибольший интерес представляет схема накопителя энергии и формирования разрядного импульса. Она содержит емкостной накопитель, катушку индуктивности и импульсные лампы. Емкостной накопитель состоит из нескольких секций, каждая секция содержит два конденсатора, емкость одного конденсатора 40 мкФ. Мы используем только одну секцию (2 конденсатора),

поэтому емкость равна 80 мкФ. Секции соединены между собой через индуктивность. Индуктивность служит для формирования формы импульса.

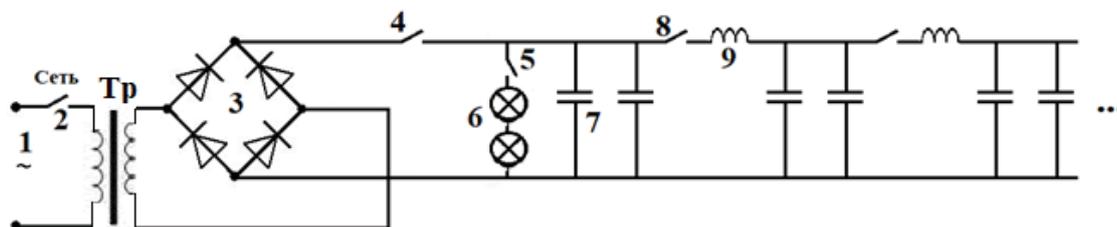


Рисунок 19 – Схема блока питания ламп-накачки: 1- электрическая сеть, 2- ключ включения блока питания в электрическую сеть «Сеть», 3 – диодный выпрямитель, 4- ключ включения заряда конденсатора «Вкл», 5 – разрядный ключ «Поджиг», 6- лампы- вспышки, 7- конденсатор, 8- перемычка, 9- катушка индуктивности

Описание электрической схемы

Напряжение сети 220 В подается на трансформатор (ключ включения блока питания в электрическую сеть «Сеть»), затем напряжение подается на выпрямительный диодный мост. После выпрямления ток идет на накопительные конденсаторы, которые заряжаются (ключ включения заряда конденсатора «Вкл»). После того как конденсаторы зарядились, замыкаем лампы (5 – разрядный ключ «Поджиг»), в этот момент начинают разряжаться конденсаторы и происходит вспышка ламп.

Эта схема хороша тем, что позволяет отключать отдельные секции накопителей. Тем самым позволяя регулировать длительность импульса.

2 Методика исследования

Цель работы: изучить возможность применения исследуемой лазерной установки для зажигания энергетических материалов.

К исследуемой лазерной установке предъявляются следующие требования:

- Возможность регулировки энергии излучения
- Возможность регистрации нескольких параметров одновременно (кинетика излучения лазера, энергия лазерного излучения, сигнал с образца)
- Возможность изменения диаметра пучка на образце
- Возможность изменять длительность излучения лазера
- Установка должна иметь однородное распределение энергии в пучке на поверхности образца

2.1 Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментов, была собрана оптическая схема, приведенная на рисунке 20.

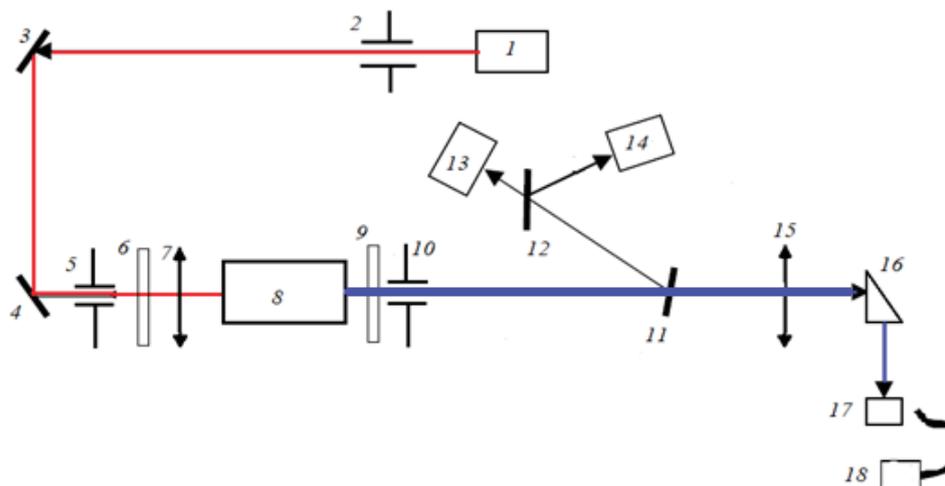


Рисунок 20 – Блок – схема экспериментальной установки. 1 – пилотный лазер, 2, 5, 10 – диафрагмы, 3,4 – поворотные зеркала, 6 – входное непрозрачное зеркало, 7 – вогнуто-выпуклая линза, 8 – квантрон, 9 – выходное полупрозрачное зеркало, 11,12 – светоделительные пластинки; 13 – измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1Н, 14 – фотоэлемента коаксиальный ФЭК-19КМ, 15 – выпуклая линза, 16 – призма, 17 – образец, 18 – фотоэлектронный умножитель Hamamatsu (ФЭУ)

Схема лазерной установки содержит (1) пилотный (красный полупроводниковый) лазер, он выдает излучение, которое используется для юстировки зеркал резонатора. С помощью пилотного лазера задается оптическая ось. Оптическая ось установлена так, чтобы луч шел параллельно оптической скамье. Юстировка зеркал достигается с помощью регулировки положения оптических элементов, а ее контроль происходит с помощью изменения положения отраженного луча от зеркала (6) по отношению к диафрагме (2). Юстировка точна, если отраженный луч от зеркала (6) и отверстие диафрагмы (2) совмещены.

Диафрагма (2), предназначена для ограничения пучка лучей, выходящих из пилотного лазера. Поворотные зеркала (3), (4) — для изменения направления хода луча. Диафрагма (5) предназначена для ограничения пучка лучей, после поворотных зеркал.

Квантрон (8)- состоит из активного элемента, двух ламп накачки и отражателя, все эти элементы конструктивно соединены и расположены в общем корпусе из алюминия. В качестве отражателя выступает внутренняя стенка корпуса, покрытая слоем раствора сульфата бария ($BaSO_4$).

В качестве активного элемента выступает стержень из стекла, легированный ионами неодима(Nd^{3+}) ГЛС1 с диаметром 15 мм и длиной 300 мм. Генерация происходит на длине волны 1.06 мкм, энергосъем 2 Дж/см³

В данной установке для накачки активного элемента используются две газоразрядные лампы-вспышки (ксеноновые ИФП-5000), которые расположены по бокам активного элемента.

Накачка ламп осуществляется с помощью блока питания (блок питания подробно рассмотрен в гл. 1, р. 1.6)

Для достижения генерации необходимо обеспечить положительную обратную связь, которая позволит лазерному излучению проходить многократно через активную среду, что приведёт к усилению светового потока. Для этого в схеме используются два зеркала, входное непрозрачное с коэффициентом отражения 99%(6) и выходное полупрозрачное с коэффициентом отражения 50%(9).

Вогнуто-выпуклая линза с фокусным расстоянием 2000 мм (7), делает резонатор плоско-сферической конфигурации (полуконфокальный). Установка будет рассматриваться как с линзой, так и без линзы. Предполагается, что параметры лазера изменятся после установки линзы в резонатор.

После того как пучок выходит из резонатора, на своем пути он встречает диафрагму (10) диаметром 6 мм (размер диафрагмы может изменяться), на которой он обрезается, это нужно для того, чтобы выделить однородную часть пучка.

После диафрагмы пучок падает на светоделительную стеклянную пластинку (11), которая пропускает часть падающего излучения, и малую часть отражает. Отраженная часть попадает на вторую светоделительную пластинку (12), которая так же большую часть светового потока пропускает, а малую часть отражает. Пропущенная часть (после пластинки (12)) излучения идет на измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1Н (13), который позволяет измерять энергию лазерного импульса, отраженная часть (после пластинки (12)) на фотоэлемент коаксиальный (14) с осциллографом TDS2024C (CH1), который отображает изменение интенсивности лазерного излучения во времени.

После светоделительной пластинки (11) луч приходит на выпуклую линзу (15), с фокусным расстоянием 360 мм, которая уменьшает диаметр пучка до 2 мм (диаметр пучка на образце зависит от диаметра диафрагмы 10) в плоскости изображения. Пучок таких размеров нужен для того чтобы избежать краевых эффектов, при облучении образцов (17) диаметром 3 мм.

Призма (16) нужна для того, чтобы изменить направление хода луча.

Фотоэлектронный умножитель Hamamatsu (ФЭУ) (18) подключен к осциллографу, канал (CH2), регистрация кинетики свечения зажигаемых образцов.

2.2 Описание приборов

2.2.1 Измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1Н

Измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1Н предназначен для измерения энергии импульсов лазерного излучения в спектральном диапазоне 0.4-4 мкм, в режиме свободной генерации и режиме модулированной добротности.

Параметры пучка лазерного излучения, который возможно измерить в свободном режиме с помощью ИКТ-1Н:

- Предельное значение плотности энергии излучения, при котором средство измерения не выходит из строя, 200 Дж/см²
- Длительность импульса 10⁻⁴-1с
- Диаметр измеряемого пучка лазерного излучения 4-16 мм
- Угловая расходимость не более 3⁰
- В моноимпульсном режиме длительность импульса 1·10⁻⁸-5·10⁻⁸с
- Предельное значение плотности мощности излучения , при котором средство измерения не выходит из строя 3·10⁸с Вт/ см²
- Диапазон измерения энергии от 0.05 - 150 Дж

Предел допускаемой основной погрешности составляет 10%.

Прибор предназначен для работы в лабораторных условиях.



Рисунок 21 – Внешний вид измерителя калориметрического твердотельного ИКТ-1Н

Принцип работы ИКТ-1Н заключается в поглощении энергии излучения приемной головкой и преобразования этого излучение в значение термотока, значение термотока измеряется и отображается на показывающем приборе блока регистрации.

Принцип измерения энергии лазерного пучка, когда лазерное излучение падает на измерительную головку, основан на отсчете максимального отклонения стрелки микроамперметра по шкале, которая проградуирована в джоулях. Лазерное излучение при попадании на измерительную головку, вызывает нагрев секции и как следствие термопар. Термоток, который возникает, регистрируется блоком индикации и преобразуется в отклонение стрелки на индикаторе.

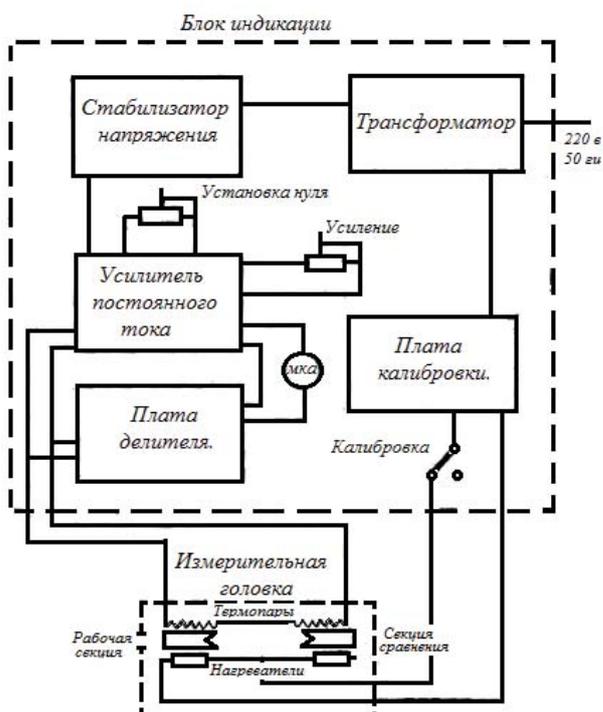


Рисунок 22 – Внутренняя схема ИКТ-1Н

Данный прибор подходит для измерения энергии импульсов лазерного излучения, поскольку исследуемый лазер попадает в диапазон значений вышеперечисленных параметров пучка лазерного излучения.

2.2.2 Фотоэлемент коаксиальный (ФЭК)

Фотоэлемент коаксиальный (ФЭК-19 КМ) предназначен для регистрации коротких световых импульсов, он преобразовывает мгновенную мощность

однократного наносекундного импульса излучения в мгновенное значение электрического импульса.

Прибор представляет собой вакуумный фотоэлемент в металло-стеклянной оболочке, имеющий коаксиальный выход.

Принцип действия прибора основан на явлении внешнего фотоэффекта (фотоэлектронной эмиссии), т.е. испускания электронов поверхностью катода при попадании на него световой энергии. Испускаемые электроны замыкают на участке катод-анод цепь фотокатода, в которой возникает фототок, а на центральном стержне коаксиального выхода возникает электрический сигнал положительной полярности. Сигнал с коаксиального выхода прибора поступает по кабелю на осциллограф для регистрации.

Технические характеристики прибора

- Рабочая площадь фотокатода 1.35 см^2
- Абсолютная спектральная чувствительность на длине волны 1060 нм - 0.23 мА/Вт
- Спектральный диапазон чувствительности прибора $380 - 1100 \text{ нм}$
- Расчетная временная разрешающая способность $5 \cdot 10^{-11} \text{ с}$.

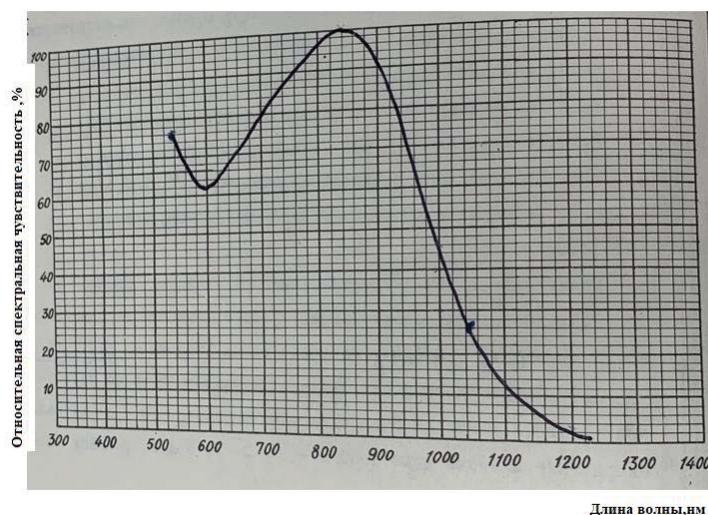


Рисунок 23 – Спектральная характеристика

Данный прибор подходит для проведения измерений интенсивности лазерного излучения во времени на рабочей длине волны, поскольку он имеет неплохую спектральную чувствительность, порядка 26% при длине волны 1060 нм, также обладает нужной временной разрешающей способностью.

В случае перехвата полного пучка лазерного излучения входным окном ФЭКа будет создаваться ток порядка 0.2 А, таким образом при подключении ФЭКа к осциллографу с типовым входным сопротивлением 1МОм, будет создаваться напряжение около 200 кВ, что не приемлемо для осциллографа. Данное напряжение высокое и работать на нем недопустимо, поскольку по паспорту осциллографа напряжение не должно превышать 300 В, следовательно, чтобы не использовать ресурсы осциллографа на максимальных значениях, необходимо добиться снижения количества попадающего излучения на ФЭК.

Добиться снижения количества падающего излучения на ФЭК можно двумя способами: 1) изменить сопротивление на входе осциллографа; 2) перехватывать меньшую часть пучка, что и было выполнено в ходе проектирования установки.

ФЭК-19КМ подходит для контроля кинетики лазерного излучения.



Рисунок 24 – Внешний вид ФЭК-19КМ

2.2.3 Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) H5773 фирмы Hamamatsu

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) - это электровакуумный прибор, работающий на принципе фотоэлектронной и вторичной электронной эмиссии, состоит из фотоизлучательного катода (фотокатода), за которым расположена электронная умножительная система из динодов и собиратель электронов (анод).

ФЭУ позволяет получить очень высокую чувствительность и высокую скорость считывания. Он работает в широком спектральном диапазоне и имеют коэффициент усиления практически без постороннего шума, что позволяет использовать их при детектировании слабых световых сигналов или коротких импульсов света. Диапазон спектральной чувствительности ФЭУ - от 115 нм до 1700 нм.

Данный прибор подходит для измерения кинетики свечения с образца, поскольку ФЭУ имеет широкий диапазон чувствительности и позволяет зарегистрировать сигнал очень малой интенсивности.



Рисунок 25 – Внешний вид ФЭУ

2.2.4 Осциллограф TDS 2024C

Осциллограф TDS 2024C - запоминающее цифровое устройство, которое позволяет определить форму сигнала, его временные параметры, частоту, сдвиг фазы, амплитуду.

Основные технические характеристики осциллографа TDS 2024C:

- полоса пропускания 200МГц
- 4 канала
- Частота дискретизации до 2 Гвыб/с по всем каналам
- Длина записи 2,5 тыс. точек по всем каналам

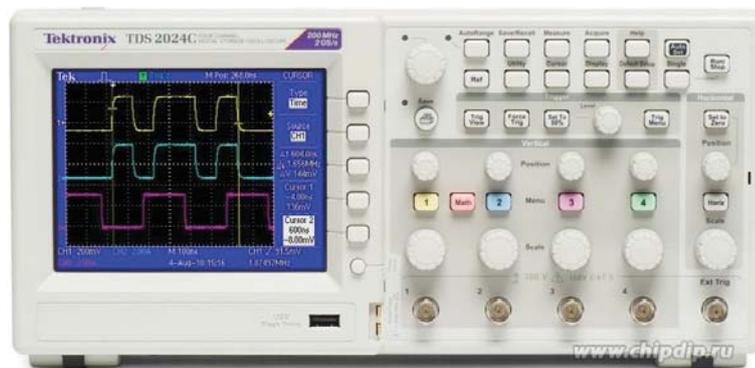


Рисунок 26 – Внешний вид осциллографа TDS 2024C

Данный прибор подходит по всем техническим параметрам, чтобы фиксировать интенсивность исследуемого лазерного импульса во времени.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Выпускная квалификационная работа посвящена изучению лазерной установки для зажигания пиротехнических составов. Изучение зависимости порогов зажигания от напряжения накачки, изучение длительности излучения лазера, диаметра лазерного пучка, распределения энергии в пучке представляет значительный практический интерес в огнестрельном оружии, в военной технике, в области ракетостроения и др.

Целью данного раздела является планирование исследований, проводимых по теме: «Изучение лазерной установки для исследования процессов зажигания взрывчатых веществ», а также решение организационных вопросов, определение финансовых затрат на проведение научно-исследовательской работы(НИР). НИР данного направления носит поисковый характер и проводится с целью получения новых экспериментальных данных.

4.1. Структура работ в рамках научного исследования

Научно-исследовательская работа (НИР) – это большая работа, которая начинается с идеи и заканчивается ее воплощением в виде новых теоретических положений, новых методов исследования, технологических процессов, методов организации производства. Успех данной работы зависит от рационального распределения нагрузки по времени и этапам – это позволяет более эффективно распределять и использовать ресурсы ее исполнителей, предварительно определить затраты на проведение работы.

Любая НИР начинается с постановки задачи и ожидаемых промежуточных результатов, включая и экономический эффект.

Планирование НИР: составление перечня работ, для достижения поставленной задачи, установление сроков и исполнителей, разработка календарного плана выполнения НИР.

Для того чтобы правильно спланировать и выполнить НИР, необходимо данную работу разделить на этапы:

I. Подготовительный этап

- 1) Выбор темы
- 2) Получение задания
- 3) Сбор, анализ и изучение литературных данных
- 4) Обеспечение работ

II. Экспериментальный этап

- 1) Разработка программы эксперимента
- 2) Разработка методики эксперимента
- 3) Проведение экспериментов
- 4) Корректировка разработанных параметров после получения результатов эксперимента

III. Заключительный этап

- 1) Обсуждение и анализ полученных результатов
- 2) Обработка результатов экспериментов

- 3) Оформление пояснительной записки
- 4) Оформление графического материала

Таблица 4.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка технического задания на НИР	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	3	Анализ патентных исследований	Студент
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель
	5	Календарное планирование работ	Научный руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Изучение установки для исследования зажигания ВВ	Студент
	7	Проведение экспериментальной части на установке для изучения ВВ, измерение и получение данных	Научный руководитель, студент
	8	Сравнение результата, полученного в ходе эксперимента с теоретическими исследованиями	Студент
Обобщение и оценка результатов	9	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, студент
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Студент

4.2. Расчет трудоемкости этапов НИР

Трудовые затраты являются основной частью стоимости НИР и оказывают непосредственное влияние на сроки разработки. Трудоемкость может быть определена во времени на основе нормативов или опытно-статистическим путем. Сложность составления нормативов заключается в многообразии и неоднородности выполняемых работ.

Опытно-статистический метод, может быть реализован двумя вариантами:

1) Методом аналогов – трудоемкость определяется по работам, проведенным ранее с учетом коэффициентов сложности новой разработки

2) Вероятностным методом, когда ожидаемое время выполнения той или иной работы определяется по формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}$$

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i – ой работы

t_{mini} – минимальная трудоемкость выполнения i – ой работы

t_{maxi} – максимальная трудоемкость выполнения i – ой работы

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

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

Для удобства построения календарного план-графика выполнения работ, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни путем умножения на коэффициент, и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения работы в календ. дн.;

T_{pi} – продолжительность выполнения работы в раб. дн.;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22$$

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.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Временные показатели проведения НИР

Название работы	Трудоёмкость работ, чел-дни						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		Науч. рук-ль	Студент	Науч. рук-ль	Студент
	Науч. рук-ль	Студент	Науч. рук-ль	Студент	Науч. рук-ль	Студент				
Составление и утверждение технического задания	4	-	8	-	5,6	-	5,6	-	7	-
Поиск и изучение материала по теме		15		18		16,2		8,1		10
Анализ патентных исследований		4		9		6		6		7
Выбор направления исследований	4		8		5,6		5,6		7	

Продолжение таблицы 4.2

Календарное планирование работ	8		15		10,8		5,4		7	
Изучение установки для исследования зажигания ВВ		7			9		7,8	7,8		9
Проведение экспериментальной части на установке для изучения ВВ, измерение и получение данных	3,5	3,5	6	6	4,5	4,5	2	2	5,5	5,5
Сравнение результата, полученного в ходе эксперимента с теоретическими исследованиями	3,5	3,5	6	6	4,5	4,5	2	2	6,5	6,5
Оценка эффективности полученных результатов	2	2	5	5	3,2	3,2	10,5	10,5	1,5	1,5
Составление пояснительной записки	3,5	3,5	6,5	6,5	4,3	4,3	4,3	4,3	5	5

4.3 Разработка графика проведения научного исследования

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Для планирования НИР была выбрана диаграмма Ганта, которая представляет собой тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 3.3 с разбивкой по месяцам за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике выделены

различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 4.3 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Этапы	Вид работы	Исполнители	t _k	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
1	Составление и утверждение задания НИР	Руководитель	7	█				
2	Поиск и изучение материала по теме	Студент	10	█				
3	Анализ патентных исследований	Студент	7		█			
4	Выбор направления исследований	Руководитель	7		█			
5	Календарное планирование работ	Руководитель	7			█		
6	Изучение установки для исследования зажигания ВВ	Студент	9			█		

- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.4.1. Расчет материальных затрат НИИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}$$

где: m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Таблица 4.4 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z_M), руб
Бумага	лист	150	2	345
Картридж для принтера	шт.	1	1000	1150
Интернет	М/бит (пакет)	1	350	402,5
Ручка	шт.	1	20	23
Дополнительная литература	шт.	2	400	920
Тетрадь	шт.	1	10	11
Итого			2852	

4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в табл. 3.5.

Таблица 4.5 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Катод из титана	ТПЧ, 79x45 мм	1	14600	14600
Мишень из титана	ТПЧ, 120x8 мм	1	12500	12500
Всего за материалы				27100
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1355
Итого по статье См				28455

Затраты на электроэнергию для установки «Радуга спектра»:

$$Z_{\text{элек.}} = 7 \text{ кВт} \times 40 \text{ час} \times 6 \text{ руб.кВт/час} = 1680 \text{ руб.}$$

Таким образом, затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ равен 30135 руб.

4.4.3. Основная заработная плата исполнителей темы

Проведем расчет заработной платы относительно того времени, в течение которого работал руководитель и студент.

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}$$

где: $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где : $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней.

Таблица 4.6 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365

Продолжение таблицы 4.6

Количество нерабочих дней		
– выходные дни	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	24	24
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	275	275

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2-05;

k_p – районный коэффициент равный 1,3 (для Томска).

Таким образом, заработная плата руководителя:

$$\frac{17000 \times 1,3 \times 10,4}{251} \times 41 = 37515 \text{ руб}$$

Заработная плата студента:

$$\frac{9893 \times 1,3 \times 10,4}{251} \times 54 = 28728 \text{ руб}$$

4.4.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

В дополнительную заработную плату включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за

выслугу лет и т.п. (в среднем – 12% от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

4.4.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}})$$

где: $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Таблица 4.7 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб	Дополнительная заработная плата, руб
Руководитель	37515	4501,8
Студент-дипломник	28728	3447,36
Коэффициент отчислений		0,271
Итого		20106

4.4.6. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в табл. 4.8

Таблица 4.8 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты НИИ	2852
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	30135
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	66243
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	7948,4
Отчисления во внебюджетные фонды	20106
Бюджет затрат НИИ	127284,4
	869612

4.5. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), 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 показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной школе оценивая.

Таблица 4.9 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4
2. Удобство использования	0,15	4
3. Надежность	0,2	5
4. Стоимость	0,3	5
5. Возможность реализации	0,25	5
Итого	1	

$$I_{p-исп} = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,25 = 4,75$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-бальной шкале), что говорит об эффективности использования научного проекта.

Выводы по разделу 4

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

- при планировании технических работ был разработан график занятости, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу, был произведен подсчет бюджета исследования. Всего бюджет составил 127284,4 руб. Данная оценка коммерческой ценности необходима, чтобы представлять финансовое состояние и перспективы проводимых научных исследований.

- составление сметы научного проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию научного проекта.

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,75 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации научного проекта.