

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 15.04.01 Машиностроение
 Отделение школы (НОЦ) Отделение машиностроение

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка стенда для оптической накачки лазеров на парах щелочных металлов

УДК 621.373.826.038.84

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМОК	Помазкин Даниил Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тригуб Максим Викторович	к.т.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Мартюшев Н.В.	к.т.н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способностью управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способностью организовать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способностью применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способностью анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способностью определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
ДУК(У)-1	Способность на научной основе организовывать свой труд, самостоятельно оценивать результаты своей деятельности, владеть навыками самостоятельной работы в сфере проведения научных исследований, создавать и редактировать тексты профессионального назначения
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способность формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способность использовать иностранный язык в профессиональной сфере
ОПК(У)-4	Способность осуществлять экспертизу технической документации
ОПК(У)-5	Способность организовывать работу коллективов исполнителей, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок выполнения работ, организовывать в подразделении работы по совершенствованию, модернизации, унификации выпускаемых изделий, и их элементов, по разработке проектов стандартов и сертификатов, обеспечивать адаптацию современных версий систем управления качеством к конкретным условиям производства на основе международных стандартов
ОПК(У)-6	Способность к работе в многонациональных коллективах, в том числе при работе над междисциплинарными и инновационными
ОПК(У)-7	Способность обеспечивать защиту и оценку стоимости объектов интеллектуальной деятельности
ОПК(У)-8	Способность проводить маркетинговые исследования и подготавливать бизнес-планы выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных изделий в области машиностроения
ОПК(У)-9	Способность обеспечивать управление программами освоения новой продукции и технологий, проводить оценку производственных и непроизводственных затрат на обеспечение требуемого качества

	продукции, анализировать результаты деятельности производственных подразделений
ОПК(У)-10	Способность организовывать работу по повышению научно-технических знаний работников
ОПК(У)-11	Способность подготавливать отзывы и заключения на проекты стандартов, рационализаторские предложения и изобретения в области машиностроения
ОПК(У)-12	Способность подготавливать научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам выполненных исследований в области машиностроения
ОПК(У)-13	Способность разрабатывать методические и нормативные документы, предложения и проводить мероприятия по реализации разработанных проектов и программ в области машиностроения
ОПК(У)-14	Способность выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов в машиностроении
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность организовать и проводить научные исследования, связанные с разработкой проектов и программ, проводить работы по стандартизации технических средств, систем, процессов оборудования и материалов
ПК(У)-2	Способность разрабатывать физические и математические модели исследуемых машин, приводов, систем, процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере, разрабатывать методики и организовывать проведение экспериментов с анализом их результатов
ПК(У)-3	Способность и готовность использовать современные психолого-педагогические теории и методы в профессиональной деятельности
ДПК (У)-1	Способность разрабатывать технические задания на проектирование и изготовление машин, приводов, оборудования, систем и нестандартного оборудования и средств технологического оснащения, выбирать оборудование и технологическую оснастку
ДПК (У)-2	Способность подготавливать технические задания на разработку проектных решений, разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты технических разработок с использованием средств автоматизации проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных изделий, участвовать в рассмотрении различной технической документации, подготавливать необходимые обзоры, отзывы, заключения в области профессиональной деятельности
ДПК (У)-3	Способность составлять описания принципов действия и устройства проектируемых изделий и объектов с обоснованием принятых технических решений в области профессиональной деятельности

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) 15.04.01 Машиностроение
 Отделение школы (НОЦ) Отделение машиностроение

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
Мартюшев Н.В.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ0К	Помазкину Даниилу Андреевичу

Тема работы:

Разработка стенда для оптической накачки лазеров на парах щелочных металлов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	03.02.2022, № 34-75/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2022
--	------------

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><i>Объект исследования – лазер на парах щелочных металлов. В работе представлен лабораторный стенд, цель которого - обеспечение оптической накачки паров щелочных металлов.</i></p> <p><i>Область применения – обработка металлов (закалка, резка, микрообработка), юстировка оптики, создание опорных звезд, исследование состава атмосферы</i></p> <p><i>Рабочая зона: <u>лаборатория</u></i></p> <p><i>Размеры помещения климатическая зона*) 25 м²</i></p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны – лазер Lotis ТП LS-2139 (1 шт.), переработанный лазер ЛЖИ-501 (1 шт.), кварцевая кювета (2 шт.), вакуумный насос (1 шт.), индукционный нагреватель (1 шт), ПЭВМ (1 шт).</i></p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><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>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы по теме работы 2. Исследование и разработка основных этапов накачки лазера 3. Сборка стенда <p>Проведения эксперимента с целью оптимизации процесса накачки и определения характеристик излучения</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация в MS PowerPoint</p>

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Литературный обзор</p>	<p>Тригуб М.В.</p>
<p>Описание установки</p>	
<p>Эксперимент</p>	
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Гасанов Магеррам Али оглы</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Антоневич Ольга Алексеевна</p>
<p>Раздел на иностранном языке</p>	<p>Сыскина Анна Александровна</p>

<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Литературный обзор (русский)</p>	
<p>Описание установки (русский)</p>	
<p>Экспериментальная часть (русский)</p>	
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение (русский)</p>	
<p>Социальная ответственность (русский)</p>	
<p>Раздел на иностранном языке (английский)</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>13.12.2021</p>
--	--------------------------

Задание выдал руководитель:

<p>Должность</p>	<p>ФИО</p>	<p>Ученая степень, звание</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>Доцент</p>	<p>Тригуб М.В.</p>	<p>К.Т.Н.</p>		<p>13.12.2021</p>

Задание принял к исполнению студент:

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>4АМ0К</p>	<p>Помазкин Д.А.</p>		<p>13.12.2021</p>

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 136 с., 37 рис., 7 табл., 45 источника, 1 прил.

Ключевые слова: лазер на парах щелочных металлов, натрий, калий, цезий, лазер на парах мателотов, оптическая накачка лазера, индукционный нагреватель, лазер на красителях, Nd:YAG лазер.

Объектом исследования является лазер на парах щелочных металлов с оптической накачкой лазером на красителях.

Цель работы – создание лабораторного стенда для накачки лазера на парах щелочных металлов, состоящего из 3 модулей: Nd:YAG лазера, лазера на красителях и вакуумной кюветы

В процессе работы проводились: анализ литературных источников, переработка и юстировка лазера на красителях ЛЖИ – 501, создание и настройка индукционного нагревателя, создание вакуумной кюветы, исследование работы Nd:YAG лазера ЛТИ – 401 и Lotis Tii LS-2139, эксперименты с целью определения характеристик излучения.

В результате исследования был собран лабораторный стенд для накачки лазеров на парах щелочных металлов, проведены эксперименты, подтверждающие работоспособность стенда и его потенциал для создания полноценного лазера на парах щелочных металлов.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: потребляемая мощность – 2 кВт, питание осуществляется от источника напряжения 220 В при частоте 50 Гц. На выходе формируется излучение с длиной волны 589, 7 нм, импульсно-периодическое, длина импульса 10 нс, частота 10 Гц.

Степень внедрения: лабораторный макет.

Область применения: обрабатывающая промышленность, область науки, медицина.

Экономическая эффективность/значимость работы выше среднего.

В будущем планируется построение полноценного лазера

Оглавление

Введение	9
1. Обзор литературы	11
1.1 Общий принцип работы лазера	11
1.2 Лазер на парах щелочных металлов (ЛНПЩМ)	20
1.3 Лазер на парах натрия	25
2. Описание установки	28
2.1 Nd:YAG лазер	28
2.2 Лазер на красителях ЛЖИ-501	34
2.3 Индукционный нагреватель (ИН)	39
3. Экспериментальная часть	48
3.1 Схема эксперимента	48
3.2 Описание эксперимента	54
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА	72
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	73
4.1. Предпроектный анализ	74
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	74
4.1.2. Анализ конкурентных решений	75
4.1.3. SWOT-анализ	77
4.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации	81
4.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	83
4.2. Инициация проекта	83
4.2.1. Цели и результаты проекта	83
4.2.2. Ограничения и допущения проекта	84
4.3. Планирование управления научно-техническим проектом	85
4.3.1. Иерархическая структура работ проекта	85
4.3.2. План проекта	86
4.3.3. Бюджет научного исследования	90
4.3.4. Организационная структура проекта	95
4.3.5. План управления коммуникациями проекта	96
4.3.6. Реестр рисков проекта	97
4.4. Оценка сравнительной эффективности исследования	98
4.5 Выводы по разделу	101
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА	102
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	106
5.1.1 Специальные нормы трудового законодательства	106
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	106
5.2 Производственная безопасность	107
5.2.1 Анализ вредных факторов производственной среды	108
5.2.2 Анализ опасных факторов производственной среды	112
5.2.3 Расчет системы искусственного освещения	116
5.3. Экологическая безопасность	118

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	119
Заключение	122
Список публикаций студента	124
Список использованных источников	126

Введение

В современном обществе научно-технический прогресс не имеет потенциала к развитию без лазерных технологий. Лазеры прочно закрепились в нашей повседневной жизни и вышли из стен лабораторий в бытовую технику. От дальнейшего развития лазерной техники зависит технический прогресс всего человечества. В науке лазеры на парах щелочных металлов используются для создания опорных звезд, исследования состава атмосферы, натриевого слоя атмосферы, а в промышленности используются для закалки, резки и микрообработки, что нашло применение в авиа- и ракетостроении.

ИОА СО РАН использует лазер на парах щелочных металлов, в частности натриевый лазер, для исследования натриевого слоя атмосферы и зондирования атмосферы. Для этого используется технология лазерного отклика. Лазерный пучок посылается в атмосферу, в верхних слоях атмосферы лазер вступает во взаимодействие с ее веществами, проявление чего фиксируется и анализируется с земли.

Для работы лазера необходима непрерывная накачка, однако трудность накачки лазера на парах щелочных металлов состоит в крайней близости верхнего и нижнего рабочих уровней, что предъявляет определенные требования к излучению, используемому в накачке.

Цель работы – создание лабораторного стенда для накачки лазера на парах щелочных металлов, состоящего из 3 модулей: Nd:YAG лазера, лазера на красителях и вакуумной кюветы.

Несмотря на то, что лазеры на парах щелочных металлов чаще накачивают при помощи лазерных диодов, мной была выбрана схема накачки при помощи лазера на красителях. Лазер на красителях обладает широким спектром излучения, что позволяет точнее подбирать необходимую нам длину волны. Кроме того, лазерные диоды с необходимой длиной волны и достаточно узким спектром изготавливаются редко и под заказ, что приводит

к удорожанию конструкции. Недостатком выбранного нами метода является низкий КПД установки.

Научная новизна: была разработана вакуумная кювета и подходящий для данного вида лазеров способ нагрева при помощи индукционного нагревателя, был предложен метод накачки щелочных металлов лазером на красителях взамен более дорогого лазерного диода.

1. Обзор литературы

1.1 Общий принцип работы лазера

Для рассмотрения работы любого лазера необходимо ознакомиться с явлениями поглощения, спонтанного излучения и вынужденного излучения.

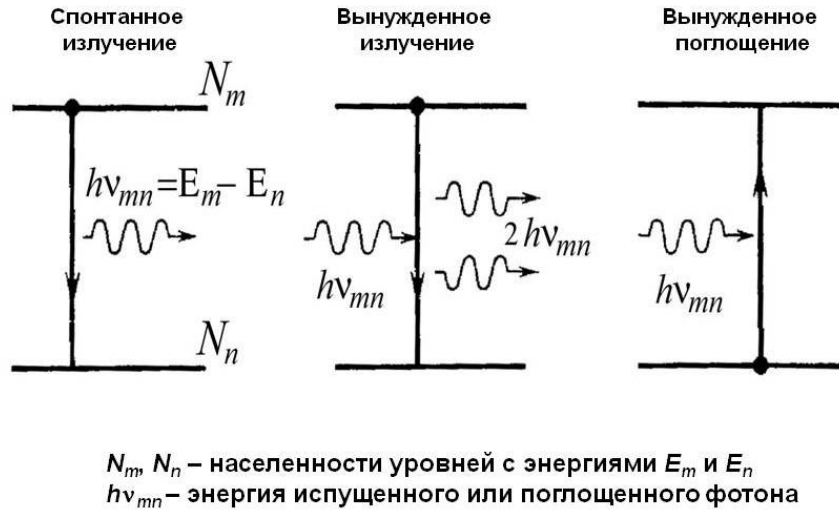


Рисунок 1.1.1 — Спонтанное излучение, вынужденное излучение и поглощение фотона атомом.

В случае, если между энергетическими уровнями атома 1 и 2 существует разница $\Delta E = E_2 - E_1$, а энергия пролетающего через него фотона будет равна энергии перехода между уровней

$$h\nu = E_2 - E_1 \tag{1.1.1}$$

, то существует конечная вероятность того, что произойдет поглощение фотона атомом, а атом перейдет в возбужденное состояние (рис. 1.1) [1]

Где $h\nu$ - это энергия индуцирующего фотона, $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, ν - частота волны. E_2 - энергетический уровень 2. E_1 - энергетический уровень 1. При этом $E_2 > E_1$ [2]

Явление поглощения определяется по формуле

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_\alpha = -W_{12}N_1 \tag{1.1.2}$$

, где N_1 - количество атомов, находящихся на энергетическом уровне 1 или *населенность уровня 1*, W_{12} - вероятность поглощения излучения средой, определяется по формуле

$$W_{12} = \sigma_{12}F \quad (1.1.3)$$

, где σ_{12} - физическая величина, показывающая, в какой площади поперечного сечения к движению излучения данный атом способен поглотить фотон, из-за размерности ее называют *сечением для вынужденного перехода*, F – плотность потока фотонов в падающей волне. [3]

Как правило, возбужденное состояние является нестабильным, и электрон стремится занять уровень 1. При переходе с уровня 2 на уровень 1 атом испустит фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ в случайном направлении со случайной фазой. [1] Если в веществе в один момент времени множество атомов оказались в возбужденном состоянии, то можно наблюдать явление люминесценции, когда атомы начинают испускать фотоны во все стороны, и вещество само по себе светится.

Явление спонтанного излучения определяется по формуле

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{sp} = -AN_2 \quad (1.1.4)$$

, где N_2 – населенность уровня 2, $A > 0$ – коэффициент Эйнштейна [s^{-1}], для описания данного процесса также используют понятие «время жизни» для спонтанного излучения $\tau_{sp} = \frac{1}{A}$ и для безызлучательной релаксации τ_{nr} , когда атом переходит в невозбужденное состояние без излучения. В этом случае энергия электрона преобразуется в другие виды энергии, например, во внутреннюю энергию посредством соударения. τ_{sp} зависит только от свойств данного перехода, когда как τ_{nr} зависит помимо этого и от условий внешней среды. [3]

Однако существует явление вынужденного излучения, когда фотон индуцируется под действием пролетающего рядом фотона с энергией

$h\nu = E_2 - E_1$. Разница между спонтанным и вынужденным излучением заключается в том, что при вынужденном излучении появляется фотон не только с равной энергией, но той же направленности и с той же фазой, что и аналогичные параметры индуцирующего фотона. [1]

Частота и длина волны фотона определяются по формуле:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1.1.5)$$

Где $c = 299\,792\,458$ м/с – скорость света в вакууме.

Вынужденное излучение описывается по формуле

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{st} = -W_{21}N_2 \quad (1.1.6)$$

, где W_{21} - вероятность вынужденного излучения, аналогично формуле

(1.1.3) справедливо

$$W_{21} = \sigma_{21}F \quad (1.1.7)$$

В обычных условиях $\sigma_{21} = \sigma_{12}$, а это значит, что *вероятности вынужденного излучения и поглощения равны*. [3]

Как было сказано, при вынужденном излучении новый фотон обладает той же энергией, что и индуцирующий фотон $h\nu = E_2 - E_1$, имеет ту же направленность, фазу и частоту. Отсюда формируются основные особенности лазерного излучения: монохроматичность, направленность (малая расходимость), когерентность. (рис.1.1.2)

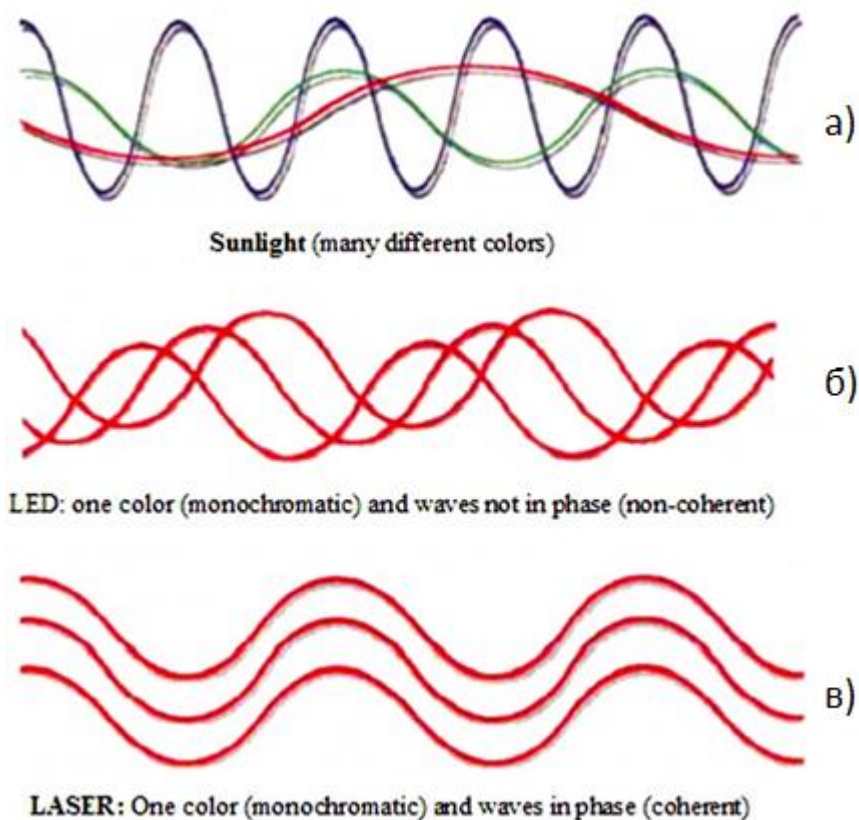


Рисунок 1.1.2 — Виды излучений. а – случайный набор, б – излучение светодиода, монохроматичное, некогерентное, в – лазерное излучение, монохроматичное, когерентное.

Эти особенности лазерного излучения позволяют фокусировать лазерное пятно до радиуса $\frac{\lambda}{2}$, что обычно составляет сотни нанометров. Рябь и зернистость, характерная для лазерного излучения объясняется высокой когерентностью излучения, которое при падении на поверхность начинает давать интерференционную картину на каждом участке микрорельефа. [2]

Однако стоит также отметить, что на практике удается добиться только идеального совпадения фаз излучения, поскольку в формировании лазерного пучка участвуют некоторые другие побочные процессы, которые нарушают идеальное построение лазерного излучения.

Идеальной монохроматичности невозможно достичь, поскольку в процессе формирования фотона атом активного вещества всегда будет находиться в движении, а значит, испускаемая им частота будет искажаться под воздействием эффекта Доплера на величину

$$\nu(V, \Theta) = \nu_0 \left[1 - \left(\frac{V}{c} \right) \cdot \cos \Theta \right] \quad (1.1.7)$$

, где V – Скорость частицы, испускающей фотон, c – скорость света в вакууме, Θ - угол между направлением атома и направлением излучения, ν_0 - частота, соответствующая теоретической. Визуализация эффекта Доплера представлена на рисунке 1.1.3. [4]

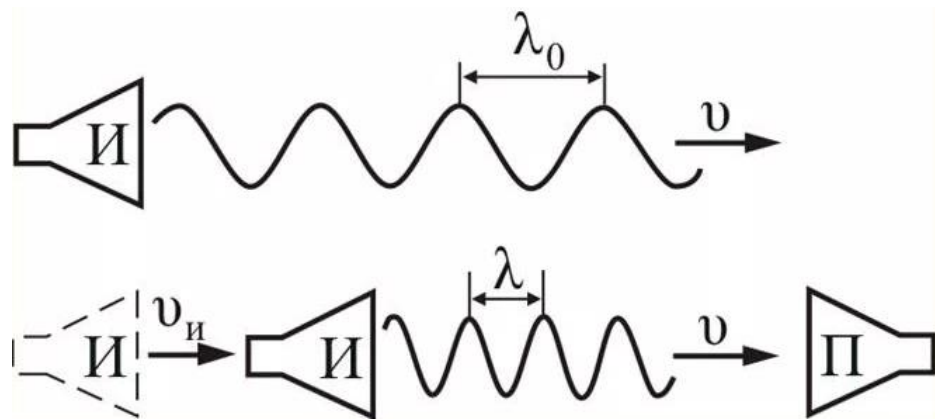


Рисунок 1.1.3 — Визуализация эффекта Доплера

Второй эффект, который возникает в лазерном излучении, который не дает достичь идеальной монохроматичности – это эффект радиационного затухания. На рисунке 1.1.4 представлены формы спектральных линий для эффекта Доплера и радиационного затухания. [5]

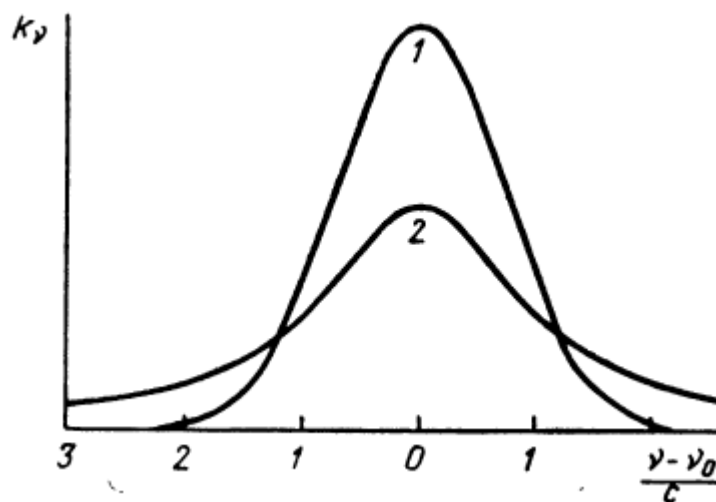


Рисунок 1.1.4 — Форма спектра, обусловленных расширением за счет эффекта Доплера (1) и эффект радиационного затухания (2)

Существует и еще один эффект, который оказывает влияние на формирование спектра частот – это наличие колебательно-вращательных уровней энергии молекулы.

Дело в том, что энергия атома зависит не только от его кинетической энергии и энергии электронов, но и от энергии колебания атомов внутри молекулы и энергии вращения молекулы. Причем $E_{\text{Электрон}} \gg E_{\text{Колебания}} \gg E_{\text{Вращение}}$ изменяются дискретно. На рисунках 1.1.5 и 1.1.6 представлены схемы энергетических уровней и переходов между этими уровнями для колебательно-вращательного спектра.

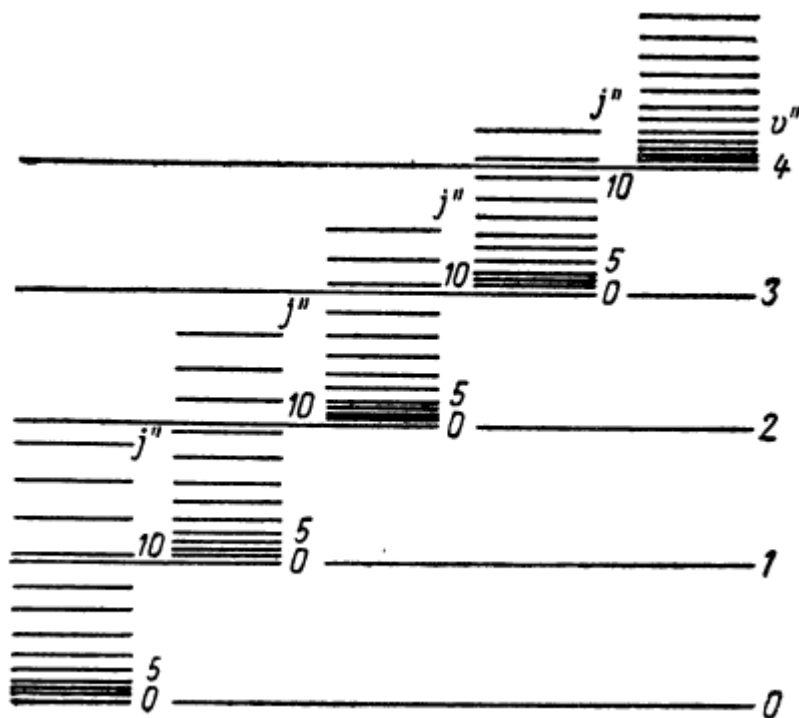


Рисунок 1.1.5 — Схема колебательно-вращательных уровней молекулы активного вещества, где v – колебательное квантовое число, j – вращательное квантовое число.

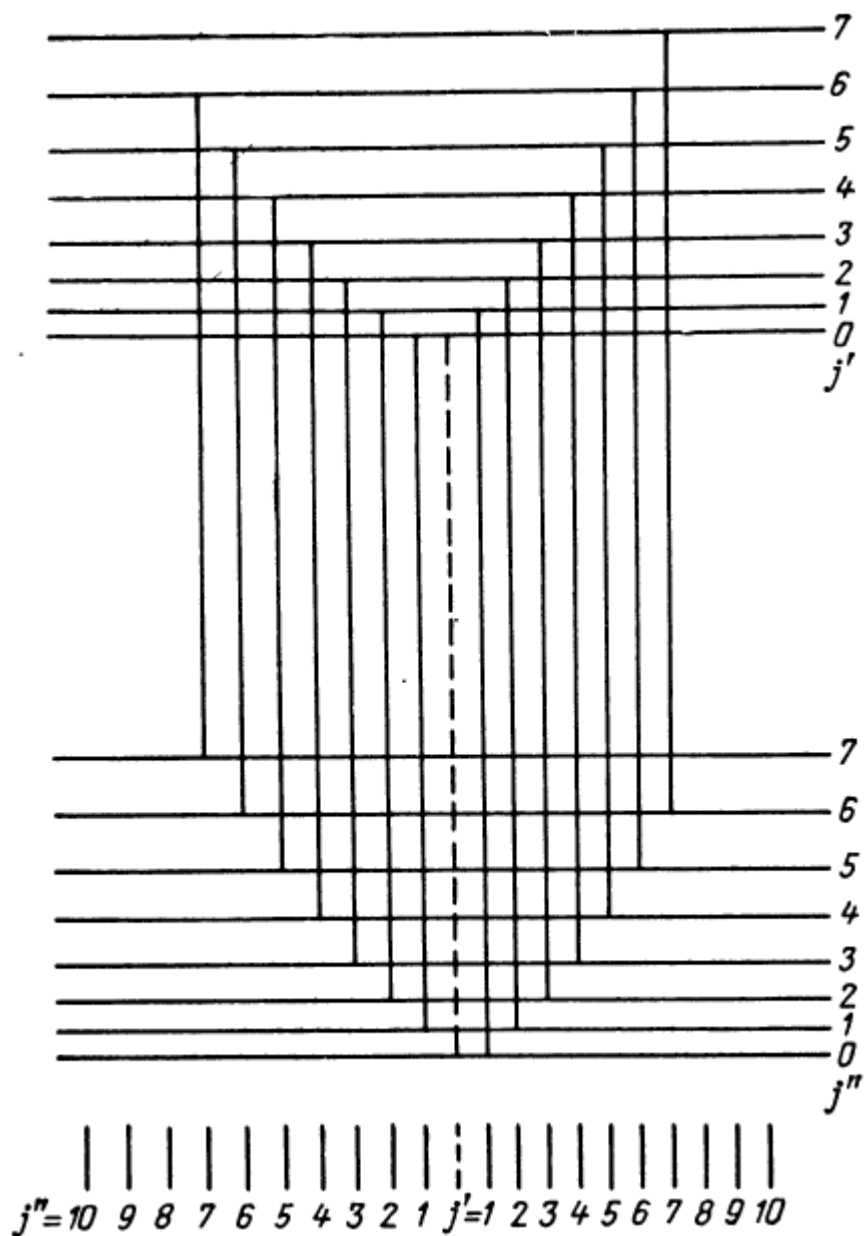


Рисунок 1.1.6 — Схема переходов уровней колебательно-вращательной полосы

Стоит также отметить, что изменение энергии молекулы при поглощении или испускании фотона, обусловленного изменением только энергии электронного уровня, статистически маловероятно, и, как правило, происходит изменение всех трех уровней. [5]

Все три описанных эффекта сказываются на длине волны испускаемого фотона в пределах десятых или сотых долей нанометра, однако этого достаточно, чтобы излучение не было идеально монохроматичным.

Однонаправленность лазерного излучения также не является идеальной. Расходимость пучка объясняется явлением дифракции. Дифракция – явление прохождения препятствия волной, когда размеры препятствия сопоставимы или меньше длины волны излучения. Это явление во многом мешает современным ученым создать вычислительную технику, работающую со светом. [3]

Квантовая система, на основе которой получают лазерное излучение, называется *активным веществом*, и может быть представлено как газами – CO₂ [6], He-Ne [7], жидкостями – краситель родамин С [8], так и твердым веществом – Nd: YAG[9].

Представим, что через некоторое вещество, состоящее из $N = N_1 + N_2$ атомов, с энергией перехода $\Delta E = E_2 - E_1$ проходит непрерывное направленное излучение с частотой $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{E_2 - E_1}{h}$. (рис. 1.1.7)

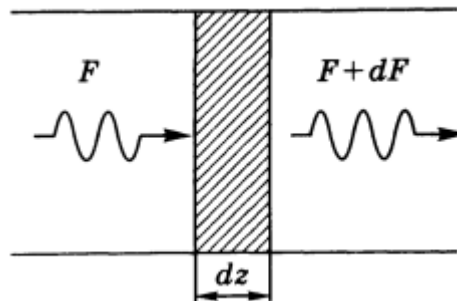


Рисунок 1.1.7 — Малое изменение плотности фотонов в ограниченном объеме.

Число фотонов будет изменяться по закону.

$$dF = \sigma F[N_2 - N_1]dz; \sigma = \sigma_{12} = \sigma_{21} \quad (1.1.8)$$

Очевидно, что при $N_2 > N_1$ будет наблюдаться усиление излучения, а при $N_2 < N_1$ его поглощение. Состояние $N_2 > N_1$ называется *инверсией населенностей*.

Так как населенность уровня 1 многократно превышает в первый момент времени взаимодействия излучения с веществом населенность уровня

2 ($N_1 \gg N_2$), то первое время количество поглощений будет превосходить количество испусканий фотонов, и населенность уровня 1 будет падать, а населенность уровня 2 расти. Однако в один момент населенности уровней сравняются $N_1 = N_2$. В таком случае проходящее излучение не будет усиливаться, поскольку количество испусканий фотонов будет полностью компенсироваться количеством поглощений, из чего делается вывод, что создать лазерную генерацию на основе двухуровневой системы невозможно в обычных условиях, поэтому используются трех- и четырехуровневые схемы накачки. На рисунке 1.1.8 представлены схемы, позволяющие достичь инверсии населенностей между уровнями 2 и 1. [3]

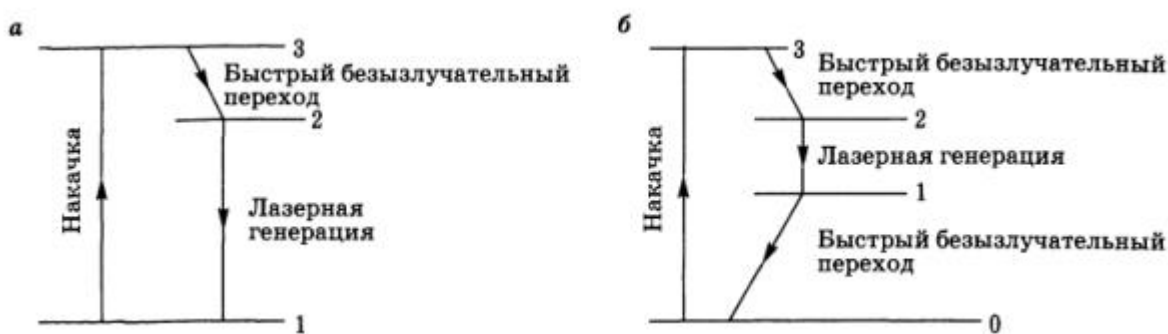


Рисунок 1.1.8 — Трехуровневая (а) и четырехуровневая (б) схемы накачки лазера.

Среди лазеров бывают и исключения. Например, лазеры на самоограниченных переходах свершают лазерную генерацию на переходе 3-2, а не 2-1, и время жизни верхнего рабочего уровня намного меньше нижнего рабочего уровня. В этом случае лазер может работать только в импульсном и импульсно-периодическом режимах.[10].

Помимо активного вещества для лазерного излучения нужно обеспечить положительную обратную связь. Делается это при помощи резонатора (рис. 1.1.9). Существует множество разнообразных резонаторов, но наиболее простым является плоскопараллельный резонатор, состоящий из двух зеркал, одно из которых будет глухим, а второе полупрозрачным. Таким образом, фотоны нужного направления будут оставаться внутри резонатора и, многократно проходя активное вещество, будут инициировать еще больше

излучательных переходов нужного направления. Однако стоит отметить, что существуют лазеры, способные обеспечить достаточно сильную генерацию без резонатора. Например, CuBr лазер. [3]



Рисунок 1.1.9 — Схема плоскопараллельного резонатора.

1.2 Лазер на парах щелочных металлов (ЛНПЩМ)

Активным веществом таких лазеров являются пары щелочных металлов. Активное вещество таких лазеров имеет газообразное состояние и находится под низким давлением порядка десятков торр. Разреженность активного вещества приводит к тому, что световой луч почти никак не искажается, практически не испытывает потерь энергии и не рассеивается. Для таких лазеров расходимость пучка сводится к минимуму, который обусловлен явлением дифракции. Обратной стороной лазеров, активной средой которых является газ, является то, что из-за низкой плотности концентрация возбуждённых частиц значительно ниже, чем у других лазеров, режим работы отрицательно сказывается на плотности энергии излучения. [11]

Лазеры на парах щелочных металлов и в частности натрия работают по трехуровневой схеме, представленной на рисунке 1.13.

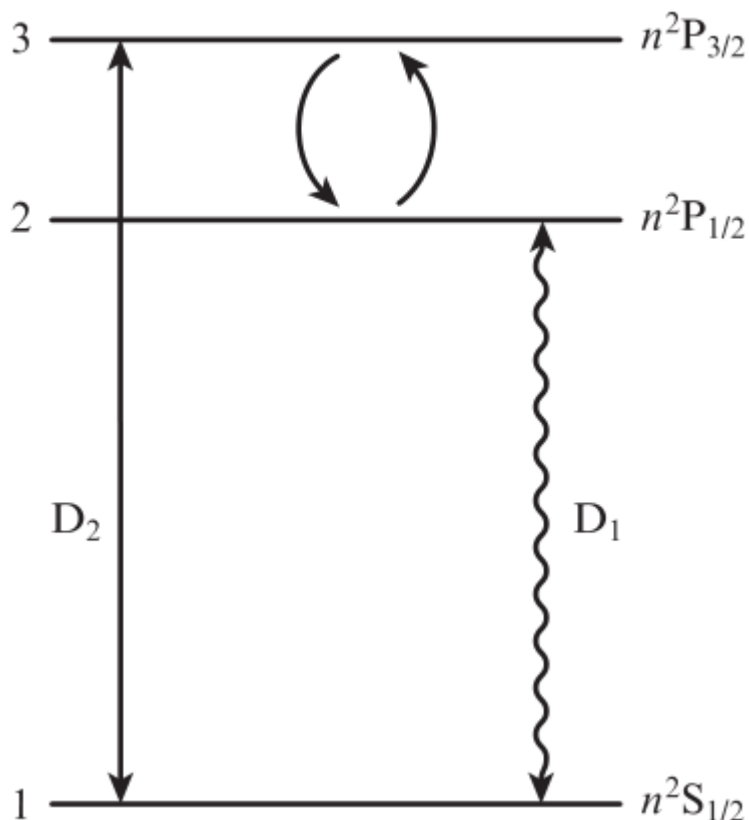


Рисунок 1.2.1 — Схема рабочих уровней и переходов в атомах щелочных металлов. Сплошная линия – переход под действием излучения накачки, волнистая – лазерный переход, изогнутые линии – переходы столкновения.

Основным состоянием является $n^2S_{1/2}$. Оптическое излучение накачки переводит атом в возбужденное состояние $n^2P_{3/2}$. Обеспечивая достаточную интенсивность возбуждающего излучения, мы можем только уравнивать населенности уровней $n^2P_{3/2}$ и $n^2S_{1/2}$. Поэтому инверсию населенностей создают не между уровнями $n^2P_{3/2}$ и $n^2S_{1/2}$, а между $n^2S_{1/2}$ и $n^2P_{1/2}$. Переход между уровнями $n^2P_{3/2}$ и $n^2P_{1/2}$ обеспечивается при помощи буферного газа. Очевидно, что с повышением давления буферного газа, будет возрастать и число переходов между уровнями $n^2P_{3/2}$ и $n^2P_{1/2}$ за счет процессов столкновения. Энергетическое расстояние между этими компонентами не очень велико (меньше или примерно равно kgT — энергии теплового движения), поэтому указанные переходы происходят с достаточно высокой вероятностью. [12] Начиная с определенной отметки (несколько сотен торр),

переходы столкновения за время жизни уровней $n^2P_{3/2}$ и $n^2P_{1/2}$ будут достаточно частыми, чтобы обеспечить больцмановское распределение. Таким образом, населенность уровня $n^2P_{1/2}$ будет выше, чем распределение уровней $n^2P_{3/2}$ и $n^2P_{1/2}$. Населенность уровня $n^2P_{1/2}$ за счет меньшей энергии уровня будет выше населенности уровня $n^2P_{3/2}$. Так как возбуждающее излучение уравнило населенности уровней $n^2P_{3/2}$ и $n^2S_{1/2}$, то населенность уровня $n^2P_{1/2}$ будет также выше населенности уровня $n^2S_{1/2}$. [13]

Накачка лазера на парах щелочных металлов осуществляется оптическим методом. Частным случаем формирования излучения нужной длины волны может служить лазер на красителе родамин – С. Однако более популярным методом накачки лазеров на парах щелочных металлов служит диодный лазер. [14]

Ниже приведена таблица для сравнения характеристик лазерного излучения ЛНЦПМ

Таблица 1.2.1 – Характеристики лазерного излучения ЛНЦПМ [15, 16 - 19]

Активное вещество	Длина волны излучения, нм	Квантовый КПД, %
Цезий	894	95,3
Рубидий	795	98,1
Калий	770	99,6
Натрий	589,76	99,898
Литий	670,98	99,99

Особенность натриевого лазера заключается в крайней близости D_1 и D_2 линий. Для накачки используется длина волны $\lambda_2 = 589,16$ нм, а излучение происходит при длине волны $\lambda_1 = 589,76$. [15]

Из данной таблицы очевидно, что все ЛНПЩМ обладают колоссальным квантовым КПД $> 95\%$. Например, считается, что лазер на парах меди обладает большим квантовым КПД, однако даже у этого лазера квантовый КПД равен 55% . [20] Учитывая потери оборудования, которое обеспечивает генерацию этого излучения, КПД всей лазерной установки редко превышает 3% . ЛНПЩМ обладает большим потенциалом для увеличения КПД и энергоэффективности.

Из таблицы 1.2.1 можно сделать вывод, что наибольшим квантовым КПД обладает литий, однако сложность эксплуатации литиевых лазеров заключается в том, что литий способен взаимодействовать с влагой воздуха и очень быстро образовывать гидроксид. Это характерно для всех щелочных металлов, поэтому щелочные металлы хранят в керосине, чтобы исключить воздействие влаги, однако литий является настолько легким металлом, что в керосине всплывает, поэтому литий приходится хранить в более плотном и вязком вазелине, что крайне неудобно с точки зрения эксплуатации, поскольку после извлечения литий нужно очищать от вазелина, а литий является очень пластичным металлом и режется простым кухонным ножом.

Поэтому с точки зрения соотношения цены, простоты эксплуатации и энергоэффективности самым оптимальным щелочным металлом является натрий, квантовый КПД которого немногим отстает от лития.

В последнее время сильно возрос интерес к лазерам на парах щелочных металлов. Дело в том, что близость безызлучательного перехода дает довольно высокий квантовый КПД, что в перспективе дает возможность создания простого, компактного, надежного и, что не менее важно, мощного лазера с мощностью непрерывного излучения до 100 кВт с КПД свыше 50% . [12]

На данный момент в астрономии используются телескопы, которые требуют долгой калибровки. Для этого используют яркие звезды, которые называются опорными, и данные для которой заранее известны, однако наблюдение этих звезд бывает затруднено из-за погодных условий. Тогда применяют искусственные лазерные опорные звезды.

На высоте порядка 90 км наблюдается повышенная концентрация атомов натрия, который образовался там за счет сгорания падающих метеоритов. Если начать светить лазером с длиной волны 589 нм в эту область, то атомы натрия начнут возбуждаться и создавать спонтанное излучение, которое может зафиксировать для калибровки телескоп. Проще всего создать такое излучение при помощи самого натрия, поэтому натриевые лазеры активно применяют для создания искусственных опорных звезд. [21]

1.3 Лазер на парах натрия

Для натрия выделяют 4 основные серии излучательных переходов: главную, резкую диффузную и фундаментальную, которую иногда также называют основной. Упрощенная схема серий изображена на рисунке 1.3.1

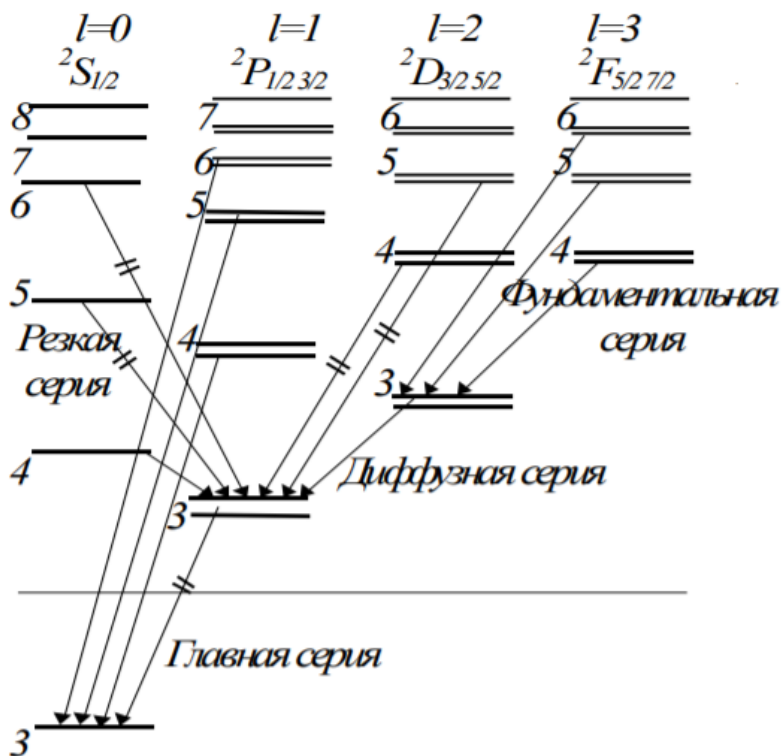


Рисунок 1.3.1 – Упрощенная схема излучательных переходов натрия

[22]

Полная схема переходов (диаграмме Гроттриана) изображена на рисунке 1.3.2

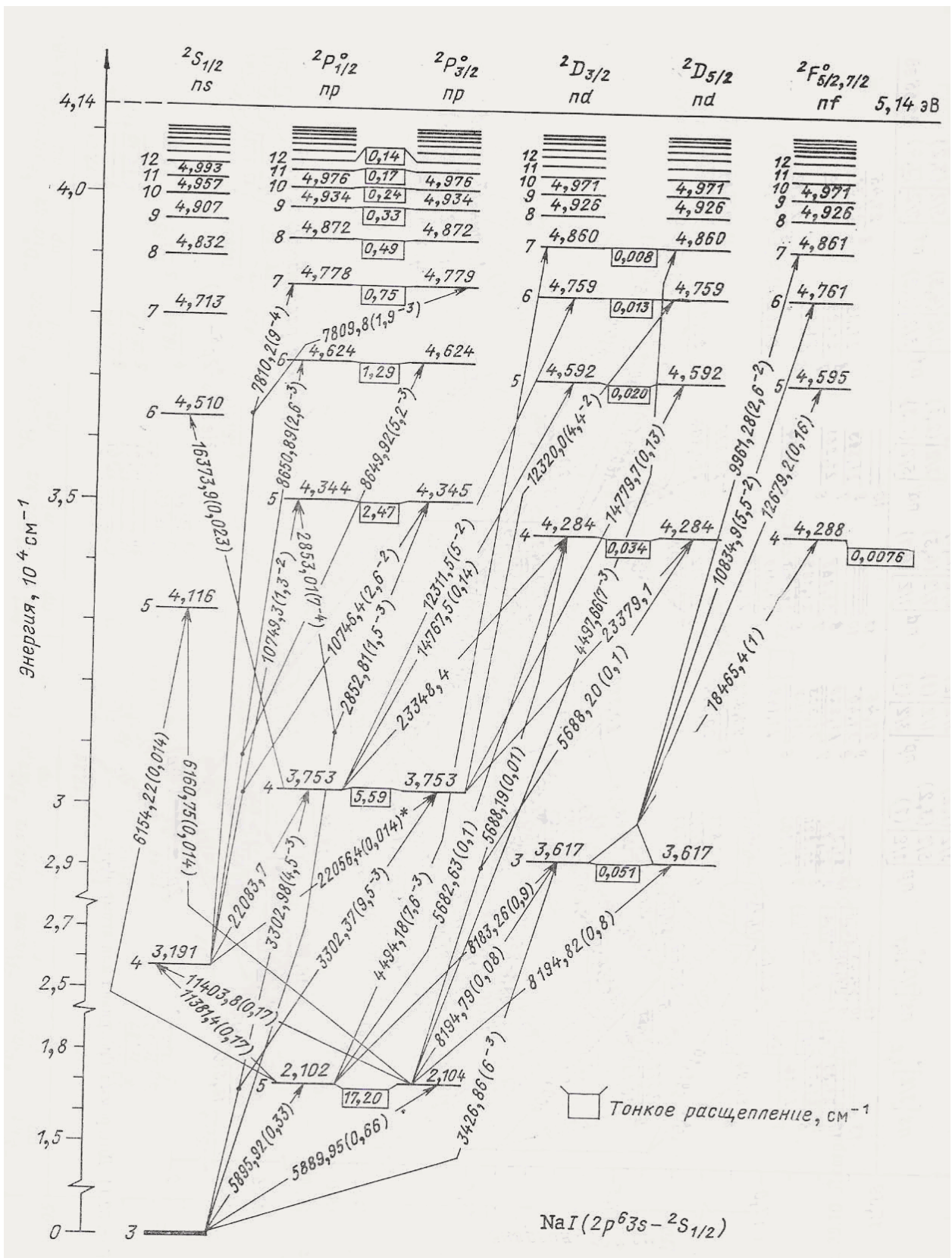


Рисунок 1.3.2 – Полная схема переходов натрия. [23]

Из рисунков видно, что в основное состояние атом натрия переходит только в результате переходов главной серии, которая является наиболее вероятной, за что та и получила свое название. Остальные переходы переводят

атом из одного возбужденного состояния в другое возбужденное состояние. Переход именно этой серии и был использован в экспериментах, а именно желтый спектр 589 нм. Эта накачка называется *резонансной* из-за близкого расположения длин волн накачки и излучения. Остальные переходы этой серии лежат в области УФ диапазона.

Резкая серия характеризует переход в первое возбужденное состояние из состояния nS ($n = 4,5\dots$).

Диффузная серия также характеризуется переходом в $3P$ состояние из nD ($n = 3,4\dots$).

Основная серия соответствует переходам не в $3P$, а в $3D$ состояние из состояний nF ($n = 3,5\dots$).

Однако в эксперименте наблюдать переходы не главной серии невозможно, поскольку согласно [24,25] при температурах ниже 800 К эти переходы проявляются слабо.

2. Описание установки

Стенд для накачки ЛНПЦМ работает по следующему принципу: сначала происходит генерация излучения Nd:YAG лазера (1). В ранних версиях стенда использовался советский лазер *ЛТИ-401*, который впоследствии был заменен на современный лазер *Lotis TII LS-2139*, излучение с длиной волны 532 нм возбуждает лазер на красителях *ЛЖИ-501* (2), который был частично переделан для работы с лазером *Lotis*, лазер на красителях обладает широким диапазоном излучения, что дает нам возможность настроить его на определённую длину волны, которая необходима для возбуждения *вакуумной кюветы с активным веществом* (3). В качестве периферийного оборудования используется *система электрической накачки лазера Lotis TII LS-2139* (4), *система водяного охлаждения лазера Lotis TII LS-2139* (5), *насосы для перегонки красителя* (6), *нагреватель вакуумной кюветы* (7), *вакуумный насос* (8), *спектрометр* (9) и *ПЭВМ* (10). Нагреватель в зависимости от вида кюветы представлял из себя либо *нить накала с источником питания*, либо *индукционный нагреватель токами высокой частоты*.

Схема установки изображён на рисунке 2.1

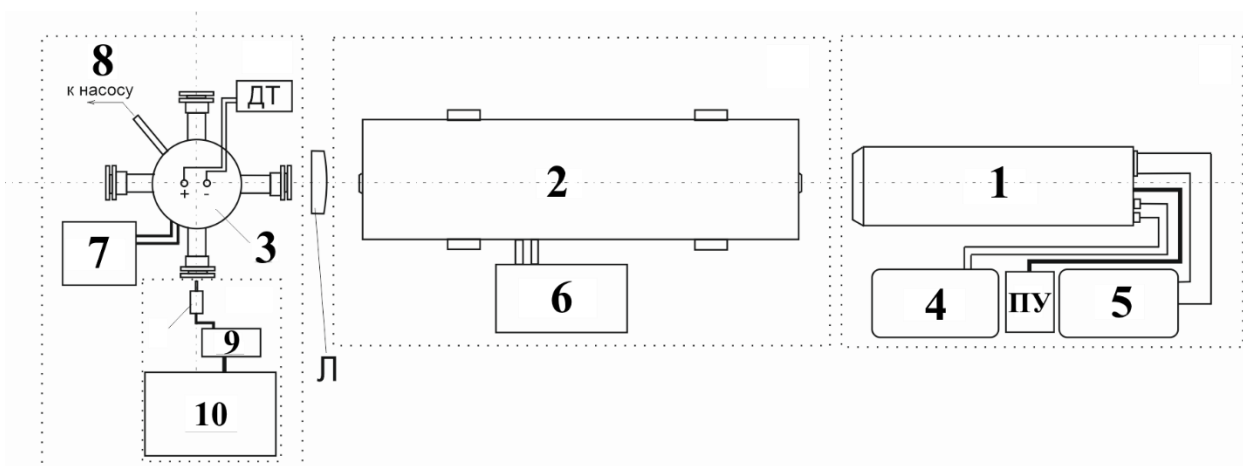


Рисунок 2.1 — Схема стенда

2.1 Nd:YAG лазер

Первым этапом накачки ЛНПЦМ является Nd:YAG лазер. Изначально использовался лазер ЛТИ-401, работе которого посвящен раздел.

Лазер ЛТИ – 401 в качестве активной среды использует монокристалл АИГ: Nd³⁺. Накачка монокристаллов оптическая и осуществляется при помощи ламп ИСП-2500 с ксеноновым наполнением. Лампа ИСП-2500 питается от блока питания БПЛ-66/33, дающего импульсы напряжений до 1 кВ [26]. Часть излучения лампы поглощается кристаллом и переводит его в возбужденное состояние. Электромагнитная волна, совпадающая по частоте с инвертированным переходом, усиливается при распространении в активной среде. Эта особенность делает монокристалл АИГ: Nd³⁺ оптическим усилителем.

Генерация лазерного излучения осуществляется оптическим квантовым генератором (ОКГ), состоящим из активного вещества, лампы ИСП-2500 и подведенной системы охлаждения.

Усиление лазерного излучения осуществляется двумя путями: модуляция добротности и использование оптического усилителя из другого неодимового кристалла. Введение в резонатор модулирующего устройства (затвора) при согласовании его работы с работой лампы ИСП-2500 позволяет создавать избыточную населенность верхнего уровня неодима, что приводит к формированию коротких импульсов (10^{-8} с и менее) с увеличенной мощностью.

На рисунке 2.1.1 изображены эпюры, поясняющие работу лазера с модуляцией добротности. При вспышке лампы интенсивность ее светового излучения (рис. 2.1.1, а) поглощается активной средой. Причем по мере поглощения светового потока возрастает и коэффициент излучения (рис. 2.1.1, б). К затвору приложено постоянное напряжение порядка 2 кВ (рис. 2.1.1, в), однако к моменту, когда $K_{ус}$ приближается к максимальному, на затвор подается отпирающее напряжение того же номинала, что и постоянное (рис. 2.1.1, г). В результате коэффициент потерь стремится к минимуму (рис. 2.1.1,

д), а на выходе формируется короткий импульс лазерного излучения (рис. 2.1.1, е).

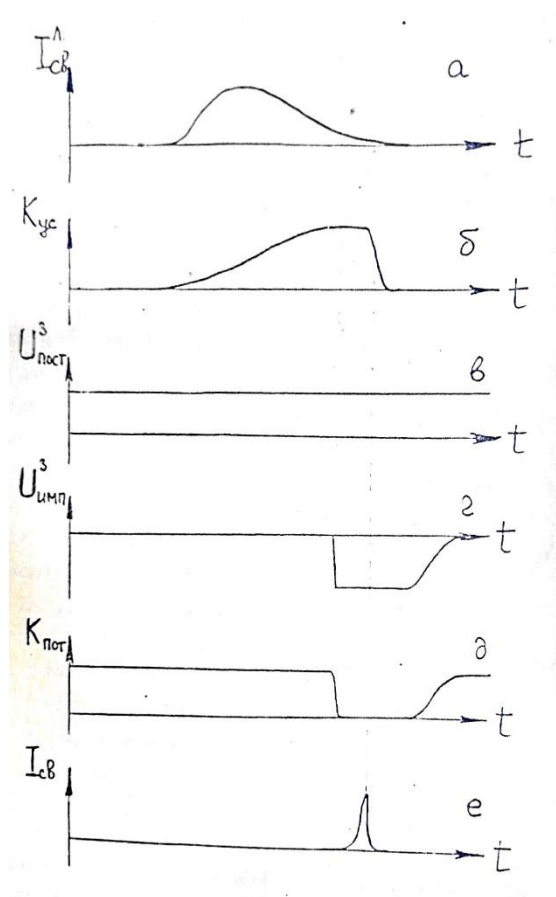


Рисунок 2.1.1 — Эпюры световых и электрических импульсов лазера ЛТИ-401. а) интенсивность светового потока в момент вспышки лампы.

б) коэффициент усиления при поглощении излучения веществом.

в) напряжение, подведенное к затвору

г) открывающий импульс напряжения

д) коэффициент потерь

е) световое излучение

Модуляция добротности осуществляется при помощи генератора импульсных напряжений ГИН-8.

Помимо затвора в резонатор встроен оптический квантовый усилитель (ОКУ). ОКУ не имеет принципиальных различий в устройстве от ОКГ и служит лишь для усиления генерируемого излучения. ОКУ питается от другого блока питания БПЛ-75/33У, работа которого синхронизирована с работой БПЛ-66/33.

Лазер ЛТИ генерирует две основные гармоники: 1064 нм и 532 нм. Энергия импульса для каждой гармоники соответственно 0,2 Дж и 0,02 Дж.

Излучатель работает по двухкаскадной системе с последующим удвоением частоты излучения в нелинейном кристалле с последующим пространственным разделением пучков лазерного излучения основной частоты и второй гармоники. Оптическая схема излучателя представлена на рисунке 3.

Резонатор представлен двумя зеркалами. Выходное зеркало имеет коэффициент пропускания 80%.

В процессе работы лазер неизбежно нагревается, поэтому крайне важно обеспечить нужное охлаждение элементов, чтобы предотвратить их преждевременный выход из строя. В нашем случае используется водяное охлаждение. Полный ход оптических лучей изображен на рисунке 2.1.2 [27]

Впоследствии лазер ЛТИ-401 был заменен на более современный *Lotis III LS-2139*. Многие элементы его конструкции были существенно оптимизированы, но принцип действия, накачка и юстировка остались неизменны. Это позволило работать с более компактным и универсальным оборудованием, технические характеристики которого показывают лучший результат, чем у устаревшего аналога, в частности, время импульса сократилось до 10 нс. [28]

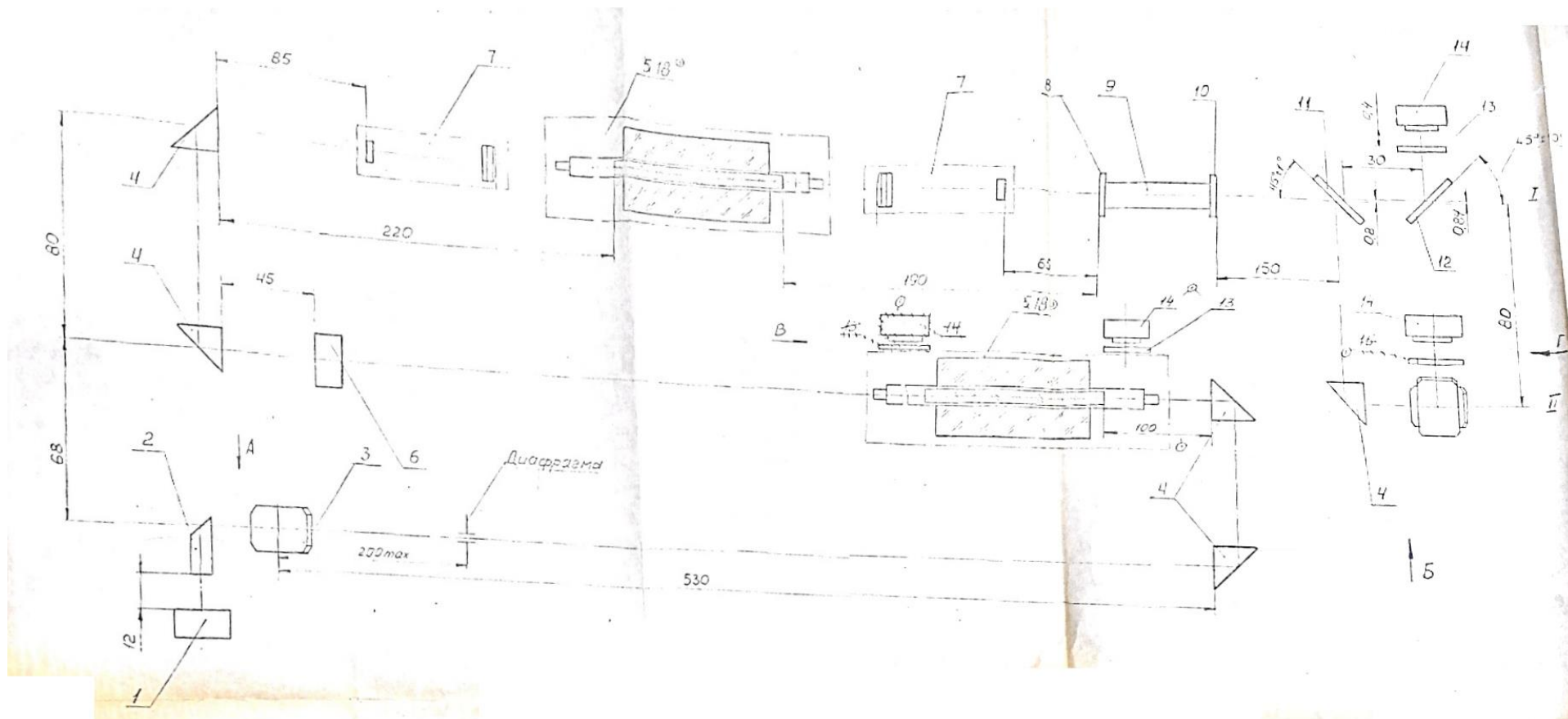


Рисунок 2.1.2 — Оптическая схема излучателя лазера ЛТИ-401

Таблица 1 — Перечень деталей [27]

Позиция	Наименование
1	Зеркала
2	Кристалл
3	Стекло защитное
4	Призма
5	Осветитель
6	Зеркало
7	Трубка телескопическая Схема оптическая принципиальная
8	Стекло защитное
9	Кристалл
10	Стекло защитное
11	Зеркало
12	Стекло защитное
13	Стекло
14	Фотодиод ФД-24К СЛЗ.368.096 ТУ
15	Светофильтр
16	Светофильтр
17	Стекло
18	Квантрон

2.2 Лазер на красителях ЛЖИ-501

Лазер питается от излучения ЛТИ-401 длиной волны 532 нм.

В отличие от ЛТИ-401 лазер ЛЖИ-501 имеет возможность плавно перестраивать длину волны выходного излучения. Устройство, предназначенное для перестраивания частоты называется «Плавный перестраиватель частоты» или ППЧ. Всего лазер ЛЖИ-501 имеет три диапазона:

- 1) 550-660 нм
- 2) 275-330 нм
- 3) 362-407 нм

Далее все параметры лазера приведены для режима работы:

Длина волны лазерного излучения $\lambda = 532$ нм – 1,5 Вт.

Длительность импульса – 25 нс.

Частота повторения импульсов – 50 Гц.

ЛЖИ-501 является жидкостным лазером на красителях. Блок прокачки обеспечивает циркуляцию активного вещества со скоростью не менее 0.5 м/с, что позволяет полностью заменить объем активного вещества, за время следования импульсов, предотвращая избыточный нагрев активного вещества. В качестве активного вещества использовался родамин 6Ж в этиловом спирте, однако возможно использование и других красителей.

На рисунке 2.2.1 представлена оптическая схема лазера ЛЖИ-501.

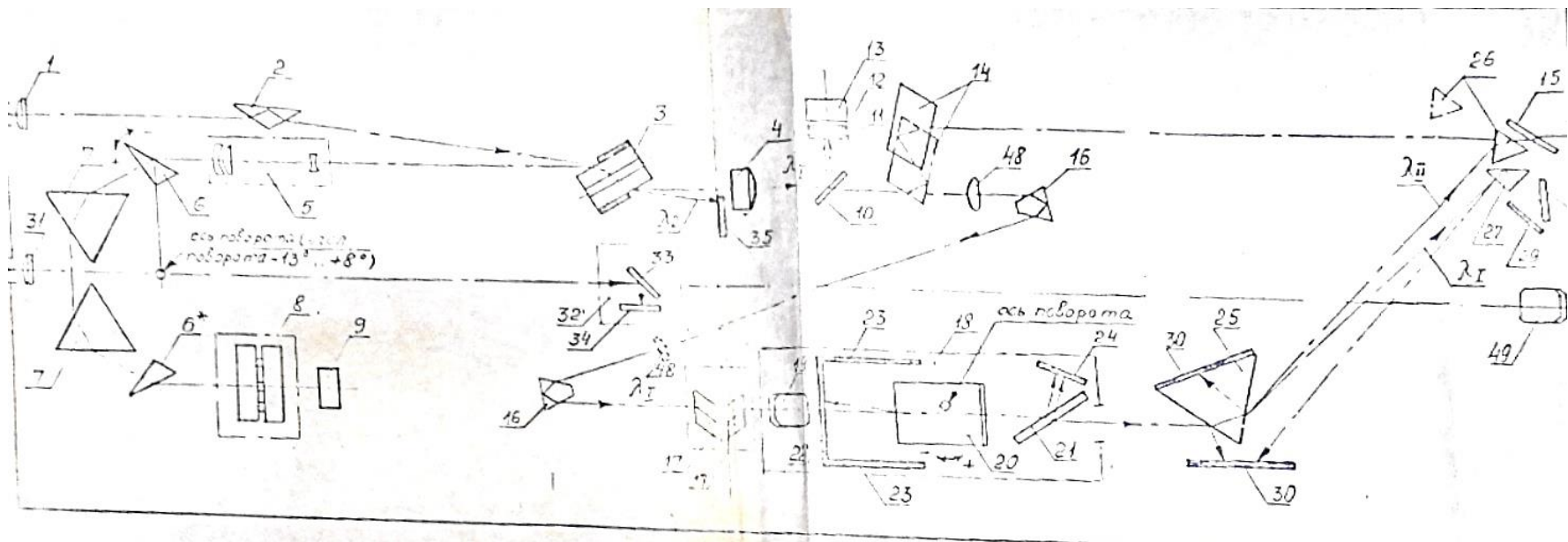


Рисунок 2.2.1 — Оптическая схема лазера ЛЖИ-501

Излучение накачки λ_2 фокусируется линзой I и направляется призмой 2 в двухканальную кюветку 3, через каналы которой прокачивается активное вещество. Под действием накачки возникает генерация в резонаторе, образованном выходным зеркалом 4 и концевым непрозрачным зеркалом 9. Зеркало 4 одновременно является коллимирующей линзой, уменьшающей расходимость выходного лазерного излучения. Светофильтры, наклеенные на кювету 3, предотвращают возникновение паразитной генерации между внешними поверхностями кюветы. Прошедшая часть излучения накачки блокируется светофильтром 35.

Призмы 6,7,6* образуют дисперсионную систему, обеспечивающую выделение требуемой длины волны λ_1 . Перестройка длины волны λ_1 осуществляется поворотом призмы 6.

Телескопическая трубка 5 с угловым увеличением 4^x увеличивает диаметр пучка лазерного излучения на деталях 6-9 и угловую дисперсию резонатора, что приводит к уменьшению ширины линии лазерного излучения до 0,04-0,08 нм. [29]

Зависимость энергии импульса выходного излучения, снятая во время испытаний в этом году, представлена в таблице 2.2.1 и на рисунке 2.2.2.

Таблица 2.2.1 — Экспериментальные данные.

№	λ_2 , нм	W мДж/имп
1	564,6	2,33
2	564	2,33
3	562	3,33
4	560	4
5	558	4,33
6	556	5,33
7	554	6,33
8	552	6
9	550	6
10	548	6
11	546	5,66
12	544	4
13	542	3

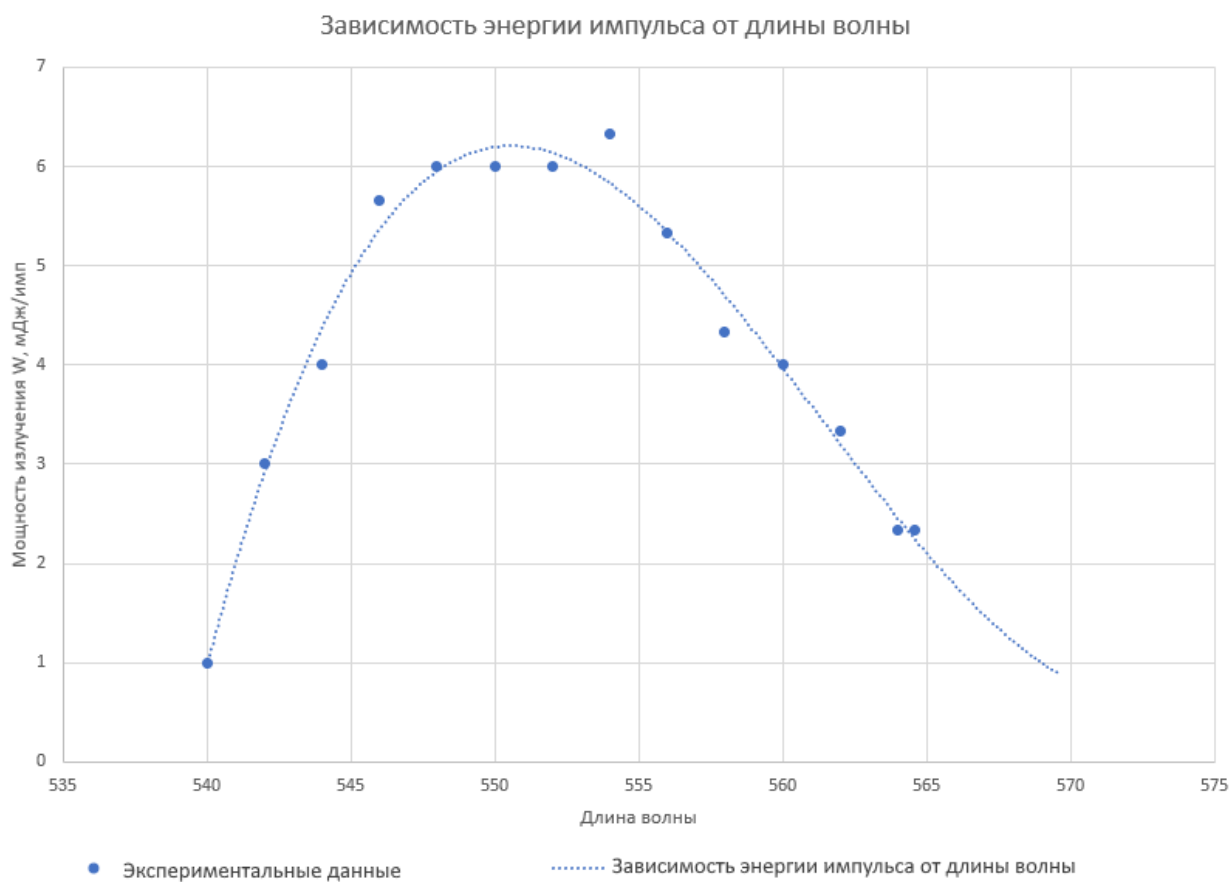


Рисунок 2.2.2 — Зависимость энергии импульса от длины волны

Однако после замены ЛТИ-401 на LOTIS лазер ЛЖИ перестал генерировать излучение. Это было вызвано тем, что время импульса LOTIS намного меньше времени импульса ЛТИ-401, и лазерный пучок не успевал пройти необходимое число циклов в резонаторе прежде, чем излучение накачки потухнет. Для решения этой задачи было решено полностью переделать резонатор лазера.

Устройство ППЧ было демонтировано, также демонтажу подверглась система призм, отводящих лазерный пучок к ППЧ. Взамен этого было использовано зеркало с дифракционной решеткой. Дифракционная решетка рассеивает излучение под разными углами, что позволяет нам рассеять все ненужные нам длины волн и вернуть в активное вещество только излучение нужной нам длины волны. Меняя угол поворота дифракционной решетки, мы меняем и длину волны, которая отражается обратно в резонатор. Таким

образом, удалось сократить время прохода резонатора и вернуть число проходов за время импульса до нужного числа.

2.3 Индукционный нагреватель (ИН)

За основу индукционного нагревателя взят [30]. Нагреватель состоит из следующих основных элементов: генератор управляющих импульсов (1), драйверы с гальванической развязкой (2), мост ключей (3), выпрямитель высоковольтной части (4), нагрузка (5) и сердечник (6), - а также из периферийного оборудования, обеспечивающего работу основных элементов: ЛАТР (7), выключатель (8), понижающий трансформатор (9), выпрямитель низковольтной части (10), кулеры (2 шт, 11).

Принцип действия ИН заключается в следующем: генератор управляющих импульсов (1) создает 2 последовательности высокочастотных положительных импульсов прямоугольной формы 12 В. Серии импульсов сдвинуты друг относительно друга на величину периода, скважность каждой серии составляет менее 50%. Это необходимо, чтобы при завершении цикла ключи успели закрыться, если этого не произойдет, то ток протечет через ключи, минуя нагрузку, и вся мощность приложится к ключам, что приведет к их поломке. Поэтому после уменьшения напряжения одной серии до нуля, должно пройти время *dead time*, необходимое для запираания ключей.

В качестве источника импульсов была взята схема IR2153. Осциллограмма, поясняющая работу генератора представлена на рисунке 2.3.1

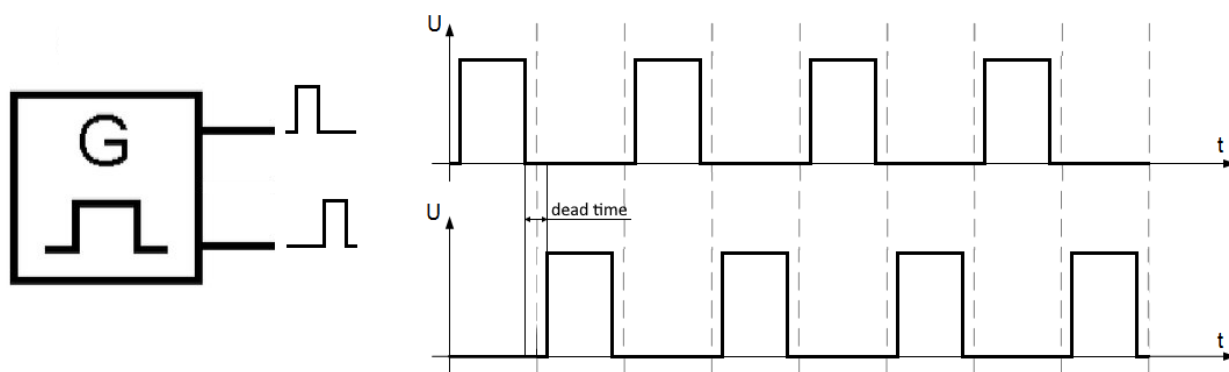


Рисунок 2.3.1 — Осциллограммы серий импульсов

Генератор сигналов (1) использует импульсы, амплитуды которых недостаточно, чтобы отпирать ключи. Для этого генератор сигналов направляет импульсы на 4 драйвера с гальваническими развязками (2),

которые усиливают их до необходимой амплитуды и через гальваническую развязку отправляют на затвор ключа. В качестве драйвера используются готовые схемы МАХ4420.

Несмотря на наличие всего 2 серий используются именно 4 ключа, которые работают попарно. Это связано с высокими мощностями, на которые рассчитана установка. Использование 2 ключей может привести к излишнему нагреву ключей, что приведет к их скорому выходу из строя. Гальваническая развязка необходима, поскольку импульсы, посылаемые драйвером, имеют потенциал относительно земли, когда как исток транзистора может иметь другой потенциал. Таким образом, импульсный трансформатор необходим для согласования разностей потенциалов.

Импульсы с драйверов подаются на ключи (3), которые питаются от выпрямителя высоковольтной части (5). Ключи по умолчанию находятся в закрытом положении, и ток протекает по ним только при приложении к ним отпирающего напряжения. Подключение ключей таково, что на нагрузке (5) появляется переменное напряжение прямоугольной формы. Однако нагрузка представляет из себя колебательный контур, который преобразует это напряжение в синусоидальное, совпадающее по частоте с частотой инвертора. Помещенный в катушку индуктивности нагрузки сердечник (6) под действием токов высокой частоты нагревается до нужных температур.

Регулировка напряжения высоковольтной части осуществляется при помощи трансформатора с переменным коэффициентом трансформации ЛАТР (7). Так как в момент подключения схемы в ЛАТРе возникает скачок тока, срабатывает защитный выключатель (8). Для предотвращения этого последовательно с ЛАТРОм подключается резистор большой мощности, который позволяет в первый момент времени ограничить скачок, после чего отключается.

Для низковольтной части напряжение 220 В преобразуется в понижающем трансформаторе (9) до 12 В, после чего выпрямляется на мостовом выпрямителе с фильтром (10).

Так как схема работает на мощностях до 1 кВт, элементам необходимо обеспечить надежное охлаждение. Ключи монтируются на процессорный радиатор с кулером (11). Второй кулер располагается на нагрузке (5).

Рассмотрим действие каждого основного элемента подробнее. Схема модуля управления генератора (1) изображена на рисунке 2.3.2.

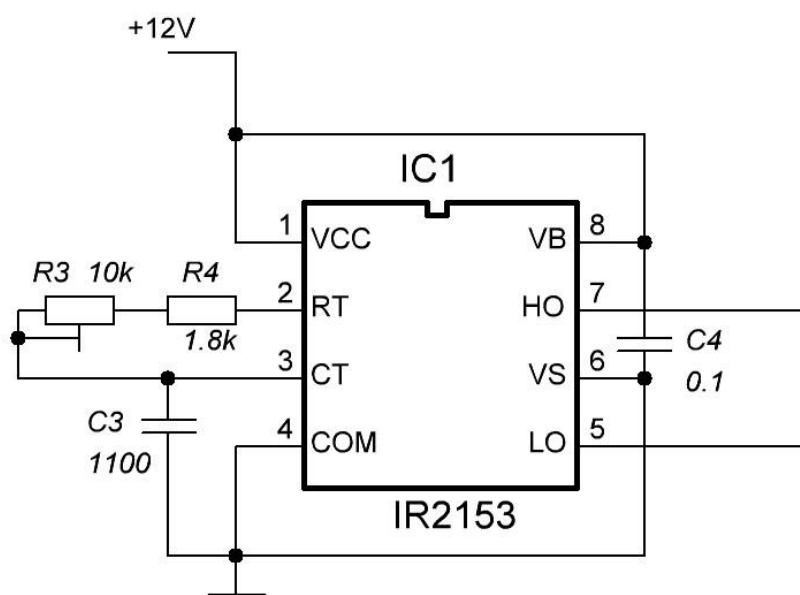


Рисунок 2.3.2 — Схема модуля управления.

Следует отметить, что ножки 2 и 3 IR2153 отвечают за регулировку частоты, которая определяется активно-емкостной нагрузкой на этих ножках. Поэтому для регулировки частоты используется переменный резистор R3 и схема переключения емкости C3. Ножки 7 и 5 передают серии импульсов относительно земли на драйверы.

Схема драйверов с гальванической развязкой представлена на рисунках 2.3.3. и 2.3.4.

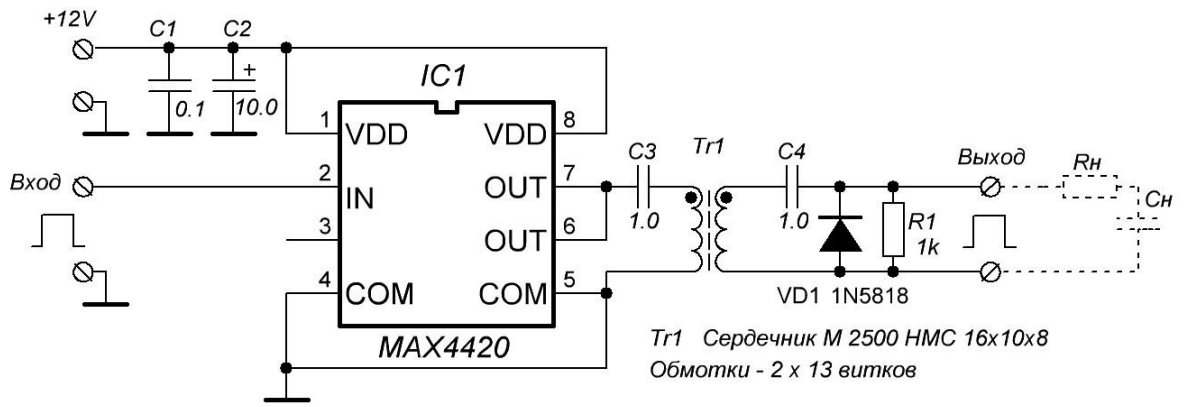


Рисунок 2.3.3 — Схема подключения одного драйвера.

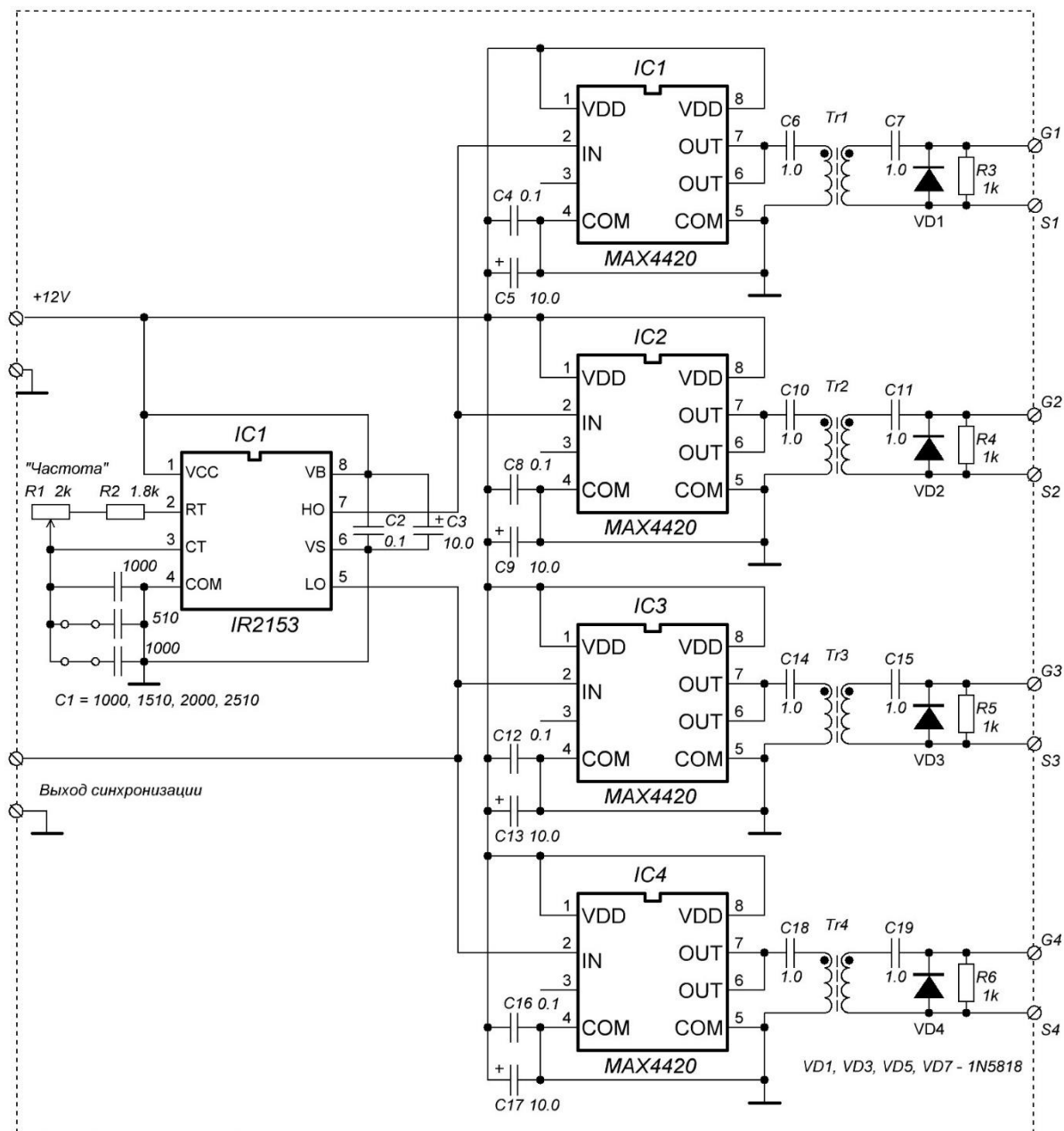


Рисунок 2.3.4 — Полная схема подключения драйверов и генератора.

При использовании гальванической развязки, когда используются только положительные импульсы необходимо обеспечить такую работу, чтобы сердечник трансформатора не насыщался. В противном случае трансформатор прекратит передачу энергии на вторичную катушку и начнет работать как обычная индуктивность. Для размагничивания трансформатора необходима отрицательная часть, которая размагнитит трансформатор. Для этого перед трансформатором ставится емкость C3 (Рис. 2.3.3).

Осциллограммы, поясняющие принцип размагничивания трансформатора изображены на рис. 2.3.5.

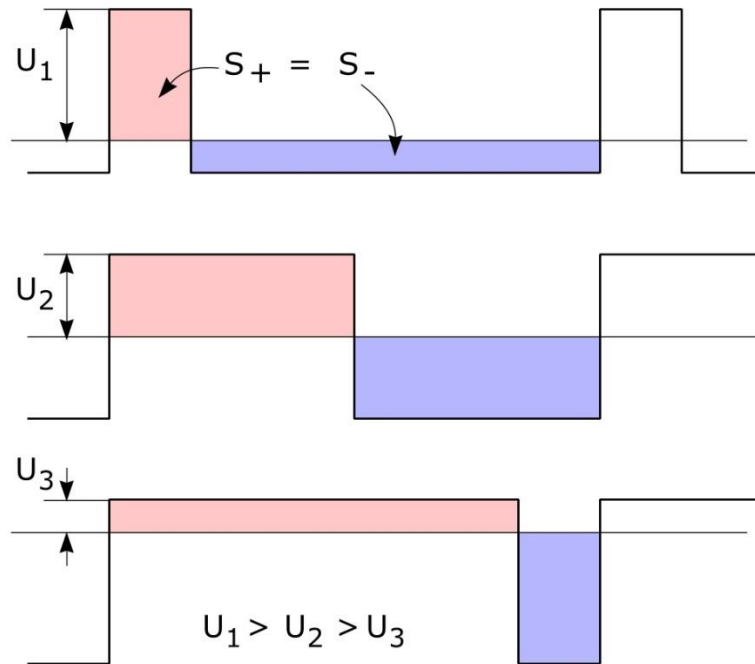


Рисунок 2.3.5 — Компенсация положительной составляющей импульса.

После трансформатора устанавливаются элементы C4 и VD1 (Рис. 2.3.3), призванные устранить отрицательную составляющую трансформатора и нормализовать амплитуду импульса. R1 используется для разрядки затвора транзистора (Рис. 2.3.3).

Схема моста ключей изображена на рис. 2.3.6. и 2.3.7.

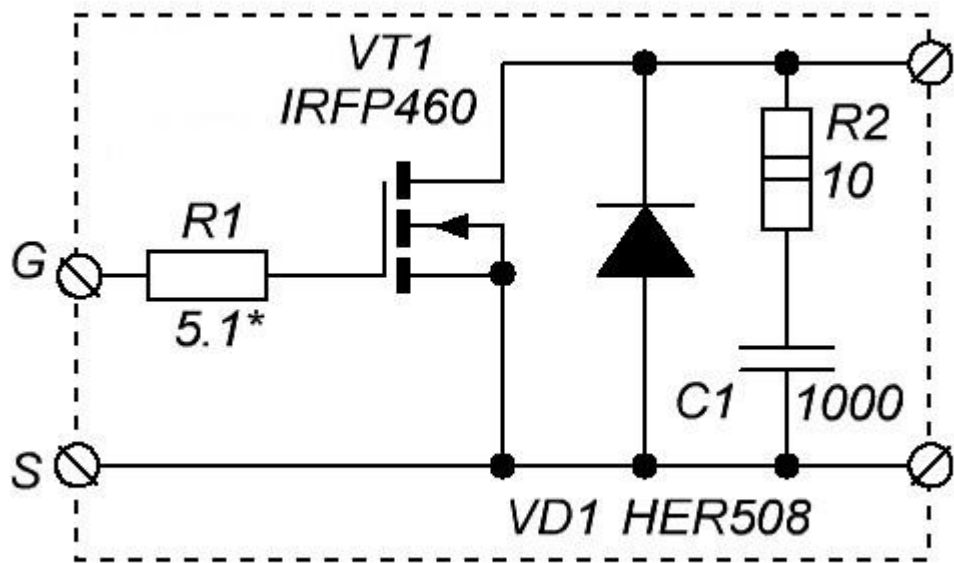


Рисунок 2.3.6 — Схема одного ключа

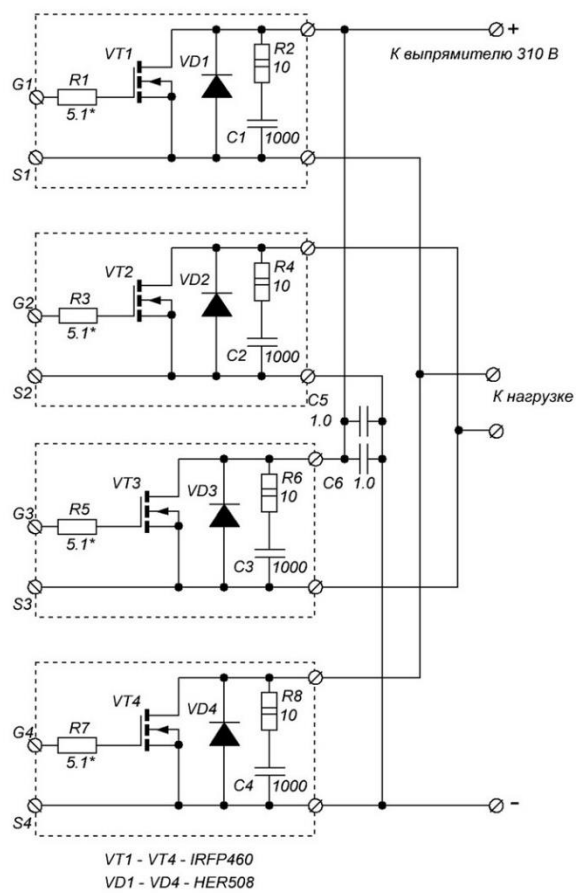


Рисунок 2.3.7 — Подключение моста.

Резистор R1 (рис. 2.3.6) предназначен для подавления колебаний, возникающих в нагрузке и зарядного тока затвора. VD1 предназначен для подавления выбросов напряжения во время dead time, а фильтр R2-C1 снижает уровень помех. В остальном это обычное использование транзистора в качестве ключа. Схема подключения ключей такова, что они попарно формируют симметричные высокочастотные импульсы с напряжением до 300 В.

Схема нагрузки представлена на рисунке 2.3.8

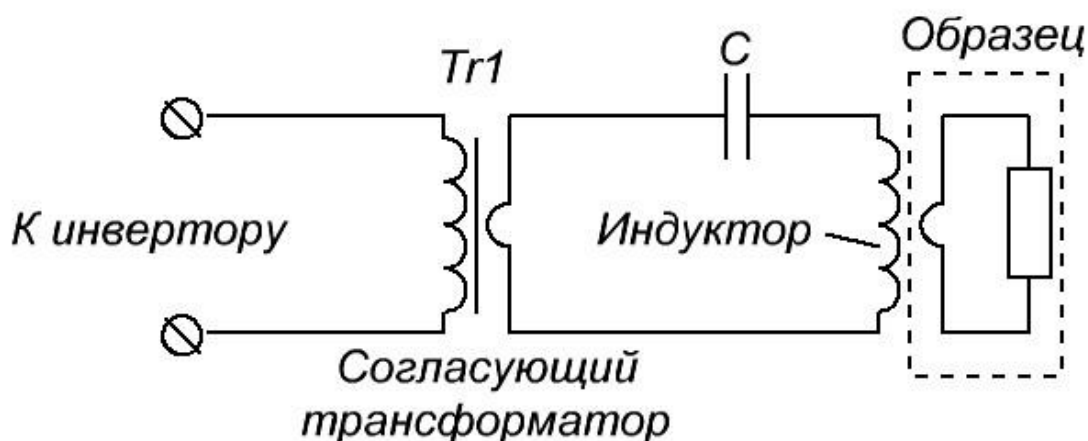


Рисунок 2.3.8 — Схема нагрузки.

Понижающий трансформатор Tr1 осуществляет согласование сравнительно низкоомной нагрузки с инвертором, представляющим собой источник напряжения. Особенность использования данного вида нагрузки заключается в том, что сопротивление конденсатора и катушки индуктивности зависят от частоты.

$$\begin{aligned}
 X_L &= j\omega \cdot L \\
 X_C &= -\frac{j}{\omega \cdot C} \\
 \omega_{рез} &= \frac{1}{\sqrt{LC}}
 \end{aligned}
 \tag{2.3.1}$$

Где X_L и X_C - сопротивления индуктивной и емкостной нагрузки, L и C – индуктивность и емкость, j – мнимая единица, а ω - частота протекающего в них тока.

Из формул сопротивлений видно, что с ростом частоты сопротивление конденсатора по модулю уменьшается, а сопротивление катушки индуктивности возрастает. Из схемы нагрузки видно, что эти элементы при последовательном соединении будут компенсировать реактивные нагрузки друг друга, и при определенной частоте, называемой резонансной, $|X_L| = |X_C|$. А это значит, что нагрузка при резонансе будет носить исключительно резистивный характер, то есть, КПД схемы будет максимальным. Именно для этого нам и нужны элементы для управления частотой.

3. Экспериментальная часть

3.1 Схема эксперимента

В рамках диссертации рассмотрены две вариации натриевой кюветы, нагрев которых осуществляется с помощью нити накаливания и индукционного нагревателя. Рассмотрим первый вариант.

Натриевая кювета накачивается в несколько этапов. Первым этапом является генерация лазерного излучения при помощи Nd:YAG лазера Lotis LS – 2134. На втором этапе возбуждающее излучение Nd:YAG 532 нм осуществляет накачку лазера ЛЖИ - 501 на красителе родамин – С. Этот лазер имеет возможность перестраивать длину волны в определенном диапазоне, для накачки паров натрия необходимо излучение 589,2 нм. Это излучение направляется в крестообразную натриевую кювету с буферным газом, где и наблюдалась генерация. Схема установки представлена на рисунке 3.1.1.

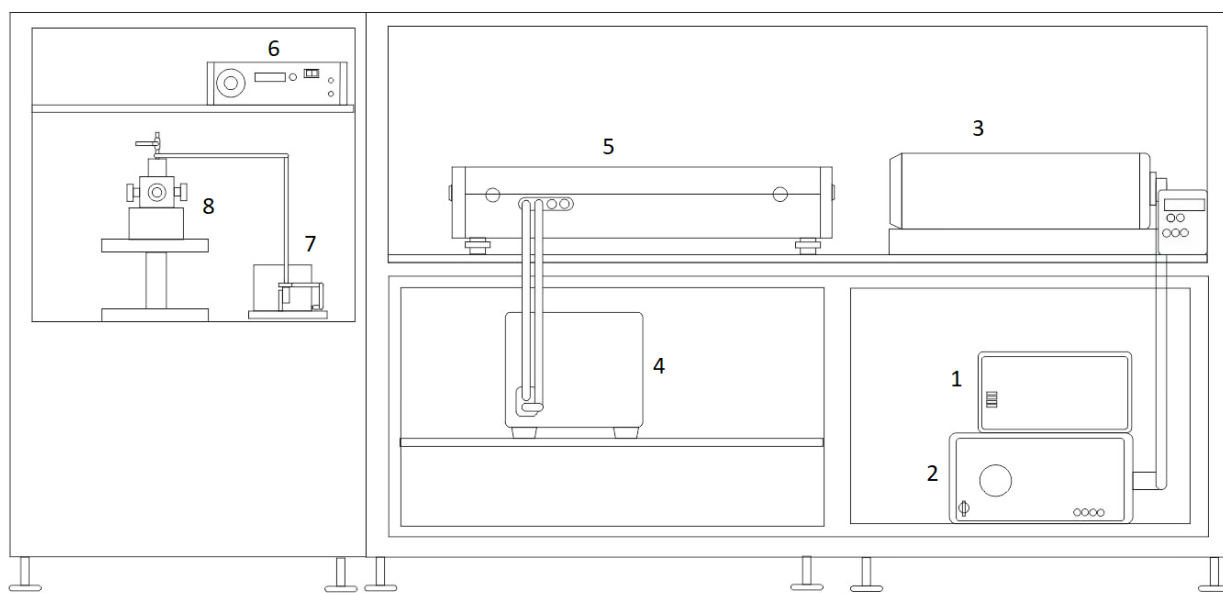


Рисунок 3.1.1 — Схема установки. 1 – блок жидкостного охлаждения Lotis LS – 2134, 2 – блок питания Lotis LS – 2134, 3 – Nd:YAG лазер Lotis LS – 2134, 4 – блок прокачки, 5 – лазер на красителе родамин – С, 6 – регулятор температуры нагревателя кюветы, 7 – система жидкостного охлаждения кюветы, 8 – натриевая крестообразная кювета.

Nd:YAG лазер Lotis LS – 2134 обладает параметрами, которые сведены в таблицу 3.1.1.

Таблица 3.1.1 — Технические характеристики Lotis LS – 2134

Режим работы	Импульсно-периодический
Частота следования импульсов, Гц	10
Энергия импульса для длины волны 532 нм, мДж	До 150
Длительность импульса, нс	10-15
Расходимость (по уровню 0,86), мрад	2-3
Джиттер, нс	±1
Нестабильность энергии выходных импульсов, %	± 2,5
Требования сети	Однофазное напряжение, 220 ± 20 В, 50-60 Гц, 700 Вт.

Lotis LS – 2134 работает на длинах волн 532 и 1064 нм. Для накачки родамина-С использовалась длина волны 532 нм.

Лазер ЛЖИ-501 заправлен красителем родамин-С, который может работать в широком спектре длин волн, настройка которых должна производиться при помощи поворота глухого зеркала резонатора. Максимальная мощность излучения достигается на длине волны 585 нм, что дает нам возможность накачивать натриевую кювету на близкой к максимальной мощности длине волны 589,2 нм лазерного излучения.

Блок прокачки обеспечивает циркуляцию активного вещества со скоростью 0.5 м/с. Эта скорость позволяет полностью обновить объем вещества за период повторения импульсов лазера Lotis LS – 2134. В качестве активного вещества используется родамин-С, растворенный в этиловом спирте с концентрацией $0,15 \pm 0,02$ г/л. [1]

Так как конструкция лазера ЛЖИ-501 предназначена для работы с лазером ЛТИ-401, резонатор рассчитан на длительность импульса накачки 25 нс, что приводило к тому, что при работе с Lotis LS – 2134 с длительностью импульса 10-15 нс лазерное излучение не успевало пройти в резонаторе необходимое количество циклов, чтобы усилить излучение, поэтому резонатор был заменен на дифракционную решетку с зеркалом, поворот которой регулировал длину волны генерации. Сократив таким образом длину резонатора, мы смогли достичь желаемого усиления.

Детальная схема натриевой кюветы представлена на рисунке 3.1.2.

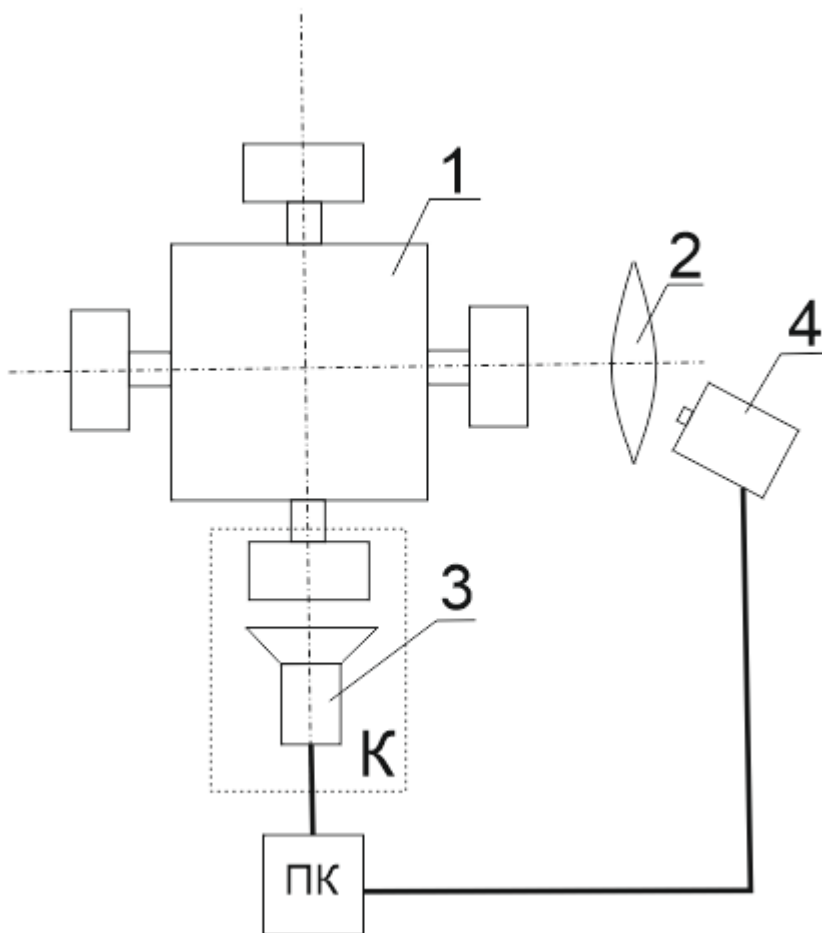


Рисунок 3.1.2 — Натриевая кювета. Вид сверху. 1 – натриевая камера, 2 – фокусирующая линза, фокус и расстояние подобраны так, чтобы фокусировка лучей происходила в центре кюветы, 3 – камера, подключенная к ПЭВМ, 4 – спектрометр, подключенный к ПЭВМ.

Натриевая камера 1 предварительно откачивается до неглубокого вакуума, после чего в нее накачивают буферный газ неон до нужного давления. Нагреватель выполнен в виде нихромовой нити, обмотанной вокруг кварцевого стекла и подключенной к регулятору температуры. По достижении заданной температуры подача напряжения прекращается. Измерение температуры происходит при помощи термопары. Чтобы не допустить запотевание смотровых стекол камеры, к ним подключена система жидкостного охлаждения.

Лазерное излучение накачки ЛЖИ – 501 подается через линзу 2 по поперечной оси. Камера 3, стоящая на продольной оси кюветы регистрирует возникающее в результате накачки свечение натрия и сохраняет изображения на ПЭВМ.

Спектрометр 5 регистрирует спектр излучения лазера ЛЖИ – 501. К сожалению, у спектрометра сбита калибровка, поэтому его данные приходят с ошибкой 7-8 нм в меньшую сторону от реального значения. Слабая чувствительность и низкое разрешение прибора также не давали нам возможности регистрировать генерацию натриевого излучения.

В ходе проведения экспериментов стали очевидны недостатки:

- Продолжительный нагрев;
- Посредственное удержание тепла;
- Из-за конструктивных особенностей осложнена загрузка натрия в кювету;
- Сложность конструкции водяного охлаждения

Более того, возникла необходимость увеличения концентрации паров натрия для лучшего поглощения активного вещества. Однако в то же время окна не должны перегреваться во избежание запыления их парами натрия. Следовательно, с учетом полученного опыта, на этапе проектирования было решено внести ряд изменений в конструкцию:

- Изменение материала кюветы;
- Изменение конструкции кюветы;
- Изменение механизма нагрева.

В качестве материала было выбрано кварцевое стекло. Связан такой выбор был с тем, что кварцевое стекло обладает худшей теплопроводностью по сравнению с металлами. Кроме того, стеклу проще придать необходимую форму. Также кварцевое стекло является диэлектриком. Этот факт оказался решающим при выборе механизма нагрева.

С конструктивной точки зрения кювета представляет собой колбу с четырьмя выводными окнами. От поперечной накачки было решено не отказываться ввиду ее удобства. Внутри кюветы расположен небольшой стальной тигель, в который впоследствии и будет помещен натрий. Для исключения теплообмена тигля со стенками кюветы в пространство между ним и стенками была уложена вата.

С помощью программного пакета SolidWorks были сделаны чертежи верхнего фланца, а также боковых фланцев с крышками. Также для ограничения распространения паров натрия была изготовлена пробка с термопарой, необходимой для контроля температуры. Концы термопары крепятся к выводам, находящимся на верхней крышке, выполненной из фторопласта. Верхняя крышка позволяет существенно облегчить погрузку натрия в тигель, а также заменить термопару в случае выхода ее из строя. Для лучшей герметизации в местах соприкосновения крышки с верхним фланцем и вводами проложены уплотнительные кольца. Фланцы крепились к корпусу кюветы с помощью эпоксидной смолы. Внешний вид кюветы показан на рисунках 3.1.3 и 3.1.4

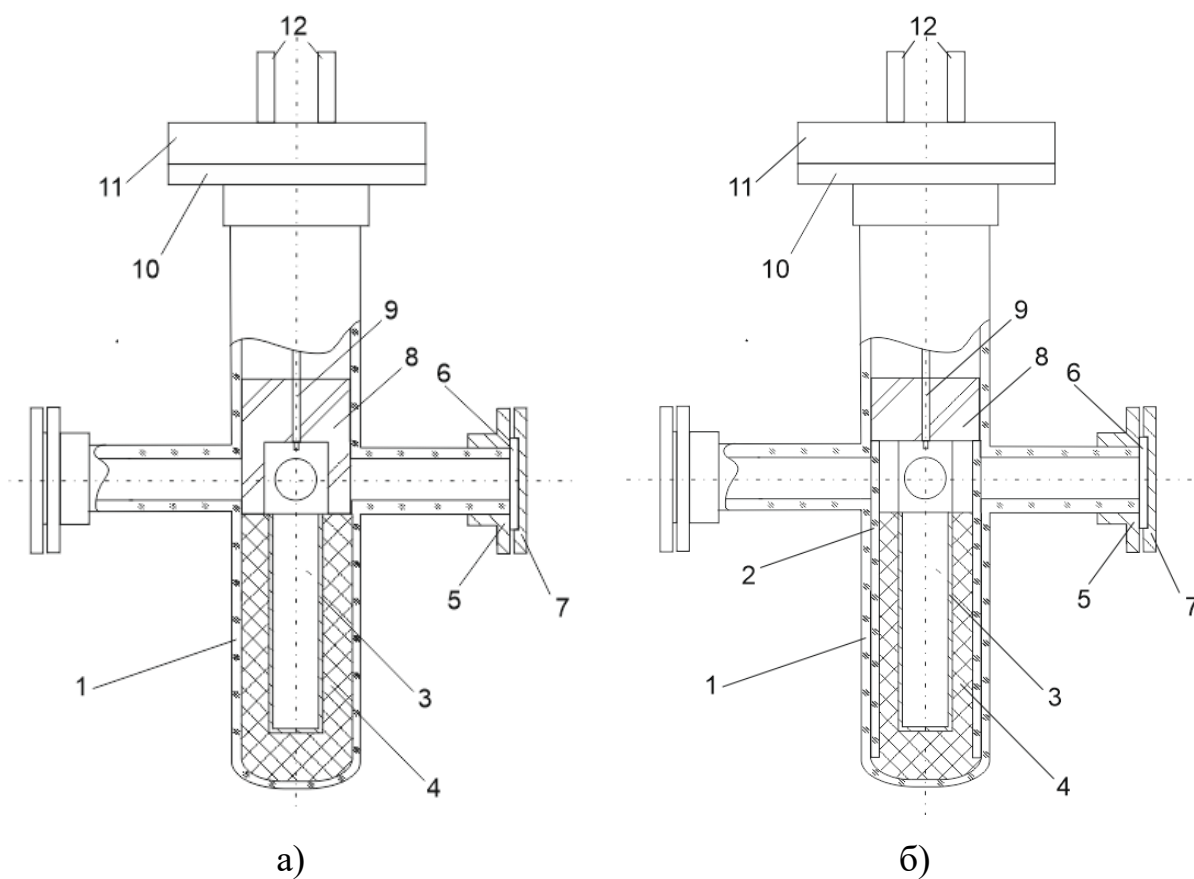


Рисунок 3.1.3 – Внешний вид кюветы: а) исходная; б) реконструированная: 1 – корпус кюветы (стекло); 2 – капсула (стекло); 3 – сердечник (сталь); 4 – прослойка из каолиновой ваты; 5 – фланец выходного окна (сталь); 6 – стекло выходного окна; 7 – крышка выходного окна (сталь); 8 – пробка из шамотного кирпича с встроенной термопарой (9); 10 – фланец верхней крышки (сталь); 11 – верхняя крышка из фторопласта; 12 – выводы термопары

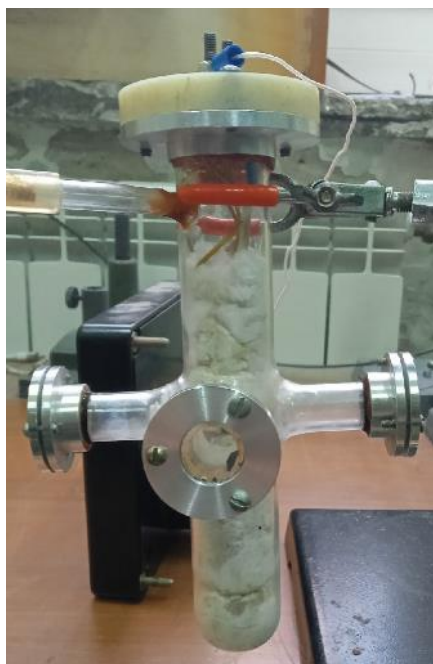


Рисунок 3.1.4 – Внешний вид изготовленной кюветы

Для нагрева тигля было решено использовать нагреватель, работающий по принципу индукционного нагрева. Индукционный нагрев – это повышение температуры предметов из электропроводящих материалов посредством действия в их структуре переменного магнитного поля.

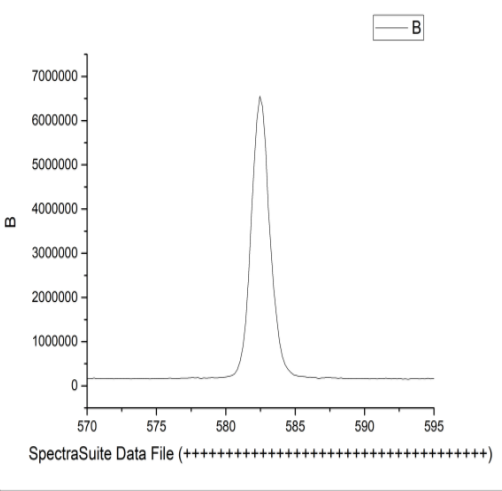
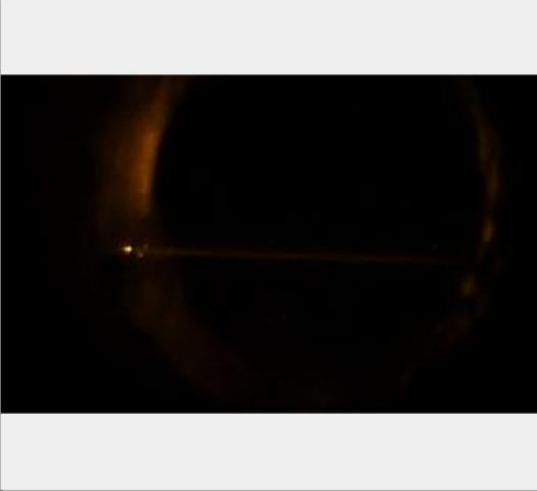
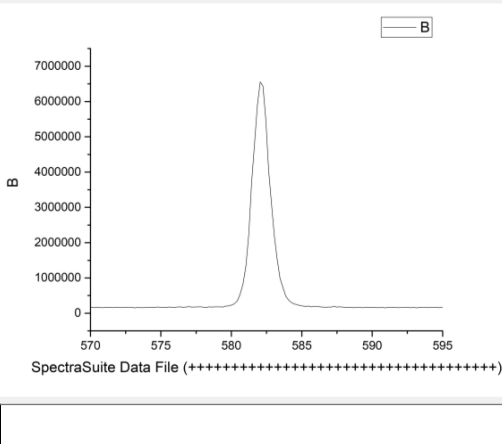
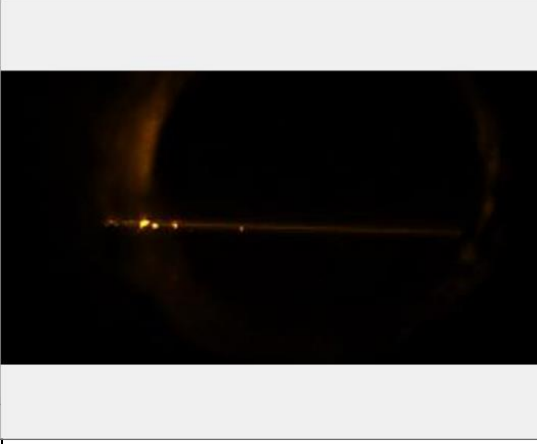
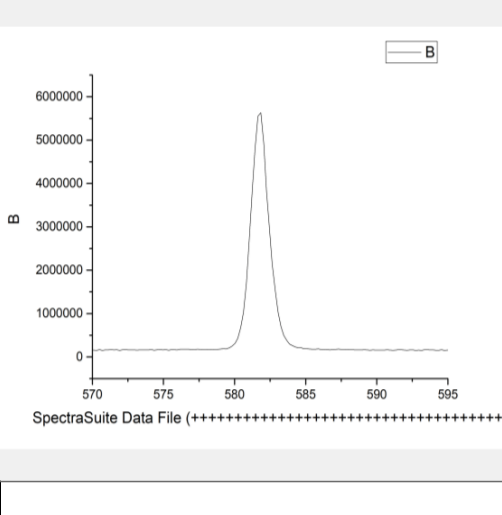
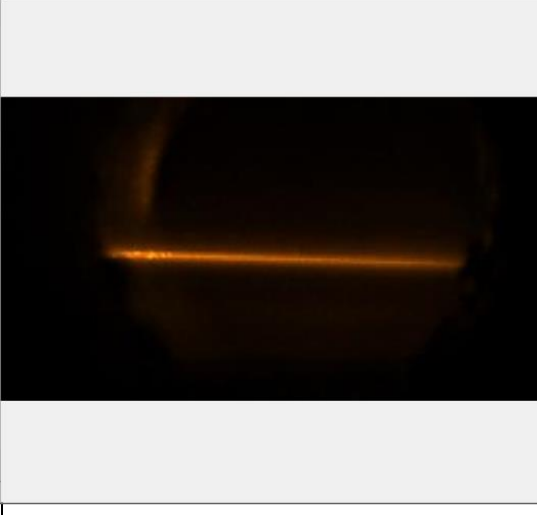
3.2 Описание эксперимента

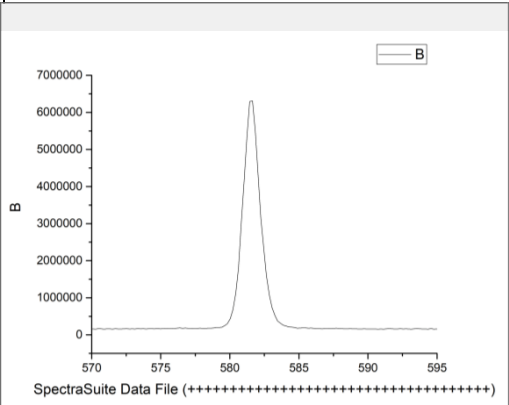
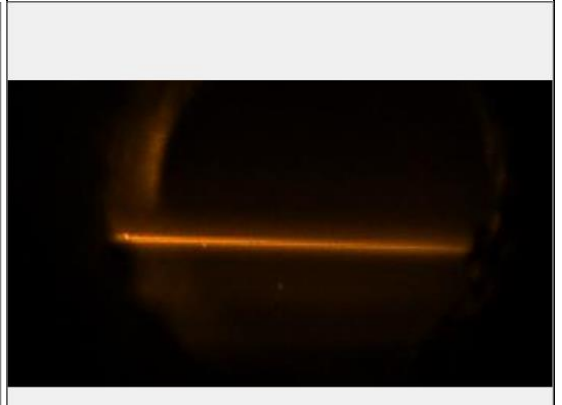
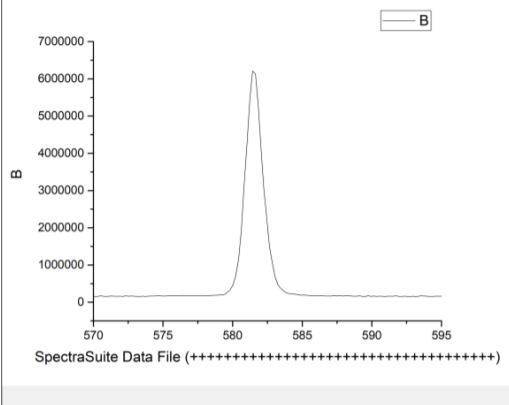
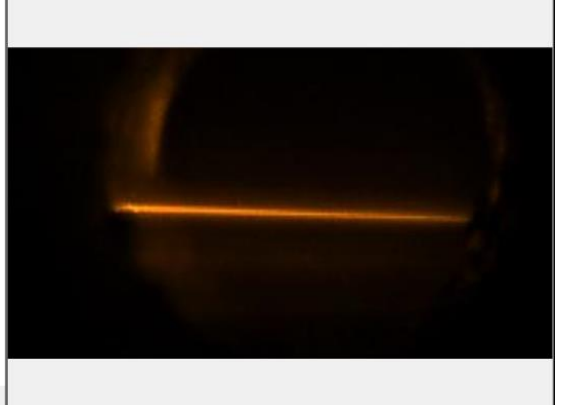
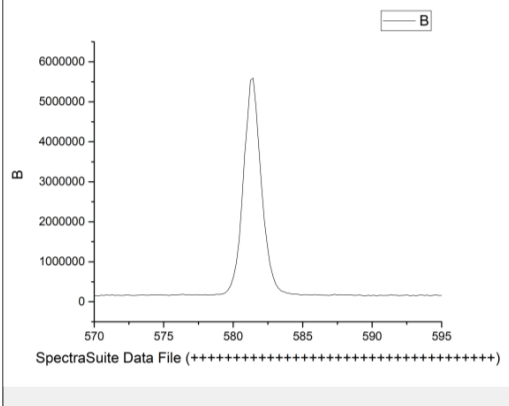
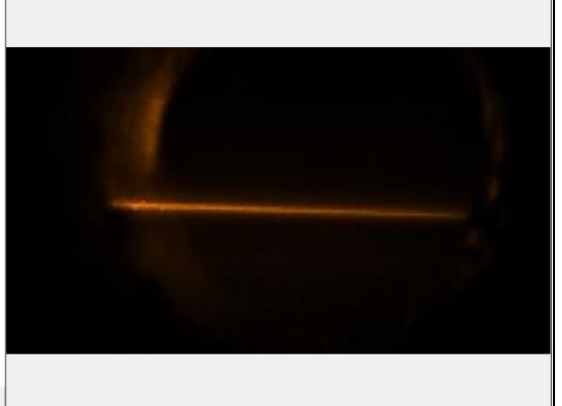
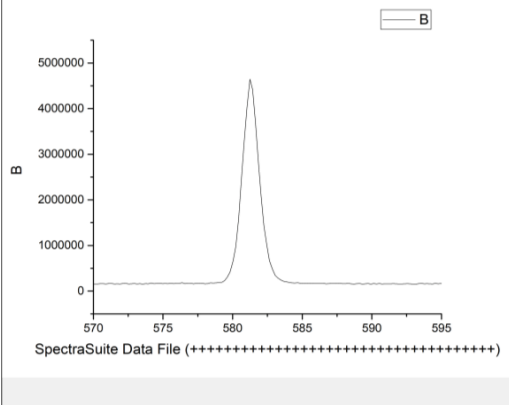

Эксперимент для первого варианта кюветы проводился при двух значениях энергии накачки на лампе Nd:YAG лазера – 18 и 22 Дж/импульс. Для каждой энергии длина волны излучения ЛЖИ – 501 подстраивалась в диапазоне от момента, когда генерация начинала регистрироваться камерой, и до момента, когда генерация пропадала.

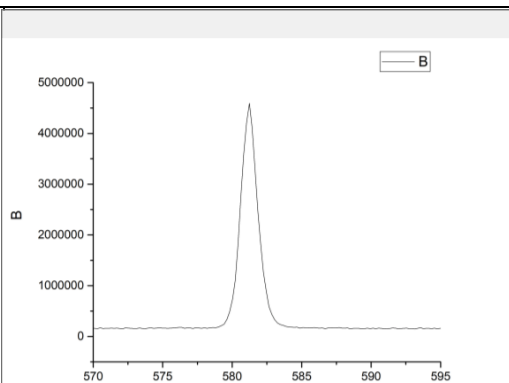
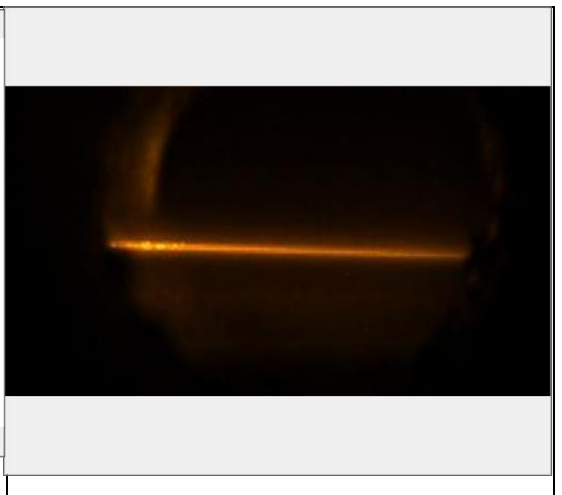
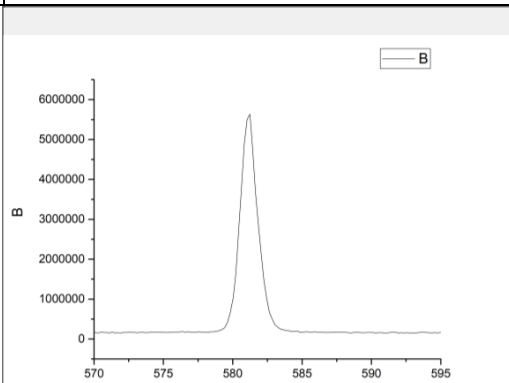
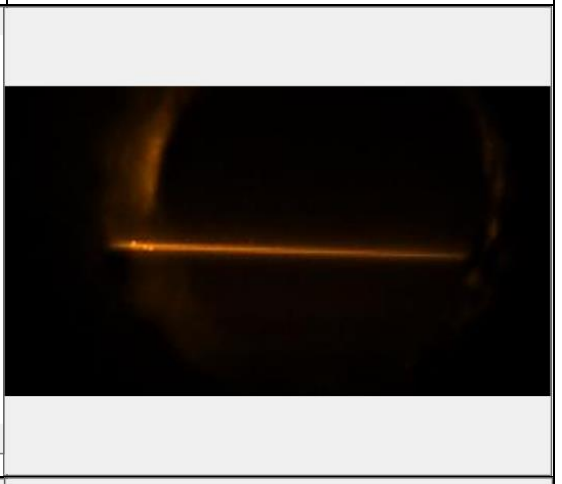
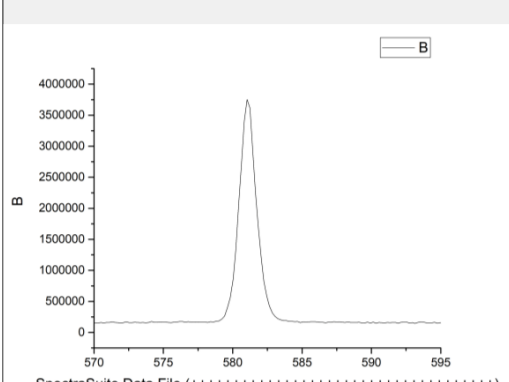
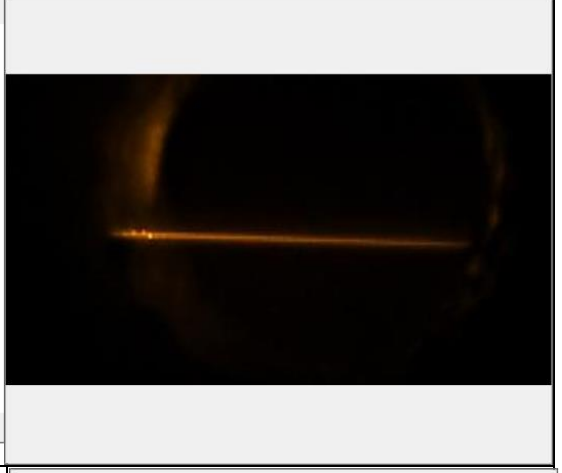
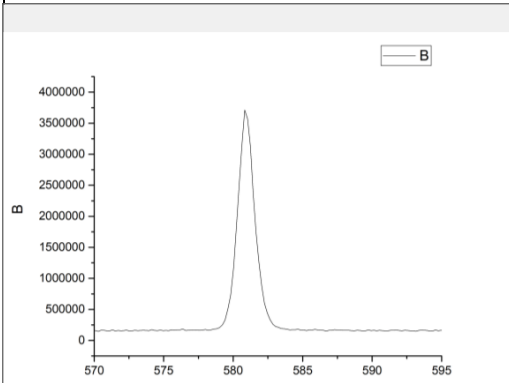

Давление буферного газа в натриевой камере составляло 0,5 атмосферы, температура, до которой нагревалась кювета составляла 330 °С. Результаты эксперимента сведены в таблицы 2 и 3.

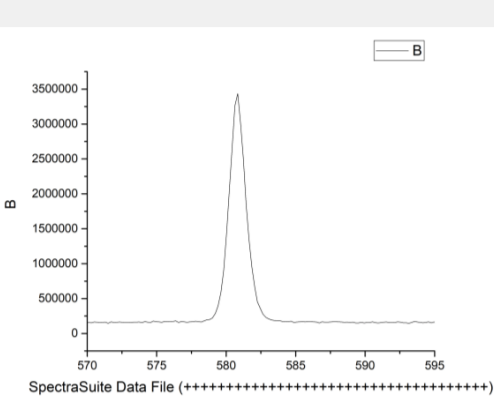

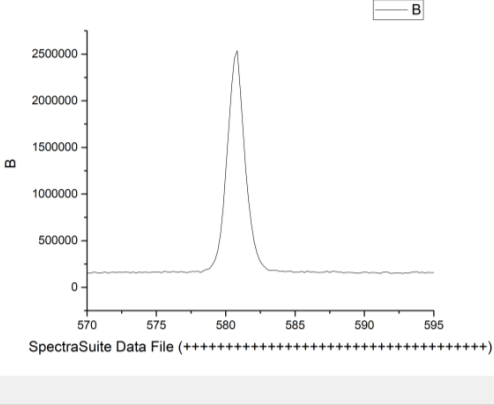

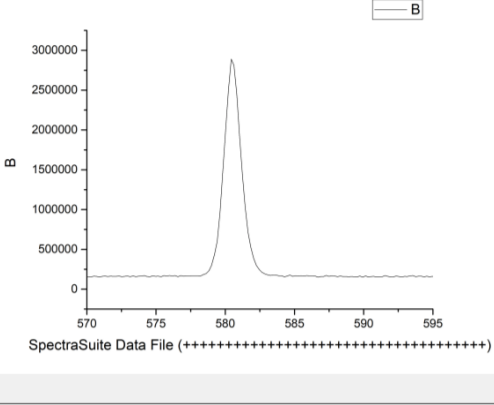


Таблица 3.2.1 — Результат эксперимента при энергии накачки на лампе

Nd:YAG лазера 18 Дж/импульс

Длина волны максимума	Форма спектра	Фотография с камеры
590,9		
590,52		
590,17		

<p>589,97</p>	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
<p>589,94</p>	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
<p>589,78</p>	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
<p>589,7</p>	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	

589,62	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
589,56	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
589,48	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
589,33	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	

589,21	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
589,14	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
588,93	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
		

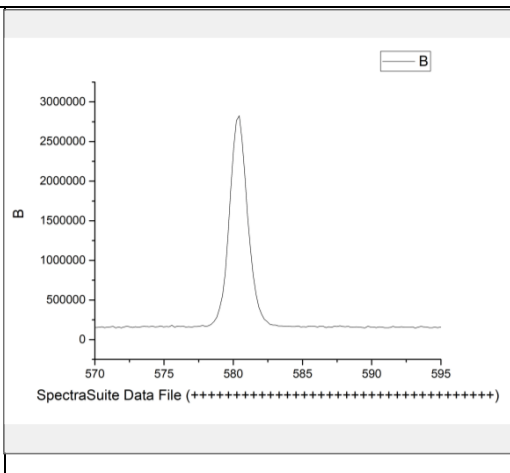
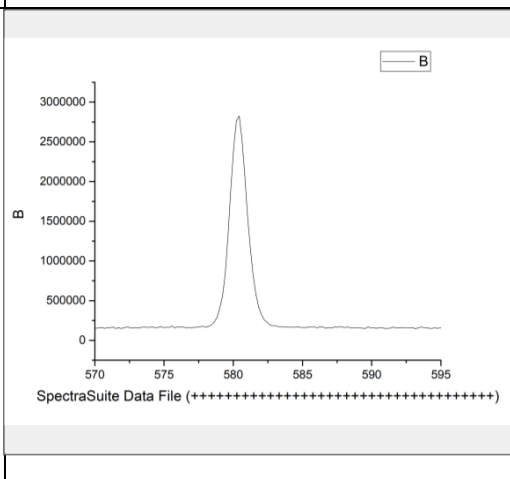
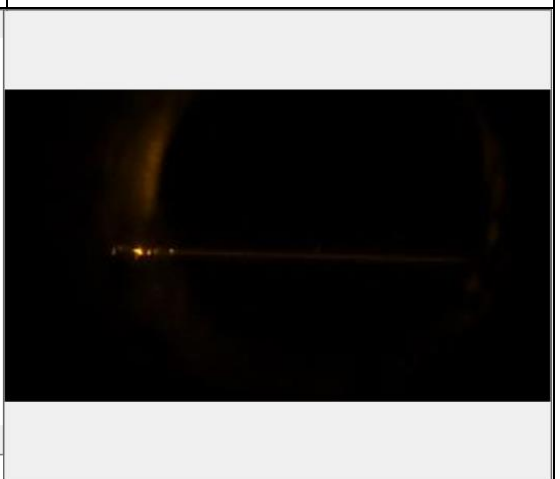
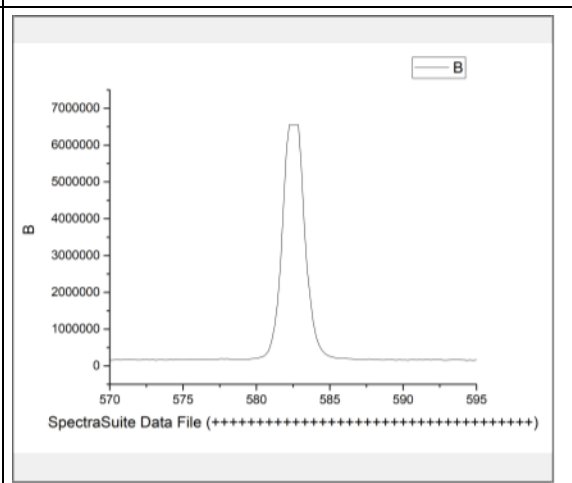

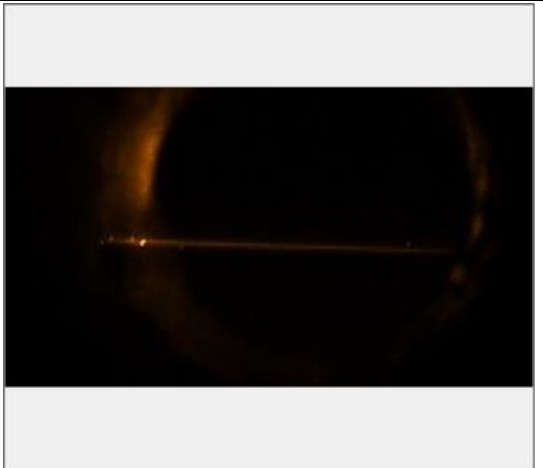
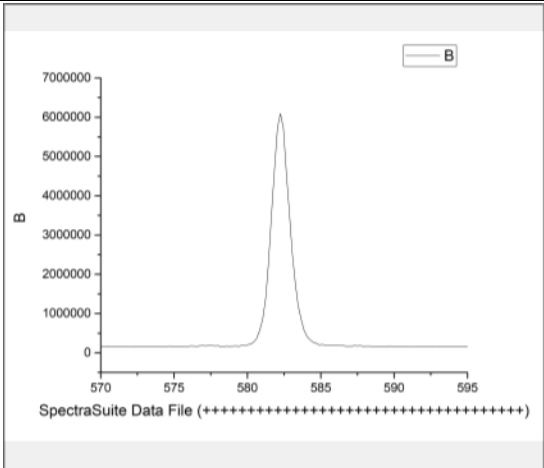
588,78		
588,47		

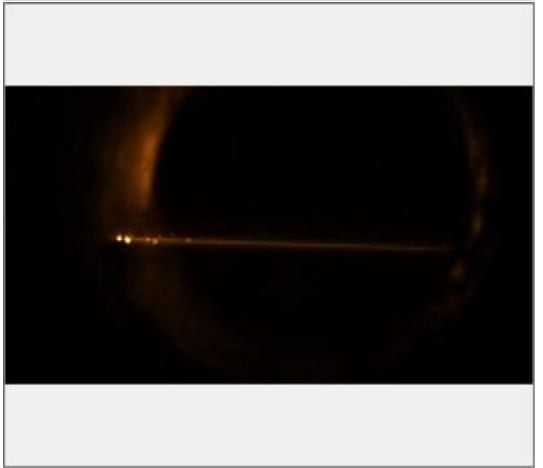
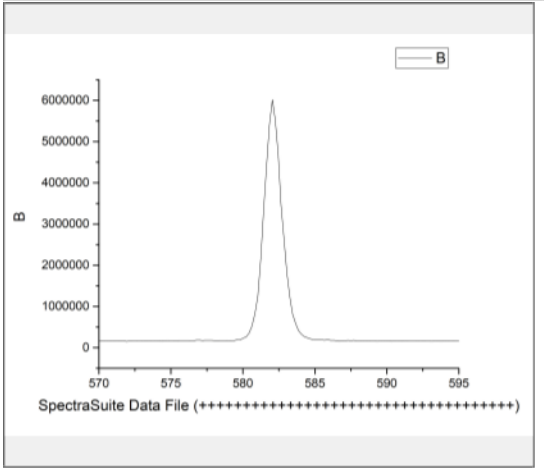
Таблица 3.2.2 — Результат эксперимента при энергии накачки на лампе Nd:YAG лазера 22 Дж/импульс

Длина волны максимума	Спектр	Фотография с камеры
590,54		

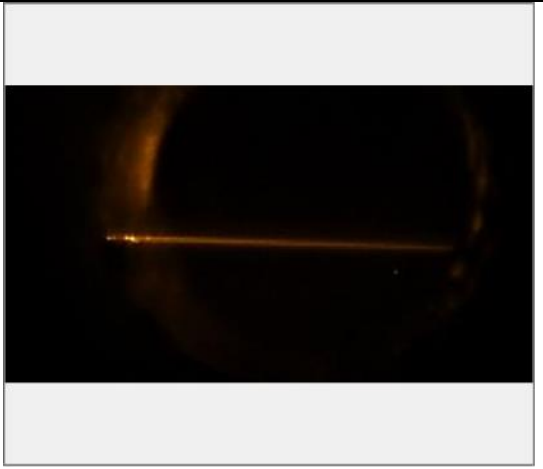
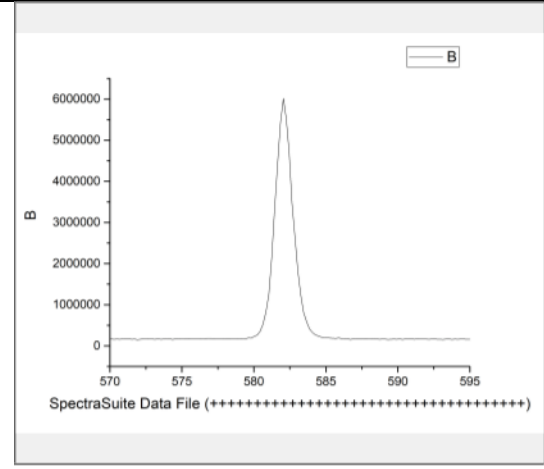
590,27



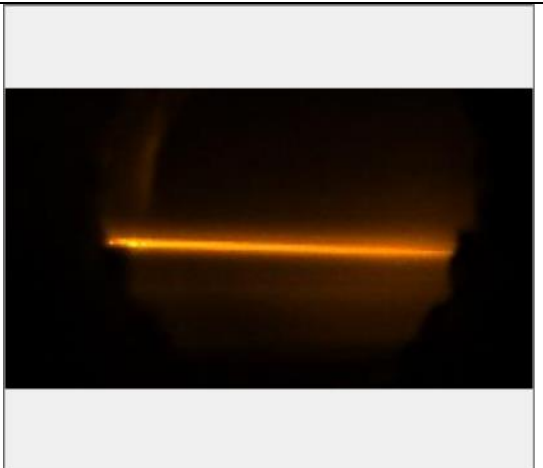
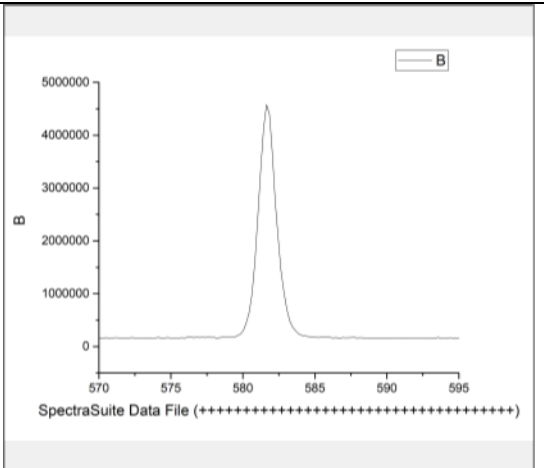
590,08



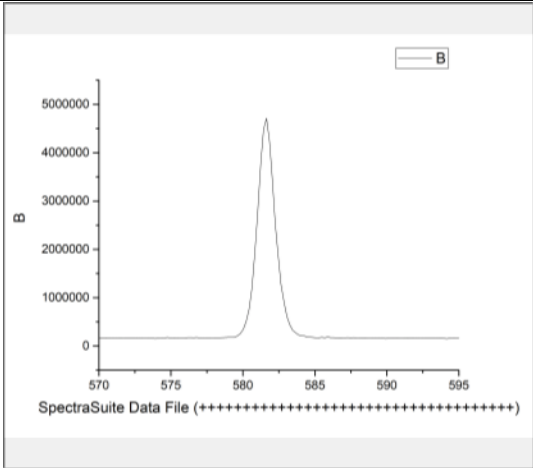
589,92



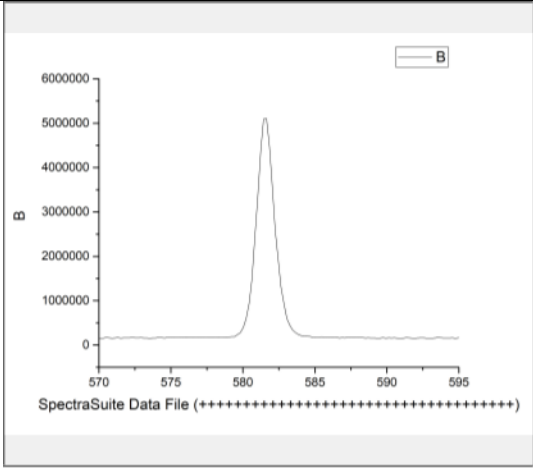
589,7



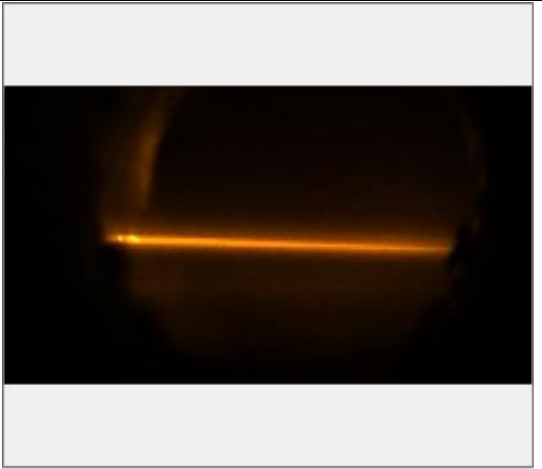
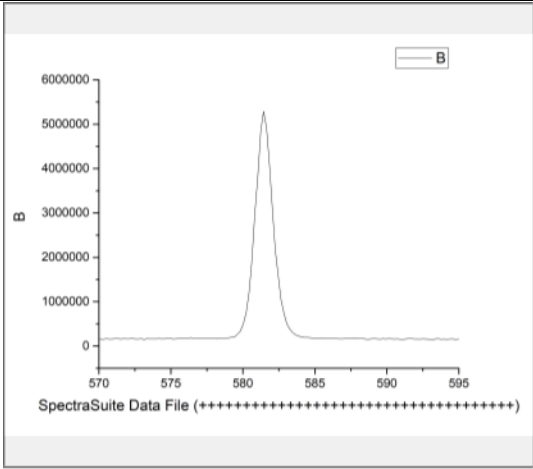
589,62

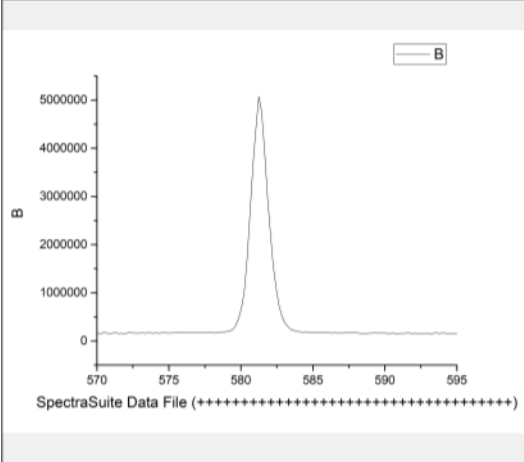
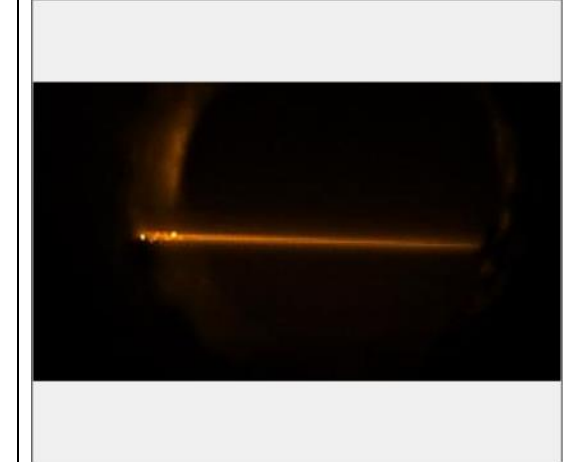
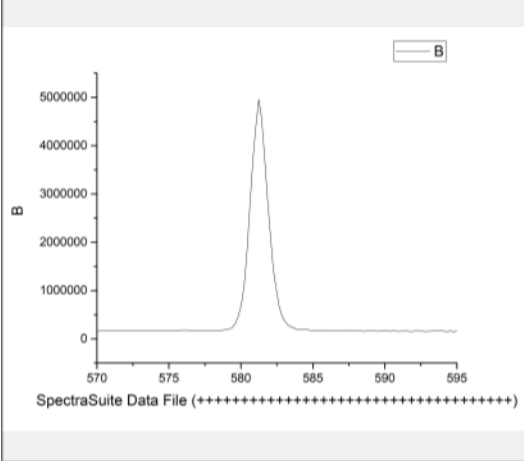
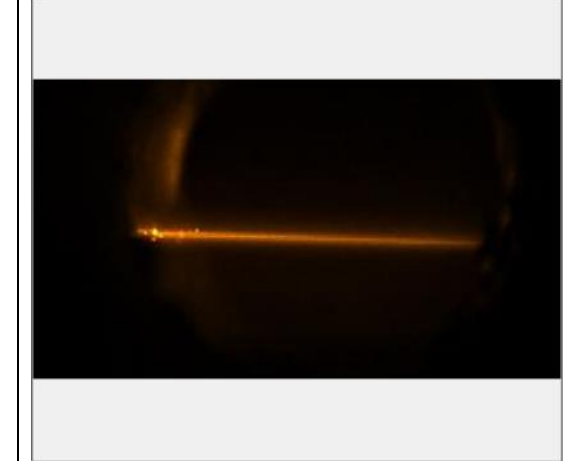
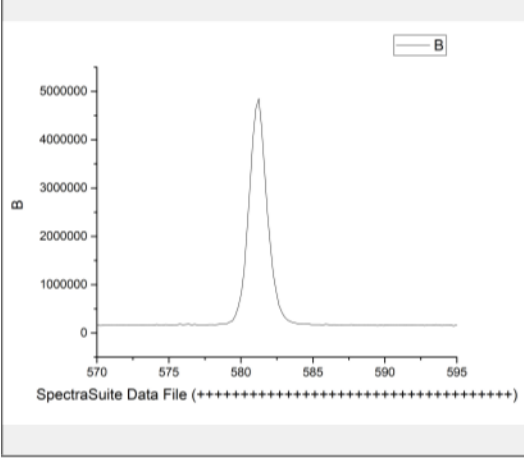

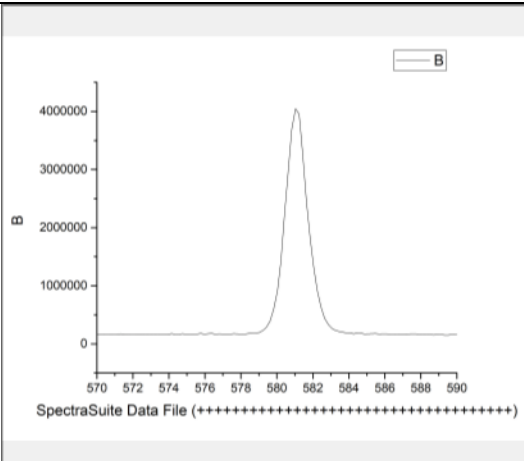
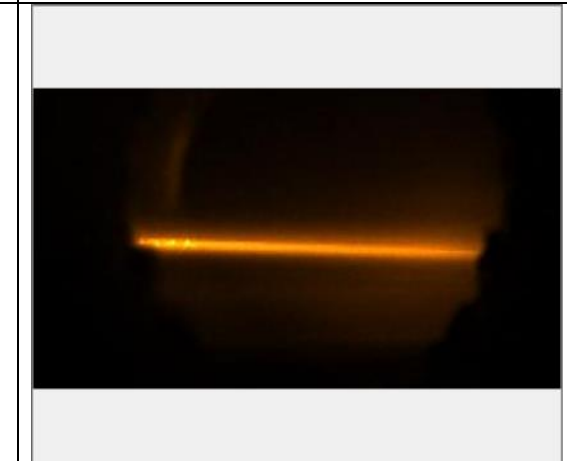


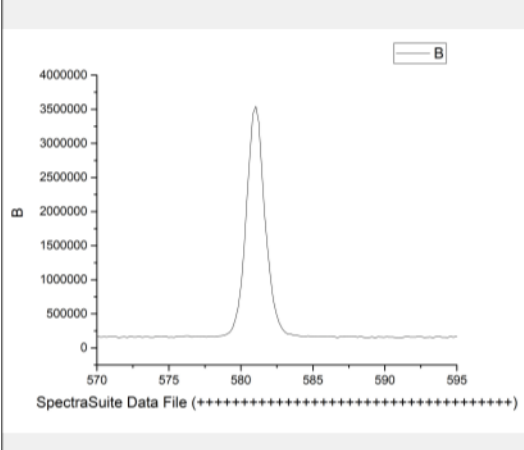
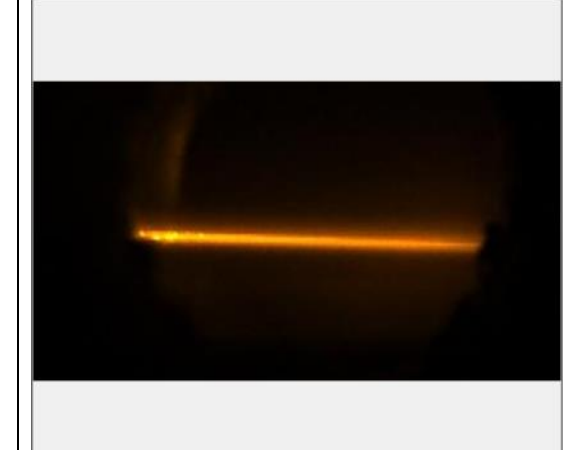
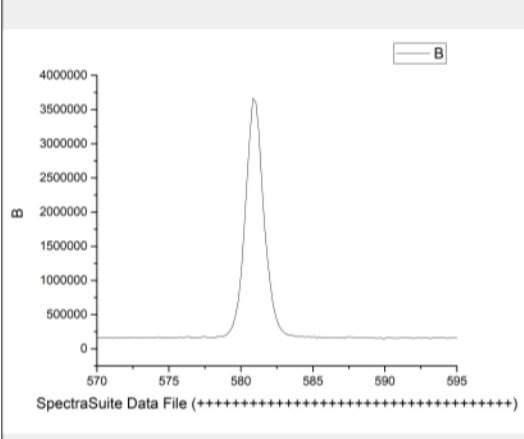

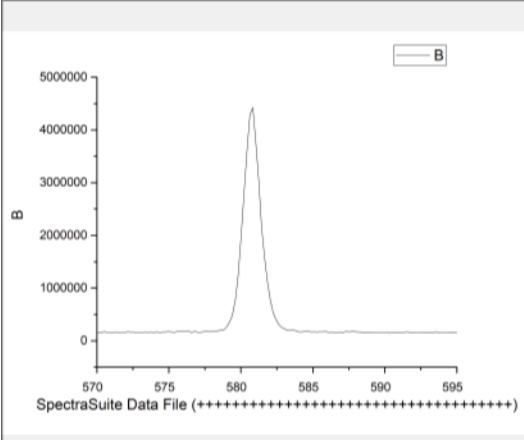

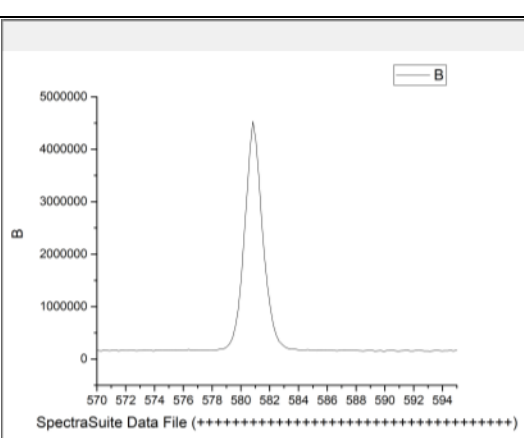
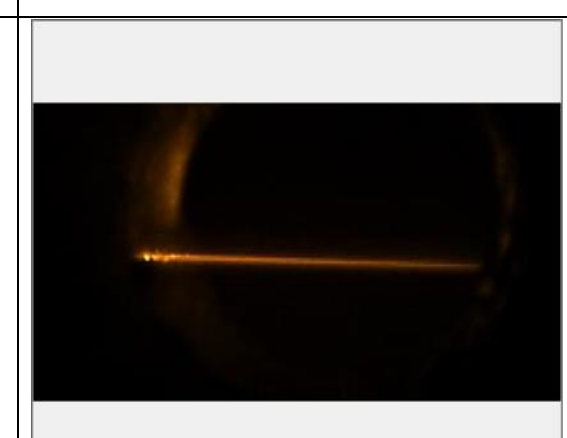
589,58

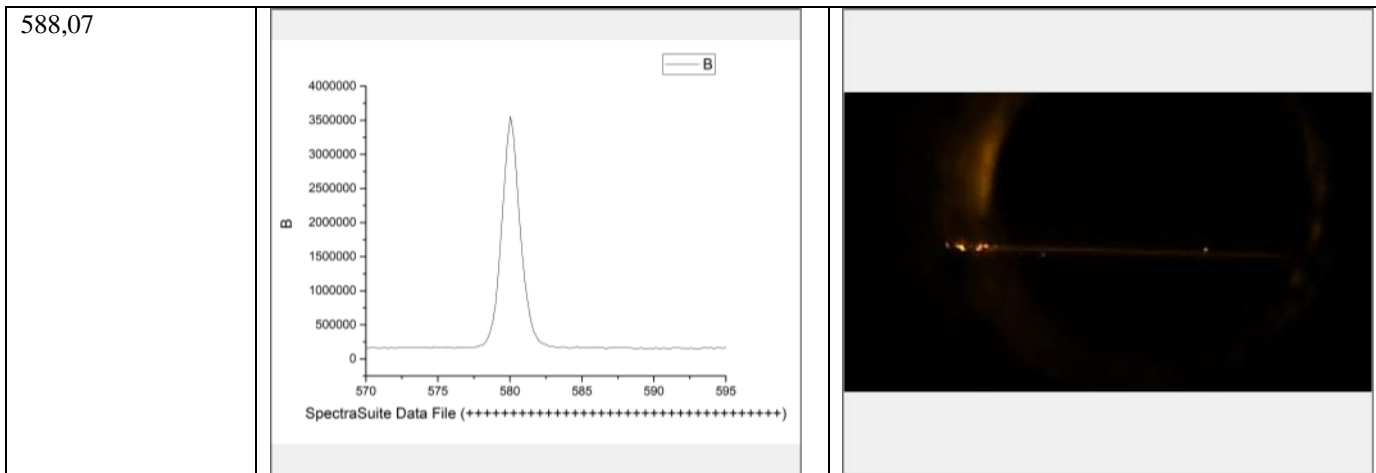


589,47



589,3	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
589,27	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
589,19	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
589,02	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	

589,00	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
588,95	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
588,89	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	
588,77	 <p>SpectraSuite Data File (+++++)</p>	



Перед проведением эксперимента со второй кюветой необходимо было провести испытания нагревателя. Для этого был использован тигель, имитирующий сердечник кюветы. Мощность нагревателя варьировалась от 180 до 220 Вт, частота следования импульсов – около 130 кГц. Тигель нагрелся до температуры порядка 900 °С. Температура определялась по цвету свечения, поэтому точное значение температуры определить невозможно.

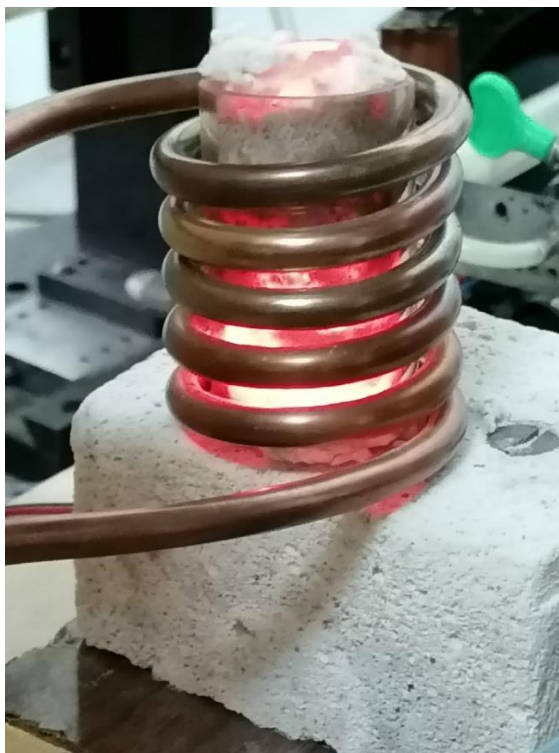


Рисунок 3.2.1 – Нагрев тигля.

Параметры эксперимента:

- Мощность нагрева 200 Вт;
- Буферный газ – неон, давление: 0,5 атм.

Спонтанное излучение паров натрия показано на рисунке 3.2.2. Хорошо видно, что концентрация паров значительно выше, чем при использовании металлической кюветы. Также стоит отметить быстрый нагрев, время которого составило около 6 минут.



Рисунок 3.2.2 – Спонтанное излучение

В ходе испытаний стала очевидной проблема: слишком сильный нагрев выходных окон. Уже спустя 10 мин после начала эксперимента их температура была близка к 40 градусам. Спустя 30 мин – 60; спустя 40 – 70. Также весьма сильно нагревалось пространство над выходными окнами, из-за чего возникали опасения насчет состояния уплотнительных колец верхней крышки. Таким образом, ставка на естественное охлаждение себя не оправдала, и было принято решение организовать обдув при помощи вентилятора. Был проведен аналогичный эксперимент уже с обдувом стекол, в ходе которого установлено, что в течение часа работы температура выходных окон не поднимается выше 40 °С. Более того, в течение первых 30 минут работы температура не поднималась выше комнатной.

Температура буферного газа достигла 275 °С. Однако термопара располагалась не на уровне тигля, а над выходными окнами, из-за чего встал вопрос о распределении температуры по высоте. Было решено снять градиент

температур при разных мощностях, перемещая термопару вниз, в сторону тигля. Начальное положение термопары было принято за нулевую точку. Шаг составлял 4 мм. Для эксперимента были взяты точки: 0; 4; 8; 12 и мощности 200; 300; 400 Вт.

Мощность нагрева ограничилась 400 Вт. Данные сведены в Таблицу 3.2.3. По значениям температуры паров было определено давление натрия в торр.

Таблица 3.2.3. Градиент температуры

Номер	Положение, мм	Установившаяся температура в точке, С	Давление Na, торр
Мощность 200 Вт			
1	0	250	0,0033
2	4	350	0,092
3	8	350	0,092
4	12	375	0,3
Мощность 300 Вт			
1	0	250	0,0033
2	4	275	0,007
3	8	350	0,092
4	12	400	0,57
Мощность 400 Вт			
1	0	300	0,024
2	3	300	0,024
3	8	400	0,57
4	12	450	1,56

В ходе эксперимента стал очевиден недостаток кюветы – неравномерный прогрев. Вследствие этого, пары натрия оседают на стенках кюветы. Предыдущая кювета этого недостатка была лишена благодаря равномерному

нагреву всей поверхности. Предотвратить это можно только путем искусственного снижения мощности нагревателя по мере прогрева камеры. Для этого был проведен эксперимент по определению скорости нагрева тигля.

Измерения проводились с помощью термопары, которая фиксировала температуру внешней стенки тигля. В качестве тела эксперимента брался тигель, имитирующий работу сердечника. Нагрев проводился с помощью индукционного нагревателя с установленными мощностями 100; 200; 300 Вт. Внешний вид установки представлен на рисунке 3.2.3.



Рисунок 3.2.3 – Вид экспериментальной установки для определения температуры стенок тигля

Результаты эксперимента сведены в график, изображенный на рисунке 3.2.4.

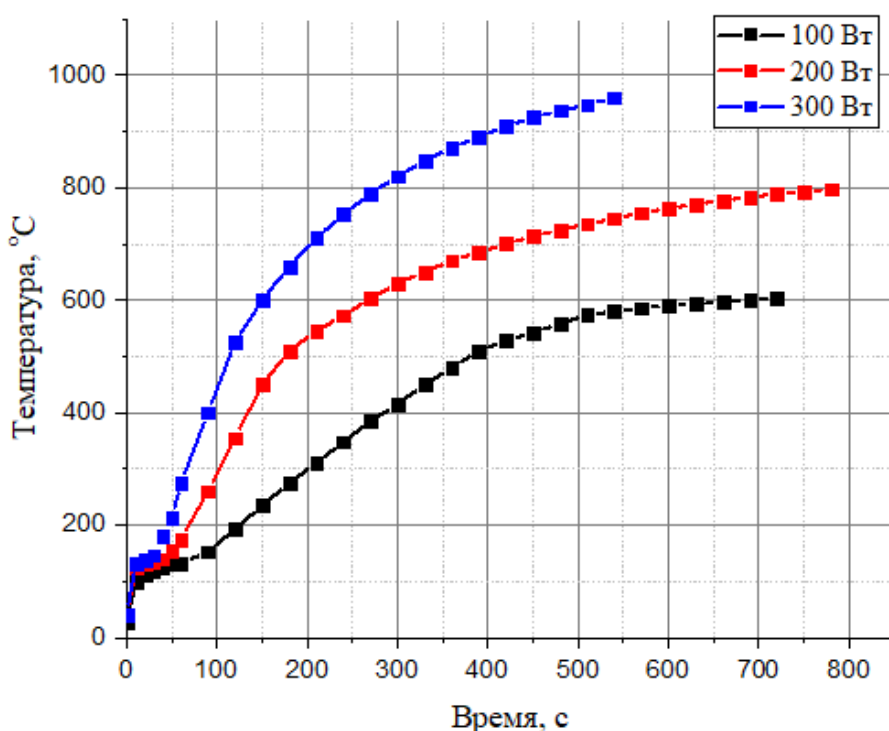


Рисунок 3.2.4 – Зависимость температуры стенки тигля от времени для различных мощностей

Стало очевидно, что использование мощности нагрева выше 300 Вт нецелесообразно из-за высокой скорости нагрева, а также высокой конечной температуры. Оптимальная мощность нагрева лежит в пределах 100-200 Вт.

Теперь необходимо провести регистрацию интенсивности спонтанного излучения паров натрия при нагреве и при остывании. Суть эксперимента заключается в удержании нагрева определенное время, затем его отключение и отслеживание динамики изменения интенсивности излучения. Также данный эксперимент позволит определить время инициации излучения и время оседания паров.

Параметры эксперимента:

- Мощность нагрева 100 Вт;
- Буферный газ – неон, давление: 0,5 атм.

Спектр излучения фиксировался с помощью прибора Ocean Optics USB-4000. Предварительно был снят фоновый спектр при прохождении излучения красителя через кювету при отсутствии нагрева.

Схема экспериментального стенда приведена на рисунке 3.2.5.

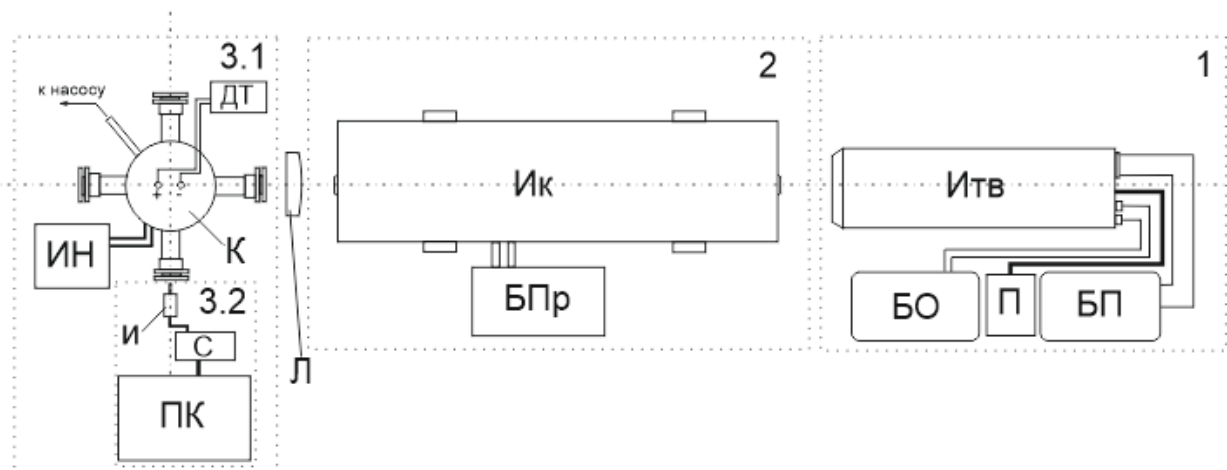


Рисунок 3.2.5 – Схема экспериментального стенда: 1 – твердотельный лазер Lotis LS-2134: ИТВ – излучатель; БО – блок охлаждения; П – пульт управления; БП – блок питания; 2 – лазер на красителях ЛЖИ-501: Ик – излучатель ИЗ-35; БПр – блок прокачки красителя; 3.1 – оборудование для генерации излучения на парах натрия: К – натриевая кювета; ИН – индукционный нагреватель; ДТ – датчик температуры; 3.2 – оборудование для спектроскопии: И – измерительная головка со световодом; С – спектрометр USB-4000; ПК – персональный компьютер

Результат эксперимента при нагревании в течение 3 минут приведены на рисунке 3.2.6.

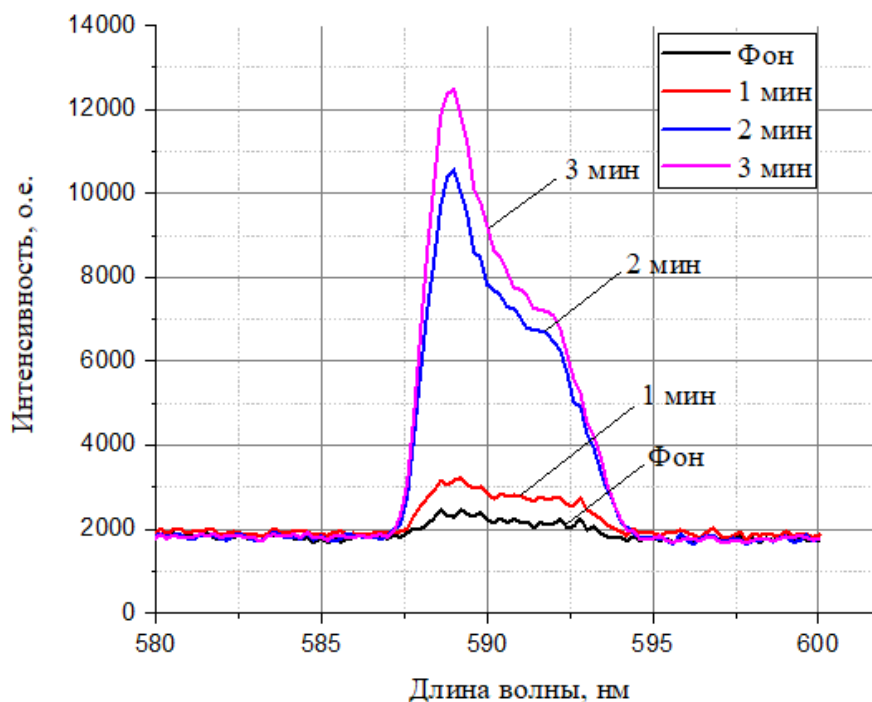


Рисунок 3.2.6 – Интенсивность спонтанного излучения натрия для разных времен нагрева

Из рисунка видно, что инициация происходит через минуту после включения нагрева. Собственно, излучение в виде тонкой полоски, проходящей от одного выходного окна к другому, видно даже невооруженным глазом (рисунок 3.2.7)



Рисунок 3.2.7 – Излучение паров натрия в кювете

При остывании картина излучения выглядит следующим образом (рисунок 3.2.7).

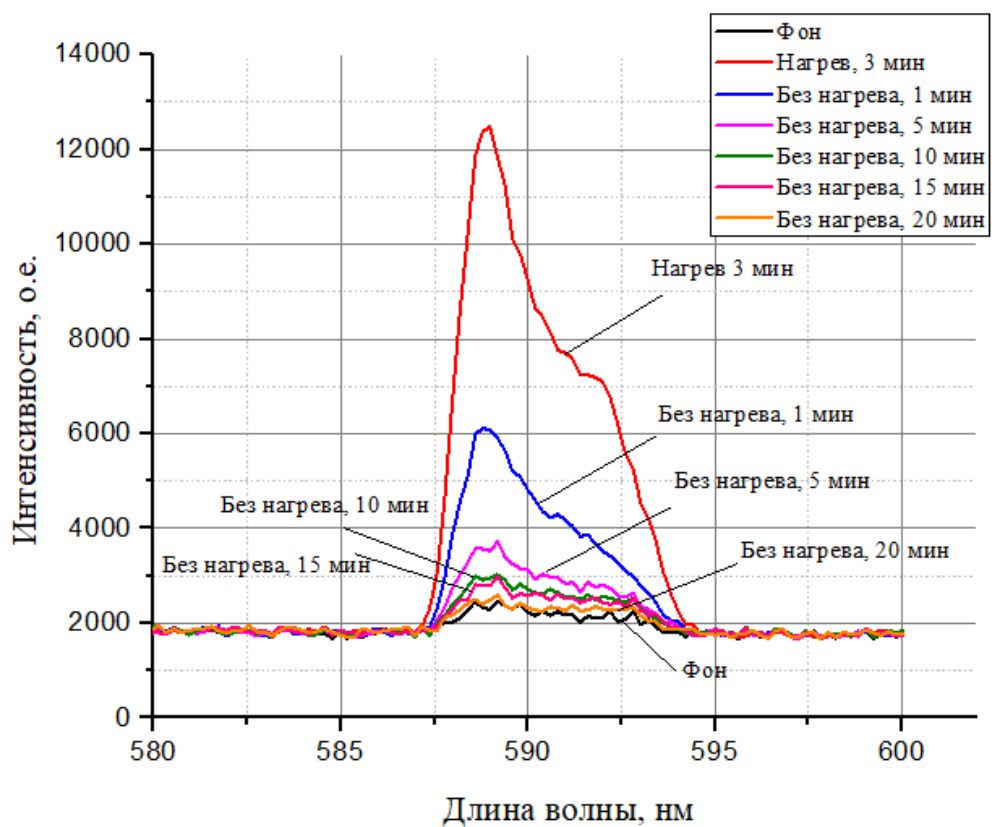


Рисунок 3.2.7 – Интенсивность спонтанного излучения натрия для разных

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

Студенту:

Группа	ФИО
4АМОК	Помазкину Даниилу Андреевичу

Школа	ИШНПТ	Отделение	Отделение информационных технологий
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки 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	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
3. Планирование процесса управления НИТ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИТ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение оценки экономической эффективности определения отношений между пользователями социальной сети Twitter на основе анализа текста сообщений.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИТ
4. Расчёт денежного потока
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИТ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гасанов М.А.	д.э.н.		27.02.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМОК	Помазкин Д.А.		

Тема: «Разработка стенда для оптической накачки лазеров на парах щелочных металлов»

Краткое описание.

Данная ВКР посвящена разработке и созданию стенда для оптической резонансной накачки лазеров на парах щелочных металлов в главной серии. Одна из основных проблем, препятствующих развитию лазерных установок заключается в низком КПД лазерных устройств. Одним из способов повышения КПД и, как следствие, энерго- и ресурсоэффективности, что особенно важно в период разразившегося энергетического кризиса в мире, является подбор такого активного вещества, квантовый КПД которого будет стремиться к 100%.

Таковыми веществами являются щелочные металлы. Щелочные металлы обладают колоссальным квантовым КПД >95%, что способно увеличить КПД установок на 5-15 пунктов в зависимости от типа лазера. Хотя щелочные лазеры не являются универсальным решением, их распространение важно для развития науки, астрономии, машиностроения и медицины. Лазеры настолько прочно вошли в нашу жизнь, что без их развития и без развития отечественных лазеров невозможно представить себе нормальное существование производства, науки и экономики.

В данной ВКР предложен способ накачки лазеров на парах щелочных металлов при помощи достаточно дешевого лазера на красителях взамен более популярного, но дорогого лазерного диода. Помимо стоимости лазер на красителях обладает еще одним преимуществом – возможностью изменения частотного диапазона лазера, что позволяет использовать одну и ту же установку для накачки разных лазеров при простой смене красителя или перестройке длины волны старого красителя.

Таким образом, данная ВКР обладает большим потенциалом для внедрения в рынок, предлагая конкурентное преимущество не только перед лазерами другого типа, но и перед уже существующими лазерами на парах щелочных металлов.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Предпроектный анализ

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Выбор и анализа целевого рынка – это один из фундаментальных этапов оценки НТИ. Для этого необходимо произвести сегментирование рынка, определив предварительно потенциальных потребителей. Очевидно, что лазерные установки не нужны и недоступны для рядового потребителя, поэтому основными потребителями будут организации коммерческого и некоммерческого характера. Их можно оценивать как с точки зрения размера предприятия, так и с точки зрения сфер деятельности. Если речь идет о промышленности, то это в первую очередь обрабатывающее оборудование (лазерные станки, 3D принтеры) и системы контроля (неразрушающий контроль). Сфера услуг также нуждается в лазерах. Например, медицина уже давно использует лазер в офтальмологии, проведении операций, косметологии, онкологии и т.д. С точки зрения науки лазеры на парах щелочных металлов также представляют интерес, например, для юстировки оптики. Они могут потреблять как промышленное оборудование для собственных нужд и исследований конечных продуктов производства, так и научно-исследовательское оборудование (натриевые опорные звезды). Для наглядности составлена карта сегментирования рынка, приведенная в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по разработке интернет-ресурсов.

		Вид деятельности			
		Производство		Сфера услуг	Научно-исследовательские организации
		Промышленное оборудование	Системы контроля		
Размер компании	Мелкие				
	Средние				
	Крупные				

Фирма А
 Фирма Б
 Фирма В

4.1.2. Анализ конкурентных решений

В ходе исследования будут рассматриваться три варианта реализации стенда для накачки лазеров на парах щелочных металлов:

1. Накачка лазерным диодом.
2. Накачка широким спектром излучения.
3. Накачка лазером на красителях.

Поскольку необходим объективный анализ достоинств и недостатков каждого варианта исполнения, необходимо провести анализ. В таблице 4.1 показано сравнение разработок-конкурентов (1-2) и разработки данного НИ (3) с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4.1 – Сравнение конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,06	5	2	5	0,3	0,12	0,3
2. КПД установки	0,2	4	2	3	0,8	0,4	0,6
3. Универсальность	0,06	1	5	4	0,06	0,3	0,24
4. Ширина спектра накачки	0,16	4	1	4	0,64	0,16	0,64
5. Простота обслуживания и эксплуатации	0,08	3	5	3	0,32	0,4	0,24
6. Длительность импульсов генерации	0,14	3	3	5	0,42	0,42	0,7
7. Габариты	0,06	5	5	2	0,3	0,3	0,12
8. Безопасность	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,06	4	2	4	0,24	0,12	0,24
2. Стоимость оборудования	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,02	4	4	3	0,08	0,08	0,06
4. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,02	3	1	3	0,06	0,02	0,06
Итого	1	45	39	44	3,68	2,98	3,76

Расчет конкурентоспособности, на примере качества пучка гибридного лазера определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,12 \cdot 5 = 0,6,$$

где K – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

Из приведенного анализа видно, что накачка при помощи красителей пусть и незначительно, но обходит по экономическим и техническим

критериям эффективности сильнейшего конкурента – лазерный диод.

Связано это с решением более широкого спектра задач, а также дешевизной оборудования.

4.1.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Матрица составляется на основе анализа рынка и конкурентных технических решений, и показывает сильные и слабые стороны проекта, возможности и угрозы для разработки.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Матрица SWOT представлена в таблице 4.2

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Универсальность метода накачки по отношению к активному веществу	Сл1. Габариты стенда
С2. Широкий спектр применения	Сл2. Сложность эксплуатации активного вещества
С3. Экологичность технологии.	Сл3. Необходимость согласования мощностей модулей при разработке конструкций другой мощности.
С4. Относительная простота регулировки мощности	
С5. Низкая стоимость источника накачки по сравнению с конкурентной технологией	
С6. Наличие спроса на технологию	
Возможности	Угрозы
В1. Возможность создания мощного импульсного лазера	У1. Санкционные риски поставки оборудования и экспорт технологии.

В2. Возможность применения в различных отраслях: от промышленности до медицины	У2. Развитая конкуренция технологий производства
В3. Возможность построения лабораторной установки	
В4. Энергетический кризис	
В5. Субсидирование государством развития отечественного производства и технологий в условиях санкций	

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научноисследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.3–4.6

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

		Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Возможности проекта	V1	+	+	-	+	+	+
	V2	-	+	-	-	+	+
	V3	+	+	+	+	+	-
	V4	+	+	+	-	+	+
	V5	-	+	-	-	+	+

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

		Сл1	Сл2	Сл3
Возможности проекта	V1	-	-	+
	V2	+	+	-
	V3	+	+	-
	V4	-	-	-
	V5	-	-	-

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

Сильные стороны проекта

Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	У1	-	-	-	-	-	+
	У2	+	+	+	-	-	+

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

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

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>С1. Универсальность метода накачки по отношению к активному веществу</p> <p>С2. Широкий спектр применения</p> <p>С3. Экологичность технологии. С4. Относительная простота регулировки мощности</p> <p>С5. Низкая стоимость источника накачки по сравнению с конкурентной технологией</p> <p>С6. Наличие спроса на технологию</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>Сл1. Габариты стенда</p> <p>Сл2. Сложность эксплуатации активного вещества</p> <p>Сл3. Необходимость согласования мощностей модулей при разработке конструкций другой мощности.</p>
<p>Возможности В1.</p> <p>Возможность создания мощного импульсного лазера</p>	<p>Универсальность конструкции и, как следствие, широкий спектр применений позволяет создать на базе стенда практически любую установку, что</p>	<p>Существует спектр задач (в т.ч. промышленных), решить которые лазер на парах щелочных металлов не в состоянии.</p>

<p>В2. Возможность применения в различных отраслях: от промышленности до медицины</p> <p>В3. Возможность построения лабораторной установки</p> <p>В4. Энергетический кризис</p> <p>В5. Субсидирование государством развития отечественного производства и технологий в условиях санкций</p>	<p>существенно расширяет номенклатуру выпускаемой продукции.</p> <p>Простота регулировки параметров существенно облегчает работу оператора, а низкая стоимость источника накачки позволяет привлекать к работе с лазером неквалифицированный персонал</p> <p>Установка может использоваться в научных целях</p>	<p>Габариты стенда существенно осложняют применения лазера в задачах с ограниченным пространством, а также негативно влияет на простоту эксплуатации в виду неподвижности конструкции</p>
<p>Угрозы</p> <p>У1. Санкционные риски поставки оборудования и экспорт технологии.</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства</p>	<p>Значительная часть комплектующих базируется на импортных товарах, которые может оказаться тяжело найти в условиях санкций</p> <p>Несмотря на конкуренцию, благодаря широкому спектру применения возможно занять определенную технологическую нишу.</p>	<p>При проектировании стенда для более высоких мощностей может оказаться необходимым заказывать комплектующие из-за границы. Из-за санкционных ограничений может возникнуть дисбаланс в мощности модулей, что приведет к избыточным тратам.</p> <p>Несмотря на конкурентные преимущества, технология неизвестна потребителям и не</p>

		прошла проверку массами.
--	--	--------------------------

SWOT – анализ показывает, что, несмотря на ряд конкурентных преимуществ, основной угрозой для развития НИ является санкционные риски, которые способны поставить под удар поставку комплектующих и выход на внешний рынок. Во избежание этой угрозы рекомендуется ориентироваться на отечественную продукцию и продукцию дружественных стран. Например, Nd:YAG лазер LOTIS, использующийся для накачки лазера на красителях, производится в Беларуси.

4.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла ни находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4

5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	5
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	3
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	3
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	3
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	4
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	52	55

Поскольку суммарное количество баллов находится в пределах 44 – 59, то можно говорить о том, что перспективность проекта выше среднего. Имеется достаточно сведений об отраслях, а также о товарной форме. Кроме того, имеется сеть потенциальных потребителей не только в России, но и за рубежом. Также имеется команда разработчиков, обладающая достаточным объемом знаний, в том числе для консультации и технической поддержки. Однако по-прежнему отсутствуют маркетинговые исследования и бизнес-план. Для составления вышеизложенных пунктов возможно привлечение компетентных в области планирования бизнес-стратегии людей.

4.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

В современном мире любая разработка оценивается с точки зрения потенциала к коммерциализации при реализации на рынке. Перспективность проекта, определенная в разделе 1.4.1 помогает нам в выборе способов коммерциализации. Поскольку перспективность оценена как «выше среднего», наиболее эффективными методами коммерциализации могут стать:

- Торговля патентными лицензиями;
- Передача ноу-хау;
- Инжиниринг.

Инжиниринг является наиболее вероятным, поскольку компонентная база НТИ весьма широка, и может варьироваться в зависимости от поставленных задач (источники питания различной топологии и мощности, различные конструкции лазеров на красителях и пр.).

С осторожностью можно попробовать организовать собственное предприятие, желательно совместное. Есть уже налаженная сеть потребителей продукции, с которыми можно работать, пока продумывается стратегия расширения рынков сбыта.

4.2. Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

4.2.1. Цели и результаты проекта

Перед определением целей необходимо перечислить заинтересованные стороны проекта. Информация по заинтересованным сторонам представлена в таблице 4.9:

Таблица 4.9 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Промышленность	Дешевый лазер с высоким КПД
Производитель	Получение прибыли со своего продукта
Научный руководитель, студент	Выполненная выпускная квалификационная работа

Цели и результат проекта представлены в таблице 4.10:

Таблица 4.10 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	<ul style="list-style-type: none"> • Анализ научной литературы по теме • Спроектировать техническое решение, которое при малых затратах способно произвести люминесценцию паров щелочных металлов • Произвести расчет стоимости • Произвести эксперименты, доказывающие эффективность разработки • Реализовать производство • Внедрить разработку
Ожидаемые результаты проекта:	Успешное внедрение разработки на рынок
Критерии приемки результата проекта:	Успешная люминесценция паров щелочных металлов на требуемых мощностях
Требования к результату проекта:	Требование: <ul style="list-style-type: none"> • Разработка может являться источником накачки лазеров на парах щелочных металлов • Разработка полностью соответствует проектным решениям.

4.2.2. Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 4.11).

Таблица 4.11 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
1.2.3.1 Бюджет проекта	549 546 рублей
1.2.3.1.1 Источник финансирования	ИОА СО РАН
1.2.3.2 Сроки проекта	01.01.2022 – 31.05.2022
1.2.3.2.1 Фактическая дата утверждения плана управления проектом	12.12.2021
1.2.3.2.2 Плановая дата завершения проекта	31.05.2022

4.3. Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1. Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рисунке №2 представлен шаблон иерархической структуры.

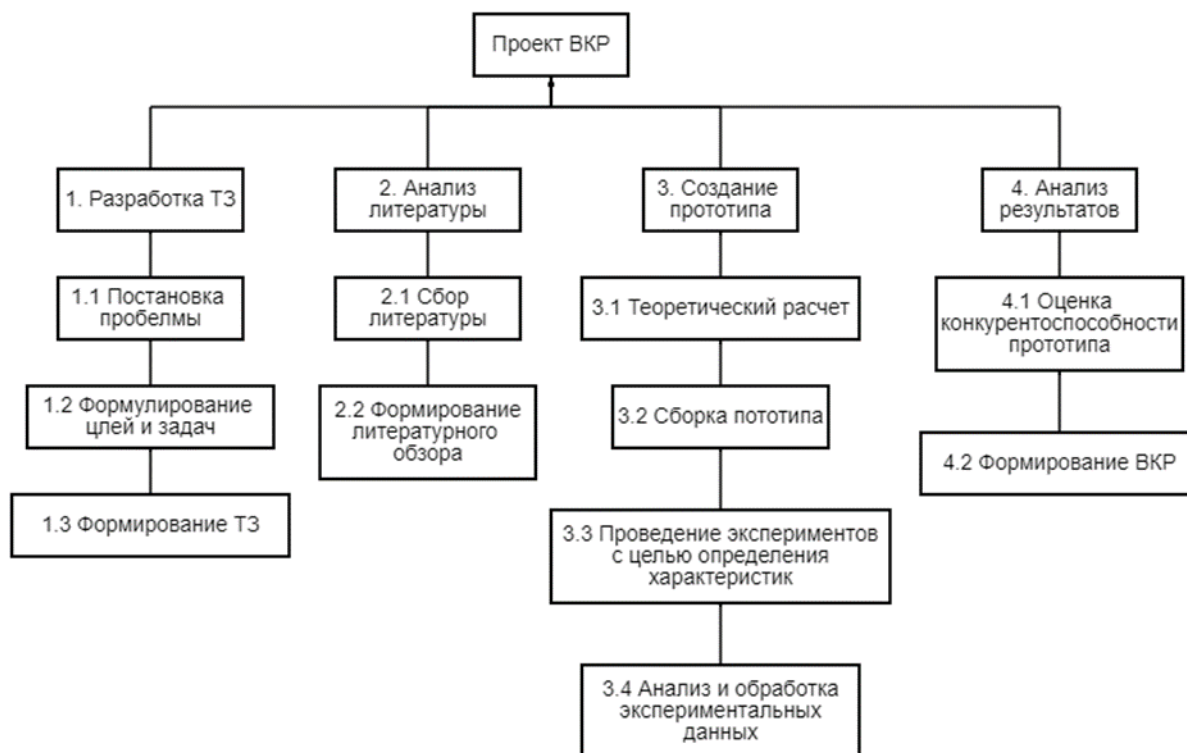


Рисунок 2 – Иерархическая структура по ВКР

4.3.2. План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Таблица 4.12 – Календарный план проекта

Код работ ы (ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начал а работ	Дата окончан ия работ	Состав участник ов
1	Разработка ТЗ	2	01.02	02.02	Тригуб М.В.
1.1	Постановка проблемы	0.5	01.02	01.02	
1.2	Формирование целей и задач	0.5	01.02	01.02	
1.3	Формирование ТЗ	1	02.02	02.02	
2	Анализ литературы	22	03.02	04.03	Помазкин Д.А.
2.1	Сбор литературы	17	03.02	24.02	
2.2	Формирование литературного обзора	5	25.02	04.03	
3	Создание прототипа	43	07.03	06.05	

3.1	Теоретический расчет	15	07.03	25.03	Помазкин Д.А.
3.2	Сборка прототипа	18	28.03	13.04	
3.3	Проведение экспериментов с целью определения характеристик	9	14.04	26.04	Помазкин Д.А., Тригуб М.В.
3.4	Анализ и обработка экспериментальных данных	6	27.04	06.05	Помазкин Д.А.
4	Анализ результатов	15	11.05	31.05	Помазкин Д.А.
4.1	Оценка конкурентоспособности прототипа	3	11.05	13.05	Помазкин Д.А.
4.2	Формирование ВКР	12	16.05	31.05	Помазкин Д.А., Тригуб М.В.
Итого:		82	01.02	31.05	

Диаграмма Ганта – это 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.

Таблица 4.13 – Диаграмма Ганта

Код работы	Вид работ	Исполнители	Т _к кал. дни	Сроки выполнения работ														
				Февраль			Март			Апрель			Май					
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Разработка ТЗ	Руководитель	2	■														
1.1	Постановка проблемы		0.5	■														
1.2	Формирование целей и задач		0.5	■														
1.3	Формирование ТЗ		1	■														

2	Анализ литературы	Инженер-Дипломник	22												
2.1	Сбор литературы		17												
2.2	Формирование литературного обзора		5												
3	Создание прототипа		43												
3.1	Теоретический расчет	Инженер-Дипломник	15												
3.2	Сборка прототипа		18												
3.3	Проведение экспериментов с целью определения характеристик	Инженер-Дипломник, Руководитель	9												
3.4	Анализ и обработка экспериментальных данных	Инженер-Дипломник	6												
4	Анализ результатов		15												
4.1	Оценка конкурентоспособности прототипа	Инженер-Дипломник	3												
4.2	Формирование ВКР	Инженер-Дипломник,	12												

		Руководитель																		
		тель																		

 - Руководитель

 - Инженер-дипломник

График строится в виде табл. 4.13 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

4.3.3. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице.

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Для разработки нынешней системы требуется обычное оборудование в виде персонального компьютера и купленных серверов на время жизненного цикла программного продукта. Среда и средство разработки, программный софт и другие комплектующие, нужные для разработки, распространяются бесплатно и не требуют дополнительных затрат.

Таблица 4.14 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1.	Lotis ТП ls-2139	1	350 (цена договорная)	350
2.	Транзисторы IRFP 460	4	0.69	2.76
3.	Одноканальный драйвер MAX 4420	4	0.87	3.48
4.	Полумост с	1	0.39	0.39

	генератором IR 2153			
5.	ЛАТР SUNTEK 2000ВА диапазон 0-300 Вольт (8А)	1	14,120	14,120
6.	Помпа для аквариума	3	0,69	2,07
7.	Электронные компоненты (провода, диоды, конденсаторы, сердечники, текстолит и.т.д)	-	-	5
8.	Канцелярские принадлежности	-	-	1
9.	Лазер на красителях ЛЖИ-501. (Снят с производства, поэтому указана цена аналога)	1	46	46
Итого:				424,82

Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда). Расчет основной заработной платы сводится в табл. 5.11.

Таблица 4.15 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнитель и по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Зарботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., руб	Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб.
-------	---------------------	-----------------------------	------------------------	---	--

1	Руководитель	23	1700	39100
2	Магистр	80	500	40000
Итого:				79100

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.5)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} \quad (4.6)$$

где $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн. (таблица 14);

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

Значит, для руководителя:

$$Z_{осн} = 1700 \cdot 23 = 39100 \text{ рублей}$$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = (Z_m \cdot M) / F_d \quad (4.7)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб (в качестве месячного оклада магистра выступает стипендия, которая составляет 2650 руб);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 28 раб. дней $M=10,4$ месяца, 5 - дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях) (табл.14). Тогда,

Для руководителя:

$$Z_{дн} = \frac{39100 \cdot 10,4}{254} = 1576,31 \text{ рублей}$$

Для дипломника:

$$Z_{дн} = \frac{500 \cdot 10,4}{217} = 23,6 \text{ рублей}$$

Баланс рабочего времени представлен в таблице 5.12.

Таблица 4.16 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	82
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	45	52
- невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	254	217

Таблица 4.17 – Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	З _б , руб.	k _р	З _м , руб	З _{дн} , руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	1700	1.3	45000	1576,31	23	39100
Магистр	500		15000	23,6	80	40000
Итого по статье З _{осн} :						79100

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * Z_{\text{осн}} \quad (4.9)$$

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

k_{доп} – коэффициент дополнительной зарплаты (k_{доп} = 0,1);

Z_{осн} – основная заработная плата, руб.

Для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = 39100 * 0,1 = 3910 \text{ рублей}$$

В таблице 4.18 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.18 – Заработная плата исполнителей ВКР, руб

Заработная плата	Руководитель	Магистр
Основная зарплата	39100	40000
Дополнительная зарплата	3910	–
Зарплата исполнителя	43010	40000
Итого	83010	

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (43010 + 40000) = 24903 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

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

Накладные расходы

В эту статью относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (4.11)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (39100 + 3910) = 12903 \text{ руб.}$$

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в

качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 4.19 – Бюджет затрат НТИ

№	Затраты по статьям						
	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Накладные расходы	Отчисления на социальные нужды	Итого плановая себестоимость
1	10 000	424 820	83 010	3910	12 903	24 903	549 546
2	10 000	874 000	50 000	5000	16 500	16 500	972 820
3	10 000	387 000	50 000	5000	16 500	16 500	485 000

В результате было получено, что бюджет затрат НТИ составит **549 546** руб. При этом затраты у конкурентов составляют **972 820** рублей, основная часть стоимости которых составляет дорогой лазерный диод высокой мощности. Накачка широким спектром, с другой стороны, обладает более низкой себестоимостью **485 000**, однако КПД такой установки оставляет желать лучшего, и в перспективе наше НТИ выиграет очень быстро. Из вышеперечисленного можно сделать вывод о конкурентоспособности НТИ выше среднего.

4.3.4. Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная. Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать табл. 4.20

Таблица 4.20 – Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	Функциональная	Матричная	Проектная
-----------------	----------------	-----------	-----------

Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня	Высокая	Средняя	Низкая

В данном случае выбор лежит к проектной структуре проекта из-за особенностей разработки. Проект разбивается на модули, которые осуществляют деятельность в связке с другими модулями. Кроме того, новизна технологии также является аргументом в пользу проектной структуры.



**Рисунок 3 — Проектная структура
4.3.5. План управления коммуникациями проекта**

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. Пример плана управления коммуникациями приведен в табл. 4.20.

Таблица 4.20 – Пример плана управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Руководитель проекта	Заказчику	Ежемесячно (в первую неделю)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Руководитель проекта	Команда разработки	Еженедельно (пятница)
3.	Документы и информация по проекту	Руководитель организации	Руководитель проекта	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Команда разработки	Руководителю проекта	Не позже дня контрольного события по плану управления

4.3.6. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Информацию по данному разделу необходимо свести в таблицу (табл. 4.21).

Таблица 4.21 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления

1	Санкции	Потеря поставщиков и клиентов	4	4	Высокий	Диверсификация поставщиков и клиентов, поиск новых желательно в близких регионах из-за роста затрат на логистику	Принятие новых санкций в отношении РФ
2	Экономический кризис	Потеря поставщиков и клиентов	3	4	Высокий	Снижение себестоимости продукции, налаживание связей с наиболее сильными компаниями	Экономические кризисы случаются регулярно
3	Появление НТИ у конкурентов	Вызов необходимости вести конкурентную гонку	3	2	Средний	Создание долгосрочных договоров с компаниями, создание картелей	Рост популярности технологии

4.4. Оценка сравнительной эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (табл. 4.19). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}$$

Где Φ_{pi} - стоимость i-го варианта исполнения, Φ_{\max} - максимальная стоимость исполнения НТИ

$$I_{\phi}^{p1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\max}} = \frac{549546}{972820} = 0,56$$

$$I_{\phi}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{\max}} = \frac{972820}{972820} = 1$$

$$I_{\phi}^{a2} = \frac{\Phi_{a2}}{\Phi_{\max}} = \frac{485000}{972820} = 0,5$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^a, I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p$$

Где I_m интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов, a_i - весовой коэффициент i -го параметра, b_i^a, b_i^p - бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания, n – число параметров сравнения.

Таблица 4.21 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Лазерный диод	Широкий спектр
Энергоэффективность	0,4	4	5	2
Удобство эксплуатации	0,15	3	5	4
Универсальность	0,25	5	2	4
Помехоустойчивость	0,2	4	3	3
Итого:	1	16	15	16

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p = 0,4 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 = 4,1$$

$$I_m^{a1} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^{a1} = 0,4 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,25 \cdot 2 + 0,2 \cdot 3 = 3,85$$

$$I_m^{a2} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^{a2} = 0,4 \cdot 2 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 = 3$$

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

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{4,1}{0,56} = 7,32$$

$$I_{финр}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_\phi^{a1}} = \frac{3,85}{1} = 3,85$$

$$I_{финр}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_\phi^p} = \frac{3}{0,5} = 6$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp1} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^{a1}} = \frac{7,32}{3,85} = 1,9$$

$$\mathcal{E}_{cp2} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^{a2}} = \frac{7,32}{6} = 1,22$$

Таблица 4.22 - Сравнительная эффективность разработки

№	Показатель	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,5	0,56
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,85	3	4,1
3	Интегральный показатель эффективности	3,58	6	7,32
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,9	1,22	-

Из сравнения значений интегральных показателей видно, что из-за высокой стоимости лазерного диода аналог 1 при паритете в ресурсоэффективности проигрывает разработке в интегральном параметре

эффективности. В то же время широкий спектр излучения предлагает дешевое решение с финансовым показателем несколько меньшим, чем разработка, однако ввиду слабого показателя ресурсоэффективности проигрывает НТИ в интегральном показателе эффективности. Таким образом, разработка является некой альтернативой, которая позволяет при небольшой потере КПД добиться резкого улучшения финансовых показателей, что делает разработку крайне перспективной.

4.5 Выводы по разделу

В данном модуле НТИ было подвергнуто анализу с точки зрения готовности к выходу на рынок и конкуренции с уже существующими аналогами. Несмотря на ряд несовершенств и слабых сторон, которыми обладает НТИ вроде громоздкости оборудования и ее сегментированности, разработка может стать достойной альтернативой качественному и удобному с точки зрения эксплуатации, но дорогому лазерному диоду, который на данный момент является наиболее популярным способом накачки лазеров на парах щелочных металлов.

В результате анализа рынка были выявлены конкурентные преимущества разработки, ее слабые стороны и основные риски при попытке внедрения на рынок в ближайшее время. Грамотно оценив слабые стороны и угрозы и воспользовавшись сильными сторонами НТИ и открывшимися возможностями современных экономических реалий, можно говорить о развертывании производства.

Разработка обладает потенциалом ко внедрению на рынок и дальнейшего развития для увеличения ресурсоэффективности и снижения себестоимости, что делает ее сильным конкурентом наиболее популярных аналогов на сегодняшний день.

Список публикаций студента

1. Egorov I.S. (ТПУ), Klimkin A.V. (ИОА), Poloskov A.V. (ТПУ), Pomazkin D.A. (ИОА), Serebrennikov M.A. (ТПУ), Trigub M.V. (ИОА) Comparison of visible spectra of the accelerating gap of a pulsed electron accelerator in a vacuum diode with cathodes made of different materials // Proceedings of SPIE. 2021. V. 12086. 128610. DOI: 10.1117/12.2616673 <https://doi.org/10.1117/12.2616673> The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) grant no. 20-02-00870. Опубликовано: 02 December 2021. (ИФ Scopus=0.453, квартиль WoS – Q) (Число авторов – 6, число авт. лаб. с уч. афф. ЛКЭ–2, ЛААС–1)
2. Egorov I.S. (ТПУ), Klimkin A.V. (ИОА), Poloskov A.V. (ТПУ), Pomazkin D.A. (ИОА), Serebrennikov M.A. (ТПУ), Trigub M.V. (ИОА) Comparison of visible spectra of the accelerating gap of a pulsed electron accelerator in a vacuum diode with cathodes made of different materials // Book of Abstracts. XV International Conference Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL - 2021). 2021. P. 95. https://symp.iao.ru/files/symp/docs/doc-00428_ru.pdf The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) grant no. 20-02-00870. (Число авторов-6, число авт. лаб. с уч. афф. ЛКЭ-2, ЛААС-1)
3. Golubiatnikov G.Yu. (ИПФ РАН), Kuryak A.N. (ИОА), Pomazkin D.A. (ИОА), Tikhomirov B.A. (ИОА), Trigub M.V. (ИОА) The problem of absorption of near-UV radiation by water vapor: the results of new experiments // Book of Abstracts. XV International Conference Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL - 2021). 2021. P. 33-34. https://symp.iao.ru/files/symp/docs/doc-00428_ru.pdf The work was carried out within the framework of the state assignment(s) of the IOA SB RAS, IAP RAS. (Число авторов-5, число авт. лаб. с уч. афф. ЛКЭ-2, ЛААС-2)
4. Egorov I.S. (ТПУ), Klimkin A.V. (ИОА), Poloskov A.V. (ТПУ), Pomazkin D.A. (ИОА), Serebrennikov M.A. (ТПУ), Trigub M.V. (ИОА)

Comparison of visible spectra of the accelerating gap of a pulsed electron accelerator in a vacuum diode with cathodes made of different materials // XV International Conference Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL - 2021). Tomsk, 2021. D35. <https://symp.iao.ru/ru/ampl/15/progpdf> The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) grant no. 20-02-00870. (Число авторов-6, число авт. лаб. с уч. афф. ЛКЭ-2, ЛААС-1)

5. Golubiatnikov G.Yu. (ИПФ РАН), Kuryak A.N. (ИОА), Pomazkin D.A. (ИОА), Tikhomirov B.A. (ИОА), Trigub M.V. (ИОА) The problem of absorption of near-UV radiation by water vapor: the results of new experiments // XV International Conference Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL - 2021). Tomsk, 2021. Y43. <https://symp.iao.ru/ru/ampl/15/progpdf> The work was carried out within the framework of the state assignment(s) of the IOA SB RAS, IAP RAS. (Число авторов-5, число авт. лаб. с уч. афф. ЛКЭ-2, ЛААС-2)

6. Куряк А.Н. (ИОА), Помазкин Д.А. (ИОА), Тихомиров Б.А. (ИОА) Особенности генерации сигнала ОАД в смесях поглощающего газа с водородом // XXVIII рабочая группа "Аэрозоли Сибири": Тезисы докладов. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2021. – 88 с. С. 61-

62. [https://symp.iao.ru/files/iao/Siberian%20Aerosols_2021\(1\).pdf](https://symp.iao.ru/files/iao/Siberian%20Aerosols_2021(1).pdf). Информации о финансовой поддержке нет. (Число авторов-3, число авт. лаб. с уч. афф. ЛААС-2, ЛКЭ-1)

7. Куряк А.Н. (ИОА), Помазкин Д.А. (ИОА), Тихомиров Б.А. (ИОА) Особенности генерации сигнала ОАД в смесях поглощающего газа с водородом // XXVIII рабочая группа "Аэрозоли Сибири". Томск. 2021. С. 61-62. <https://symp.iao.ru/ru/sa/28/program>. Информации о финансовой поддержке нет. (Число авторов-3, число авт. лаб. с уч. афф. ЛААС-2, ЛКЭ-1)

Список использованных источников

1. Салех, Бахаа Э.А. и Тейч, Малвин Карл (1991). Основы фотоники. Нью-Йорк: Джон Вили и сыновья. ISBN0-471-83965-5
2. Микаэлян А. Л., Тер-Микаелян М. Л., Турков Ю. Г. Оптические генераторы на твёрдом теле. — М.: Советское радио, 1967
3. Звелто О. Принципы лазеров/Пер. под науч. Ред. Т.А. Шмаонова. 4-е изд. — СПб.: Издательство «Лань», 2008. — 720 с.: ил. — (Учебные пособия для вузов. Специальная литература).
4. Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков. М.: МЭИ, 1990. 288 с.
5. Зуев, В.Е. Распространение видимых и инфрокрасных волн в атмосфере / В.Е. Зуев. – 1970 : Советское радио, 1970. – 499 с.
6. Patel, C. K. N. Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂ (англ.) // Physical Review : journal. — 1964. — Vol. 136, no. 5A. — P. A1187—A1193. — doi:10.1103/PhysRev.136.A1187. — Bibcode: 1964PhRv..136.1187P
7. Javan A., Bennett W.R. Jr., Herriott D.R. Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture // Physical Review Letters. — 1961. — Vol. 6. — P. 106-110. — doi:10.1103/PhysRevLett.6.106
8. F. J. Duarte and L. W. Hillman (Eds), Dye Laser Principles — Academic, New York, 1990 — ISBN 0-12-222700-X
9. Р. Лоранс (R. Laurans). ЭСТЕТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА, том II №4 2003 с.358-363
10. Юдин Н.А. Энергетические характеристики лазера на парах стронция при газоразрядном способе возбуждения: дис. магистра техн. наук: 12.04.03 - фотоника и оптоинформатика. - Томск, 2016.

11. Газовый лазер // Межотраслевая Интернет-система поиска и синтеза физических принципов действия преобразователей энергии URL: <https://clck.ru/NiXzW> (дата обращения: 30.05.2020).
12. Шалагин, А. . Мощные лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой / А. . Шалагин // КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ. – 2011. – с. 1011-1016
13. А.И. Пархоменко, А.М. Шалагин Квантовая электроника. - 9 изд. - М: Math-Net.ru, 2015. - 806 с.
14. Лазер на парах цезия с диодной накачкой и прокачкой лазерной среды по замкнутому циклу / [А.В. Богачев, С.Г. Гаранин, А.М. Дудов] // Квантовая электроника. — 2012. — № 42 (2). — С.93-98.
15. W.F. Krupke / Progress in Quantum Electronics 36 (2012) 4-28
16. М. Е. Мовсесян, Н. Н. Бадалян, В. А. Ирадян. Письма ЖЭТФ, 6, 631, 1967.
17. Гагарин, С.Г. Институт лазерно-физических исследований / С.Г. Гагарин. – 2015 : Атом, № 68, 2015. – 29-41 с.
18. Greg A. Pitz, Gordon D. Hager, Tiffany B. Tafoya, Joseph W. Young, Glen P. Perram, and David A. Hostutler, An experimental high pressure line shape study of the rubidium D1 and D2 transitions with the noble gases, methane, and ethane / Greg A. Pitz, Gordon D. Hager, Tiffany B. Tafoya, Joseph W. Young, Glen P. Perram, and David A. Hostutler. – 2015 : Proc. of SPIE Vol. 8962 896208-8, 2015.
19. Eyal Yacoby, Ilya Auslendera, Karol Waichmana, Boris D. Barmashenko, Salman Rosenwaksa, Dependence of Cs atoms density and laser power on gas velocity in Cs DPAL / Eyal Yacoby, Ilya Auslendera, Karol Waichmana, Boris D. Barmashenko, Salman Rosenwaksa. – 2019 : Optics and Laser Technology, 2019. – 18-21 с.
20. Walter W.T., Piltch M., Solimene N., Gould G., Pulsed-laser action in atomic copper vapor, Bull.Amer.Phys.Soc., v. 11, p.113 , (1966).

21. Элементы [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://elementy.ru/novosti_nauki/431547/Predlozhen_nazemnyu_met. – Дата доступа: 10.05.2021.

22. Электронная библиотека БГУ. Изучение спектра атома натрия [Электронный ресурс] URL: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/154633/1/10%20Изучение%20спектра%20атома%20натрия.pdf> (дата обращения: 17.03.2022)

23. Физические величины: справочник/ [А. П. Бабичев [и др.]]: под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

24. С.В.Ищенко, С.С.Красильников, Н.А.Красильникова, И.А.Савченко, А.В.Смирнов, В.В.Тарасова. Спектр поглощения атома натрия. Тонкая структура спектральных линий атома натрия. Лабораторные работы № 6 , 7/Под редакцией Красильникова С.С. Учебное пособие.- М.:Издательский отдел УНЦ ДО, 2005.- 46 с.

25. Руденко А.А. Экспериментальное исследование спектров испускания и поглощения плотных паров натрия: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 01.04.08 / Моск. физ.-техн. ин-т. - 17 с.

26) Блок питания лазера БПЛ-66/33. – Паспорт. – АЯЕ 2.087.046 ПС, 1988

27) Лазер ЛТИ-401. – Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – ет 3.970.172 ТО, 1980

28) LS-2139 // LOTIS TII URL: <https://www.lotis-tii.com/high-repetition-rate-laser/ls-2139> (дата обращения: 25.03.2022).

29) Лазер ЛЖИ-501. – Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – ет 3.970.169 ТО, 1980

30) ИХХТ СО РАН // Институт химии и химической технологии URL: <http://www.icct.ru/node/82> (дата обращения: 08.05.2022).

31) Активный элемент лазера на парах металлов и способ его изготовления: пат. 2644985 Российская Федерация: МПК H01S 3/227/ Гликин Л.С.; Заявитель и патентообладатель: Гликин Л.С. — № 2016146731: заявл. 29.11.2016; опубл. 15.02.18

32) Лазерные системы на основе паров металлов для применений в медицине / А.А. Асратян, М.А. Казарян, Н.А. Лябин, И.В. Пономарев, - 1 изд. - М.: Российская академия наук, 2017. - 42 с.

33) ГОСТ 12.2.032-78 РАБОЧЕЕ МЕСТО ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ СИДЯ

34) ТК РФ Статья 351.6 Особенности регулирования труда работников в сфере электроэнергетики, сфере теплоснабжения, в области промышленной безопасности, области безопасности гидротехнических сооружений.

35) ТК РФ Статья 212 Государственные нормативные требования охраны труда.

36) СанПин 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы ЭВМ

37) ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы

38) ГОСТ 12.3.004-75 Термическая обработка металлов

39) ГОСТ 12.1.019-2017 СИСТЕМА СТАНДАРТОВ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И НОМЕНКЛАТУРА ВИДОВ ЗАЩИТЫ

40) ГОСТ 31581-2012 ЛАЗЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

41) СанПин 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"

42) Б.А. Тихонов, А.Г. Дашковский, Расчет устройства защитного заземления. Методические указания к выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» для студентов всех специальностей. Томск, изд. ТПУ, 2005. - 12 с.

43) ГОСТ 17.2.302–78 Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями

44) Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.

45) СП 9.13130.2009 «Техника Пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации»