

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт физики высоких технологий  
 Направление подготовки: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Кафедра высоковольтной электрофизики и силовой электроники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Разработка системы управления бистатическим лазерным монитором УДК 004.353:621.373.8-047.64

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ51	Васнев Николай Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ВЭСЭ ТПУ, н.с. ИОА СО РАН	Тригуб Максим Викторович	Кандидат технических наук		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МЕН ИСГТ ТПУ	Черепанова Наталья Владимировна	Кандидат философских наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ ИНК ТПУ	Штейнле Александр Владимирович	Кандидат медицинских наук		

По разделу, выполненному на иностранном языке

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ИЯФТ ФТИ ТПУ	Крицкая Надежда Вадимовна	Кандидат филологических наук		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедры ВЭСЭ ИФВТ ТПУ	Ратахин Николай Александрович	Академик РАН, доктор физико- математических наук		

Томск – 2017 г.

## Планируемые результаты обучения по ООП

Результат обучения
<b>Универсальные компетенции</b>
<i>P1</i> Способность совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
<i>P2</i> Способность использовать иностранный язык в профессиональной сфере.
<i>P3</i> Способность применять на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
<i>P4</i> Способность использовать методологические основы научного познания и творчества, научную информацию в развитии отрасли, навыки проведения работ с использованием современных информационных технологий; синтезировать и критически резюмировать информацию.
<b>Профессиональные компетенции</b>
<i>P5</i> Способность применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
<i>P6</i> Способность ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
<i>P7</i> Способность выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
<i>P8</i> Способность выполнять инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
<i>P9</i> Способность проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
<i>P10</i> Способность проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
<i>P11</i> Способность осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
<i>P 12</i> Способность разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

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

---

Институт физики высоких технологий  
Направление подготовки: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
Кафедра высоковольтной электрофизики и силовоточной электроники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой Ратахин Н.А.  
\_\_\_\_\_  
(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
4ТМ51	Васневу Николаю Александровичу

Тема работы:

Разработка системы управления бистатическим лазерным монитором	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3660/с от 29.05.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2017
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	
<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>	Объектом исследования является активная оптическая система, бистатический лазерный монитор, на основе лазеров на парах бромида меди. Бистатический лазерный монитор включает два активных элемента: задающий генератор и усилитель яркости. Габаритные размеры газоразрядной трубки задающего генератора: длина активной зоны – 90 см, диаметр – 5 см. Габаритные размеры газоразрядной трубки усилителя яркости: длина активной зоны – 50 см, диаметр – 5 см. Лазерное излучение генерируется на двух длинах волн 510.6 нм и 578.2 нм. Частота следования импульсов возбуждения варьируется от 10 кГц до 30 кГц.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></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>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Литературный обзор (активные оптические системы для визуальной диагностики);</li> <li>– Разработка системы управления бистатическим лазерным монитором (структурная и принципиальная схемы, изготовление макета, исследование характеристик); Количество выходных каналов: 2. Время фронта выходных импульсов: не более 200 нс;</li> <li>– Исследование системы «Генератор – усилитель мощности»;</li> <li>– Проведение экспериментов по визуализации тестовых объектов бистатическим лазерным монитором;</li> <li>– Исследование процесса восстановления стационарного режима генерации CuBr-лазера;</li> <li>– Разработка источника накачки CuBr-лазера с частотой следования импульсов до 50 кГц;</li> <li>– Заключение по работе.</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Принципиальная электрическая схема системы управления бистатическим лазерным монитором</li> </ul>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Черепанова Наталья Владимировна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Штейнле Александр Владимирович</p>
<p>Технический</p>	<p>Тригуб Максим Викторович</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Крицкая Надежда Вадимовна</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p> <p>Аналитическая и расчетно-графическая часть</p>	
<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ВЭСЭ ТПУ, н.с. ИОА СО РАН	Тригуб Максим Викторович	Кандидат технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ51	Васнев Николай Александрович		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физики высоких технологий  
 Направление подготовки (специальность) 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
 Уровень образования магистратура  
 Кафедра высоковольтной электрофизики и сильноточной электроники  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	16.06.2017
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
17.11.2016	<i>Обзор литературы по теме исследования</i>	5
13.12.2016	<i>Разработка структурной и принципиальной схемы системы управления. Расчет.</i>	10
31.03.2017	<i>Реализация макета системы управления</i>	30
12.04.2017	<i>Исследование системы «Генератор – усилитель мощности». Проведение экспериментов по визуализации тестовых объектов.</i>	25
10.05.2017	<i>Исследование процесса восстановления стационарного режима генерации SiVr-лазера.</i>	20
16.06.2017	<i>Оформление расчетно-пояснительной записки.</i>	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ВЭСЭ ТПУ, н.с. ИОА СО РАН	Тригуб Максим Викторович	Кандидат технических наук		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедры ВЭСЭ ИФВТ ТПУ	Ратахин Николай Александрович	Академик РАН, доктор физико-математических наук		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 138 с., 65 рис., 23 табл., 47 источников, 4 прил. Ключевые слова: Бистатический лазерный монитор, Системы управления, Активная оптическая система, Лазер на парах бромида меди, Визуализация быстропротекающих процессов, Мощная фоновая засветка, Источник накачки, Частота следования импульсов.

В процессе исследования проводились: аналитический обзор литературных источников, существующие аналоги и их применение в области визуально-оптической диагностики, разработка структурной и принципиальной схемы системы управления, разработка программного кода для системы управления, разработка макета системы управления, тестирование и отладка изготовленного макета, анализ полученных данных, экспериментальные исследования по визуализации тестовых объектов, исследование восстановления стационарного режима генерации CuBr-лазера после его работы в цуговом режиме, анализ ресурсоэффективности и ресурсосбережения, рассмотрение и анализ вопросов производственной безопасности.

В результате работы была разработана система управления, соответствующая техническому заданию. В работе представлены осциллограммы работы системы. Проведены эксперименты по визуализации тестовых объектов и описаны полученные результаты.

Степень внедрения: лабораторный макет.

Область применения: визуально-оптическая диагностика в сварочной отрасли, научные исследования в области экстремального состояния вещества и получения новых материалов.

## **Abstract**

Graduation qualification work includes 138 pages, 65 figures, 23 tables, 47 references, 4 appendixes. Keywords: Bistatic laser monitor, Control system, Active optical system, Copper bromide vapor laser, Visualization of high-speed processes, Background light, Pumping source, Pulse frequency repetition.

It was done: analytical review of literary sources, existing analogues and its application in visual-optical diagnostic, development of the structural and principal scheme of the control system, development of program code for the control system, development of a control system layout, analysis of data, experimental research of the test objects visualization, investigation of the CuBr-laser restoration stationary lasing, analysis of resource efficiency and resource saving, review and analysis of issues of industrial safety.

As a result the control system was developed in accordance with the technical task. Oscillograms of the system operation are presented. Experiments on visualization of test objects were done, the results were described.

Degree of implementation: laboratory layout.

Application areas: visual-optical diagnostics in the welding industry, scientific research in the field of matter extreme state and obtaining new materials.

## **Обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

### Определения

В настоящей работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

- Лазер – это оптический квантовый генератор, преобразующий энергию накачки в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.
- Газоразрядная трубка – керамическая герметизированная трубка, заполненная парами металлов при относительно низком парциальном давлении и включающая в конструкцию два электрода, при поведении разности потенциалов определенного уровня между которыми происходит электрический пробой.
- Усилитель яркости – элемент, применяемый в оптических системах для увеличения распространяющегося в них светового потока и, следовательно, яркости.
- Активная оптическая система – это система, которая содержит усилитель яркости на переходах самоограниченных лазеров.
- Лазерный монитор – активная оптическая система, позволяющая сформировать изображение быстропротекающего процесса с мощной фоновой засветкой и произвести его активную фильтрацию.

### Обозначения и сокращения

В данной работе применены сокращения:

ЛПМ – лазеры на парах металлов;

АОС – активная оптическая система;

ГРТ – газоразрядная трубка;

ЧСИ – частота следования импульсов;

СУ – система управления;

МК – микроконтроллер;

НИР – научно-исследовательская работа.

### Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты и нормативно-правовые документы:

1. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация
2. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях
3. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)
4. ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) Оборудование производственное. Общие требования безопасности
5. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
6. ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В
7. ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1)
8. РД 34.03.603 Правила применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках, технические требования к ним;
9. Согласно ГОСТ 124.003-74 – техника безопасности при работе с лазерами
10. СанПиН 5804-91 Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров

11. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение
12. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
13. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ)  
Средства и методы защиты от шума. Классификация
14. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ)  
Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности
15. ГОСТ 12.1.005-88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
16. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
17. ГОСТ 17.2.1.01-76 Охрана природы. Атмосфера. Классификация выбросов по составу
18. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ).  
Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования
19. Трудовой кодекс РФ
20. Конституция РФ
21. НПБ 166-97 Пожарная техника. Огнетушители. Требования к эксплуатации

## Оглавление

<b>Введение</b>	14
<b>Глава 1. Обзор литературы</b>	16
1.1 Общие сведения о лазерах на самоограниченных переходах	16
1.2 Основные этапы развития лазеров на самоограниченных переходах	19
1.3 Основные этапы развития лазеров на парах меди	22
1.4 Оптические методы визуализации быстропротекающих процессов	25
1.4.1 Основные понятия	25
1.4.2 Усилитель яркости	26
1.4.3 Метод лазерной подсветки	27
1.4.4 Лазерный проекционный микроскоп	28
1.4.5 Лазерный монитор	30
1.4.6 Бистатический лазерный монитор	32
1.5 Система «Генератор – усилитель мощности»	34
1.6 Традиционная схема накачки лазеров на парах металлов	37
<b>Глава 2. Объекты и методы исследования</b>	40
2.1 Накачка активных элементов	40
2.2 Конструкция активных элементов	42
2.3 Измерительное оборудование	43
<b>Глава 3. Аналитическая и расчетно-графическая часть</b>	44
3.1. Выбор и обоснование структурной схемы системы управления бистатическим лазерным монитором	44
3.1.1. Структурная схема бистатического лазерного монитора	44
3.1.2. Структурная схема цифровой схемы управления	45
3.1.3. Структурная схема высоковольтного модулятора	46
3.2. Разработка принципиальной схемы системы управления бистатическим лазерным монитором	48
3.2.1. Принципиальная схема цифровой схемы управления	48
3.2.1.1. Выбор микроконтроллера	48
3.2.1.2. Напряжение питания	49
3.2.1.3. Коммутация	50
3.2.1.4. Защита от сквозного тока	51
3.2.1.5. Защита по току в полумостовом инверторе	52
3.2.1.6. Оптическая развязка	54
3.2.2. Принципиальная схема высоковольтного модулятора	54
3.2.2.1. Выпрямитель переменного напряжения	54

3.2.2.2.	Управляемый полумостовой инвертор	55
3.2.2.3.	Зарядный и разрядный контура	56
3.2.2.4.	Коммутационная ячейка	57
3.3.	Расчет принципиальной схемы высоковольтного модулятора	58
3.3.1.	Расчет энергетических преобразований	58
3.3.2.	Расчет зарядного контура и полумостового инвертора	60
<b>Глава 4. Результаты проведенного исследования</b>		<b>66</b>
4.1.	Результаты исследования работоспособности системы управления	66
4.1.1.	Работа модулятора на активную нагрузку	66
4.1.2.	Работа модулятора на тиратроны	68
4.2.	Результаты исследования системы «Генератор – усилитель мощности»	73
4.3.	Результаты исследования получения изображений по схеме бистатического лазерного монитора	78
4.4.	Результаты исследования процесса восстановления стационарного режима генерации	87
4.5.	Результаты разработки источника накачки CuBr-лазера с ЧСИ до 50 кГц	91
<b>Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>		<b>94</b>
5.1.	Предпроектный анализ	94
5.1.1.	Потенциальные потребители результатов исследования	94
5.1.2.	Анализ конкурентных технических решений	95
5.1.3.	SWOT-анализ	97
5.1.4.	Анализ конкурентных технических решений	100
5.2.	Инициация проекта	102
5.2.1.	Цели и результаты проекта	102
5.2.2.	Организационная структура проекта	103
5.2.3.	Ограничения и допущения проекта	104
5.3.	Планирование управления научно-техническим проектом	105
5.3.1.	План проекта	105
5.3.2.	Бюджет научно-технического исследования	106
5.3.2.1.	Сырье, материалы и покупные изделия	107
5.3.2.2.	Специальное оборудование для научных работ	108
5.3.2.3.	Основная заработная плата	109
5.3.2.4.	Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	111
5.3.2.5.	Отчисления на социальные нужды	112

5.3.2.6. Научные и производственные командировки	112
5.3.2.7. Накладные расходы	112
5.3.3. Реестр рисков проекта	113
5.4. Оценка сравнительной эффективности исследования	114
<b>Глава 6. Социальная ответственность</b>	119
Введение	119
6.1. Техногенная безопасность	119
6.1.1. Анализ вредных факторов производственной среды	120
6.1.1.1. Электромагнитное излучение (ЭМИ)	120
6.1.1.2. Выделение вредных веществ	122
6.1.1.3. Повышенный уровень шума	124
6.1.1.4. Умственное перенапряжение. Статические перегрузки	124
6.1.2. Анализ опасных факторов производственной среды	125
6.1.2.1. Поражение электрическим током	125
6.1.2.2. Термическое воздействие	128
6.2. Региональная безопасность	129
6.3. Организационные мероприятия обеспечения безопасности	129
6.4. Особенности законодательного регулирования проектных решений	130
6.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	131
<b>Заключение</b>	133
<b>Список публикаций студента</b>	134
<b>Список использованных источников</b>	135
Приложение А – ФЮРА.433781.149 ЭЗ – Схема электрическая принципиальная	141
Приложение Б – ФЮРА.433781.149.ПЭ – Спецификация	143
Приложение В – Диаграмма Ганта	145
Приложение Г – Chapter 3 Analytical and calculation-graphic part	147

## Введение

На сегодняшний день лазеры на самоограниченных переходах атомов меди являются одним из наиболее эффективных источников излучения среди лазеров видимого спектра [1-3]. Отличительной особенностью таких лазеров является импульсно-периодический режим работы с высокой частотой следования импульсов (ЧСИ) и высокой импульсной мощностью генерации [1-5]. Благодаря своим уникальным характеристикам такие лазеры применяются в различных областях: микрообработка материалов, зондирование атмосферы, демонстрационные системы, визуализация быстропротекающих процессов и т.д. [5-10].

Одним из наиболее приоритетных применений лазеров на парах бромида меди является визуализация быстропротекающих процессов, экранированных от наблюдателя мощной фоновой засветкой [5, 6, 10, 11]. Подобные процессы отличаются, как правило, малыми размерами области воздействия и высокой скоростью протекания, а интенсивность возникающей засветки может достигать весьма высоких величин. Все это делает визуализацию такого рода процессов в режиме реального времени практически невозможным, однако для решения возникающих проблем существуют оптические методы неразрушающего контроля с использованием индуцированного излучения. Таким образом, визуализация указанных процессов осуществляется по методу лазерной подсветки и методу, в основе которого лежит использование активных оптических систем. Устройство, принцип действия которого базируется на втором методе, получило название лазерный монитор [10-12]. Существует вариант реализации бистатического лазерного монитора, который позволяет преодолеть ограничения вышеуказанных методов визуализации. Для функционирования бистатического лазерного монитора требуется согласовать режим работы двух лазеров.

Целью научно-исследовательской работы является разработка системы управления бистатическим лазерным монитором для визуализации

быстропротекающих процессов, сопровождаемых мощной фоновой засветкой.

Научная новизна работы заключается в синхронизации функционирования источника подсветки и усилителя яркости, что обеспечит разделение функций подсветки объекта и усиления (фильтрации) получаемого изображения.

Разработка такой системы – задача трудоемкая и долгосрочная. Ее реализация включает проектирование и реализацию как цифровой схемы управления, так и высоковольтных блоков. Система должна обеспечивать синхронную накачку активных элементов бистатического лазерного монитора с возможностью регулировки временных и частотных параметров накачки. Другой задачей является разработка источника накачки с рабочей частотой до 50 кГц, поскольку ЧСИ определяет мощность лазерного излучения и частоту формирования изображения при визуализации. Кроме того, следует произвести экспериментальные исследования по работе CuVr-лазеров в цуговом режиме, поскольку такой режим способен увеличить ресурс источников накачки.

Актуальность работы достаточно сложно переоценить, поскольку в современном научном мире насчитывается множество технологий и процессов, сопровождаемых фоновой засветкой. В качестве примера можно привести получение новых материалов плазменным методом, обработку и модификацию поверхностей с целью улучшения их эксплуатационных характеристик, получение наночастиц, термоядерный синтез и многое другое [5-12]. Визуализация перечисленных и подобных процессов, безусловно, позволит получить новые фундаментальные знания о природе этих процессов, которые позволят повысить их качество и эффективность. Помимо вышеобозначенной научной значимости данной работы также присутствует возможность коммерческой реализации, поскольку существующие на сегодняшний день аналоги обладают высокой стоимостью, а их возможности не обеспечивают серьезную конкуренцию.

## Глава 1. Обзор литературы

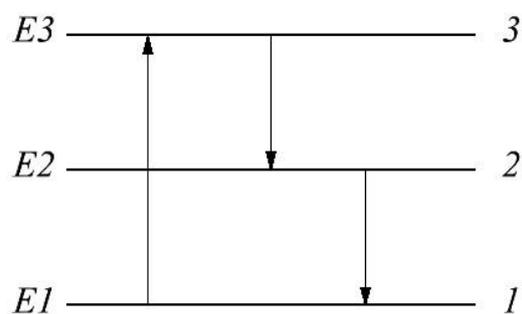
### 1.1 Общие сведения о лазерах на самоограниченных переходах

В лазерах на парах металлов активными частицами являются атомы или ионы металлов. Другими словами, лазерная генерация достигается на переходах ионов и атомов металла, используемого в качестве активного вещества. Возбуждение газовых лазеров подразумевает, прежде всего, переход активного вещества из исходного состояния в газовое. Данный переход осуществляется за счет нагрева металлических элементов, вследствие чего происходит их постепенное испарение [1].

Существует несколько методов обеспечения температуры плавления активного вещества. Одним из них является использование внешней нагревательной печи, размещенной в районе активных зон газоразрядной трубки. Использование этого метода позволяет увеличить эффективность лазера за счет дополнительного энергопотребления от печи. Модификацией этого метода является расположение лазерного вещества в специальных отсеках газоразрядной трубки, которые сопряжены с внешними нагревательными элементами. Вследствие нагрева образуются пары лазерного вещества, которые заполняют газоразрядную трубку, после чего запускается возбуждение лазерной среды. Такой метод удобен и конструктивно прост. Также он может быть использован для режима саморазогрева газоразрядной трубки.

После образования паров активного вещества происходит его возбуждение за счет преобразования внешней энергии в энергию газового разряда. Данный процесс может носить как импульсный, так и непрерывный характер в зависимости от типа лазера. Возбуждение активных частиц приводит к нарушению равновесного распределения атомов по энергетическим уровням и созданию инверсной населенности, что является необходимым условием возникновения лазерной генерации. Механизм возбуждения активного вещества называется накачкой [1-4].

Среди всех видов лазеров выделяют отдельную группу лазеров, генерирующих на самоограниченных переходах. Отличительным признаком таких лазеров является самоограниченность генерации, обусловленная соотношением времен жизни атомов на их рабочих уровнях [1].



1 – основной квазистатический уровень, 2 – нижний метастабильный уровень, 3 – верхний резонансный уровень

Рисунок 1.1 – Схема энергетических уровней с самоограниченными переходами между ними

Рисунок 1.1 схематично иллюстрирует изображение самоограниченной генерации. В результате процесса накачки происходит активное заселение верхнего резонансного уровня (3). Нижний метастабильный уровень (2) заселяется в свою очередь в результате вынужденного перехода возбужденных атомов с резонансного уровня по истечению время их жизни. Данный переход сопровождается испусканием кванта света. Сгенерированный фотон принято называть «затравочным». Излученный фотон, взаимодействуя с возбужденными атомами, вызывает рождение еще одного такого же фотона. Поскольку спектр энергетических значений у атомов одного и того же металла идентичен, то вынужденное излучение, порожденное «затравочным» фотоном, создает лавину идентичных фотонов – именно этим обусловлена когерентность, монохроматичность и направленность вынужденного излучения [1-4, 13].

Сам процесс возбуждения газовых лазеров, как правило, представляет собой электрический разряд в герметичном сосуде, являющемся активным элементом. Конструкция такого активного элемента, как правило, представляет собой два электрода, разделенных керамической герметизированной трубкой, заполненной парами металлов при относительно низком парциальном давлении ( $10^{-3}$ – $10^{-1}$ ) торр. При отсутствии напряжения на электродах или же при их низком абсолютном значении трубка представляет собой практически идеальный изолятор. При появлении между электродами определенного уровня разности потенциалов газоразрядная трубка начинает проводить ток. Далее возбужденный электрон сообщает энергию активным частицам, запуская тем самым механизм генерации вынужденного индуцированного излучения. Генерация лазеров на самоограниченных переходах достигается за счет импульсного возбуждения [1-4].

Также в газоразрядной трубке обеспечивается наличие буферного газа, давление которого может достигать весьма высоких значений порядка 300 торр. В качестве буферного газа чаще всего используется гелий, неон и водород. Концентрация буферного газа определяет напряжение пробоя газовой среды и способствует созданию инверсной населенности [1-4, 13].

Поскольку температурный диапазон для лазеров на парах галогенидов металлов относительно узок, газоразрядные трубки в этом случае являются универсальными лазерными излучателями. Также допускается использование различных лазерных веществ в одной газоразрядной трубке, что обеспечивает лазерную генерацию на нескольких линиях одновременно.

Наиболее привлекательными характеристиками резонансно-метастабильных генерирующих на самоограниченных переходах лазеров являются высокий КПД, высокое качество пучка, а также высокая средняя и пиковая мощности в ультрафиолетовой, видимой и близкой инфракрасной спектральных областях [10-13].

## 1.2 Основные этапы развития лазеров на самоограниченных переходах

Впервые генерация на самоограниченных переходах атомов металла была получена на парах синца американскими учеными в 1965 году. Длина линии генерации при этом составила 722 нм [1]. Также есть свидетельства о том, что в этом же году на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва) [14] были совершены первые успешные эксперименты по получению генерации на самоограниченных переходах атомов марганца и свинца, что соответствовало зеленой и красной области спектра соответственно. Чуть позже американскими учеными была получена генерация и на парах меди [15].

Среди наиболее важных результатов независимых исследований российских и американских ученых можно отметить, прежде всего, исключительно импульсный характер полученной генерации. Это явление обусловлено связью с метастабильностью нижнего уровня лазерного перехода. Длительность полученных импульсов при этом варьировалась в диапазоне от 10 нс до 30 нс.

С тех пор было опубликовано большое число работ, посвященных исследованиям физических процессов, протекающих в активной среде лазеров на самоограниченных переходах, а также определяющих параметры их генерации. На протяжении нескольких десятилетий интерес к разработке, исследованию и применению таких лазеров подпитывался за счет их широких возможностей и многоплановости. Активный интерес к развитию лазеров на самоограниченных переходах атомов металла обуславливался их уникальными характеристиками, не присущими лазерам других видов. Среди таких характеристик можно выделить высокую среднюю и пиковую выходную мощности, высокое качества пучка, его низкая расходимость, высокий уровень монохроматичности излучения, возможность одновременной работы в широком спектральном диапазоне и т.д. [1-4, 13].

Разумеется, первые лазеры на парах металлов имели громоздкую и непрактичную конструкцию. Такие лазеры представляли собой высокотемпературную электропечь и керамическую газоразрядную трубку. Экспериментальным путем было установлено, что для получения паров чистых металлов, как например меди и золота, температура стенок лазерного излучателя должна быть порядка (1500–1600) °С. Обеспечение такой температуры и поддержание ее на заданном уровне было и остается связанным с определенными технологическими трудностями, к тому же кварцевые газоразрядные трубки не способны выдерживать столь высокую температуру, поэтому для газоразрядной трубки использовалась высокотемпературная керамика. Время разогрева такой газоразрядной трубки до рабочей температуры, также как и время ее остывания до комнатной температуры, составляло около 8 часов, что также представляло собой весомый недостаток работы с такими лазерами [1, 2, 14].

На протяжении 60-70-ых годов исследования в области генерации на самоограниченных переходах атомов металлов интенсивно развивались. До 1978 года было установлено, что атомные и ионные переходы 27-и металлических элементов сопровождаются генерацией вынужденного излучения. Вплоть до 1990 года эта цифра постепенно увеличивалась до 42 элементов, включая металлоиды. К 1990 году количество изученных лазерных самоограниченных переходов с резонансного на метастабильный уровень достигло 700. Среди них как наиболее значимые выделяют лазерные переходы на парах атомов меди, магния, серебра, бария, бериллия, кальция, стронция, иттербия и т.д. [1, 2, 14].

За время исследований лазеров на самоограниченных переходах генерация была получена как на нейтральных атомах, так и на ионах в диапазоне длин волн от 312,2 нм (пары золота) до 645,6 нм (пары стронция).

В 1973-ем году была впервые получена генерация лазеров на парах химического соединения хлора и меди. В этом случае после испарения донорских молекул газовый разряд вызывал диссоциацию молекулы  $\text{CuCl}$  и

последующее возбуждение свободных активных частиц. Данная работа считается родоначальницей лазеров на парах галогенидов металлов. Наиболее важным достоинством использования галогенидов металлов в качестве лазерного вещества стало их сравнительно невысокая рабочая температура, которая, как правило, варьируется в диапазоне от 250 °С до 600 °С. Следствием этого фактора стала существенное упрощение разработки и эксплуатации лазерного излучателя, а также снижение его стоимости. Также сравнительно низкая теплоемкость трубки для паров галогенидов металлов обеспечило сокращение времени выход на режим, что, безусловно, стало очередным достоинством для практических применений [1, 2, 14].

По мере развития лазеров на парах металлов формировалась такая перспективная задача, как разработка эффективных импульсно-периодических лазеров. Данному вопросу было посвящено множество теоретических и экспериментальных работ, которые базируются на исследованиях физики газового разряда, физических и химических процессах низкотемпературной плазмы и атомной физики. Наиболее мощными и эффективными признаны лазеры на парах меди, генерирующих две спектральные линии: зеленую с длиной волны 510,6 нм и желтую с длиной волны 578,2 нм. Излучение испускается возбужденными атомами меди, при их переходе из резонансного состояния (энергия возбуждения около 3,8 эВ) в нижнее метастабильное состояние (энергия возбуждения соответственно 1,39 эВ и 1,64 эВ) [1, 2].

Благодаря своим уникальным характеристикам лазеры на парах меди на сегодняшний день являются наиболее изученными и представляющими интерес в практическом применении. Именно на атомах меди был впервые реализован саморазогревной режим работы лазеров на самоограниченных переходах [1, 2, 14]. Таким образом, в настоящее время лазеры на парах меди активно используют в промышленности для решения целого ряда задач.

### 1.3 Основные этапы развития лазеров на парах меди

Лазер на парах меди был разработан в 1965 году американским ученым Уильямом Уолтером. Данный лазер считается наиболее мощным источником когерентного монохроматического излучения в оптическом диапазоне. Основной проблемой, связанной с разработкой и эксплуатацией такого лазера, является высокая рабочая температура порядка 1500 °С [15].

В 1960-х годах на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва) был проведен ряд успешных экспериментов по получению генерации на переходах атома меди. Полученная генерация была охарактеризована как рекордное усиление света активными средами лазеров на парах металлов. Полученный коэффициент усиления был настолько велик, что для формирования мощного вынужденного излучения использовалось либо одно зеркало резонатора, либо же зеркала не использовались вообще [15].

В начале 1970-х годов многие исследовательские лаборатории, работающие над медными лазерами, поставили приоритетным направлением создание низкотемпературного варианта исполнения лазера на парах меди. Идея создания такого лазера базировалась на использовании в качестве активного вещества химических соединений, температура парения которых была бы существенно ниже температуры парения чистой меди. Данная идея также впервые была сформулирована в научной работе Уильяма Уолтера, однако на ее реализацию потребовалось более 10 лет. Первые успешные экспериментальные результаты были получены в 1973 году двумя независимыми научными лабораториями. Американские ученые в лаборатории Вестингхауса сообщили о том, что им удалось получить генерацию на парах иодида меди. Другая американская группа ученых, работающая в ракетной лаборатории Пасадена, добилась генерации лазера на парах хлорида меди [14, 15].

В 1974 году Болгарская исследовательская команда под руководством Н. Саботинова в Институте твердотельной физике Болгарской Академии

наук получила лазерную генерацию на парах бромида меди. Полученный результат был запатентован [16].

Первые научные исследования показали, что лазеры на парах бромида меди существенно превосходят лазеры на парах меди. Рабочая температура таких лазеров снизилась до (500–600) °С. В качестве конструкции лазерного активного элемента использовались газоразрядные трубки, изготовленные из кварцевого стекла без использования высокотемпературной керамики. Данное конструктивное решение существенно упростило процесс производства активного элемента и снизило его стоимость. Разработанные лазеры на парах бромида меди выходили на режим в течение (5–10) минут, в то время как наиболее удачные варианты исполнения лазеров на парах чистой меди начинали генерировать по прошествии не менее (30–40) минут после включения.

Далее болгарская исследовательская лаборатория возглавляемая профессором Н. Саботиновым, принялась за работу по устранению проблем, связанных с разработкой лазеров на парах бромида меди. Среди этих проблем было выделено получение стабильной лазерной генерации, увеличение времени жизни лазерного активного элемента и обеспечение высокой выходной мощности. Дальнейшие научные достижения в перечисленных направлениях были запатентованы.

Помимо этого была предложена и запатентована идея использования полых катодов с резервуарами бромида меди. Характерной особенностью таких электродов является то, что они остаются чистыми в течение времени эксплуатации лазера, что способствует поддержанию стабильного режима разряда.

Также в данной лаборатории были разработаны активные элементы, предусматривающие холодные зоны с температурой -5/-8 °С. Введение таких холодных зон обеспечивало контроль оптимальной концентрации брома в лазерном активном веществе. Была получена выходная мощность порядка

100 Вт. Данные результаты были представлены в рамках проекта NATO SfP-972685 “NATO SfP-Copper Bromide Laser” [16].

Затем в рамках проекта СРА-СТ94-0214 Европейского Союза выходную мощность излучения CuBr-лазера удалось увеличить до 125 Вт, КПД при этом составил порядка 3,8 %. Время жизни лазерного элемента составило при этом не менее 1000 часов.

Следует отметить, что наряду со всем вышеперечисленным развитие самоограниченных лазеров на парах атомов меди еще не закончено и имеет как ближнюю, так и дальнюю перспективу. К ближней перспективе относится создание, во-первых, эффективных импульсно-периодических лазеров на парах галогенидов меди, работающих в режиме генераторов, со средней мощностью генерации на уровне нескольких сотен ватт и при практическом КПД в несколько процентов. Во-вторых, создание высокоэффективных лазеров на парах меди и галогенидов меди с практическим КПД на уровне (5–8) % и со средними мощностями генерации в диапазоне от нескольких ватт до нескольких десятков ватт. Также как ближнюю перспективу можно выделить оптимизацию уже изученных режимов работы лазеров на парах меди [1].

Кроме того, ближняя перспектива включает в себя разработку новых технологий на базе лазеров на парах меди для визуализации быстропротекающих процессов, защищенных от наблюдателя мощной фоновой засветкой, например, современные технологии нанесения и обработки покрытий [11, 12].

К отдаленной перспективе следует отнести создание мощных и эффективных лазеров с большой апертурой луча, возбуждаемых пучками электронов с энергиями (1–10) кэВ.

## 1.4 Оптические методы визуализации быстропротекающих процессов

### 1.4.1 Основные понятия

Визуализация быстропротекающих процессов, в частности экранированных от наблюдателя мощной фоновой засветкой, является весьма актуальной задачей. Примерами таких процессов являются лазерная обработка материалов, получение наночастиц, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), модификация поверхностей с целью улучшения их эксплуатационных характеристик и т. д. [7-10].

Все перечисленные процессы объединяет то, что они представляют собой взаимодействия мощных потоков энергии с веществом. Изучение такого рода процессов затрудняет их высокая скорость протекания и широкополосная фоновая засветка [6-10, 17]. Однако, существует ряд оптических методов неразрушающего контроля, которые позволяют решить данную задачу. Отдельной группой таких методов является использование активных оптических систем с усилителями яркости на основе высокочастотных лазеров на парах металлов. В частности, активно используют лазеры на парах атома меди, которые характеризуются высокой спектральной яркостью, однородностью среды, большим коэффициентом усиления и высокой частотой следования импульсов (ЧСИ) генерации [1-4, 18, 19]. Визуализация процесса становится возможным за счет того, что лазерное излучение обладает весьма узким спектром, в области которого сосредоточена лишь незначительная часть широкополосной засветки.

Применение лазеров на парах металлов, в частности на парах атомов меди, и современных скоростных видеорегистраторов (CCD камеры) [20] позволяет реализовать высокоскоростную съемку (более  $10^5$  кадров/с) указанных выше процессов. Лазер на парах бромида меди имеет узкие спектральные линии генерации в зеленой и желтой областях спектра (510,6 нм и 578,2 нм), что обеспечивает высокое усиление в узких спектральных диапазонах. Таким образом, подобные системы позволяют визуализировать

процессы, скрытые от наблюдателя широкополосной фоновой засветкой, как собственной, так и внешней.

#### 1.4.2 Усилитель яркости

Любые преобразования световых пучков в оптической системе приводят к уменьшению яркости пучка. Иными словами, на выходе оптической системы яркость светового пучка не может быть больше, чем на входе. Данное явление накладывает ограничения на возможности оптических приборов и приводит к ряду трудностей, связанных с недостатком света. Существует так называемая светосильная оптика, использование которой позволяет минимизировать всевозможные потери светового потока, однако расчет и изготовление таких оптических приборов является трудоемкой и дорогостоящей задачей. Кроме того, увеличение светосилы оптических компонентов может привести к потере качества изображения [21-23]. Однако, такое утверждение справедливо лишь для пассивных оптических систем.

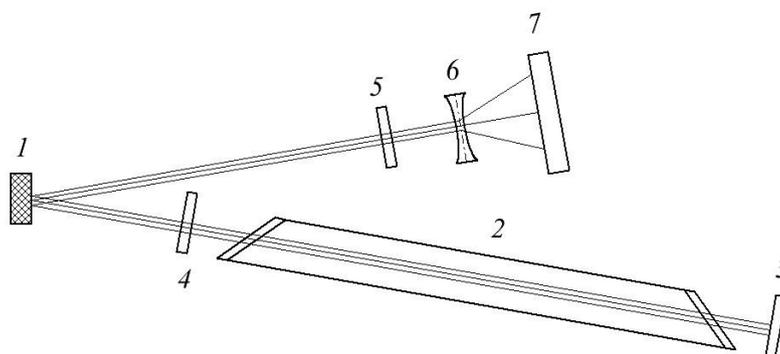
Известно, что на основе активной среды на парах металлов может быть реализован усилитель яркости. Активный элемент в этом случае не содержит оптического резонатора и работает в режиме сверхсветимости. Вынужденное индуцированное излучение по своей природе позволяет усиливать световой поток с минимальным искажением изображения за счет однородности активной среды. При использовании лазерного усилителя яркости возникает только один неустраняемый источник помех – собственные шумы квантового усилителя.

Для осуществления визуальной диагностики с использованием оптических методов к усилителю яркости предъявляют ряд требований. Наиболее важные из них о них обобщены в работе [24]. Среда усилителя, прежде всего, должна быть оптически однородной – это необходимо для минимизации искажений формируемого генератором изображения. Усиление должно происходить в узком спектральном диапазоне – это обеспечит

глубокую фильтрацию изображения. Усилитель должен обеспечивать прохождение световых пучков полезного сигнала без потерь и искажений оптической информации. Разумеется, выходная мощность усилителя яркости должна быть достаточной для практического применения. Именно лазерные усилители на самоограниченных переходах наиболее полно удовлетворяют перечисленным требованиям.

### 1.4.3 Метод лазерной подсветки

Одним из традиционных методов визуализации с использованием вынужденного индуцированного излучения является метод лазерной подсветки, изображенный на рисунке 1.2.



- 1 – объект наблюдения, 2 – внешний источник излучения, 3 – зеркало,  
4 – плоскопараллельная пластина, 5 – полосовой фильтр,  
6 – рассеивающая линза (объектив), 7 – экран

Рисунок 1.2 – Визуализация по методу лазерной подсветки

Суть метода заключается в том, что объект (1) или процесс наблюдения подсвечивается внешним источником излучения (2), далее отраженный от него сигнал пропускают через полосовой фильтр (3) и рассеивающую линзу (4), после чего полученное изображение проецируется на экран (5). Узкая («рабочая») область содержит пренебрежительно малую часть лучистой энергии, вследствие чего метод используют для наблюдения вышеперечисленных процессов, а также визуализации объектов малых

размеров или их отдельных фрагментов. Чтобы обеспечить требуемый уровень полезного сигнала, используют глухое зеркало (6) и плоскопараллельную пластину (7) – они образуют оптический резонатор для создания положительной обратной связи.

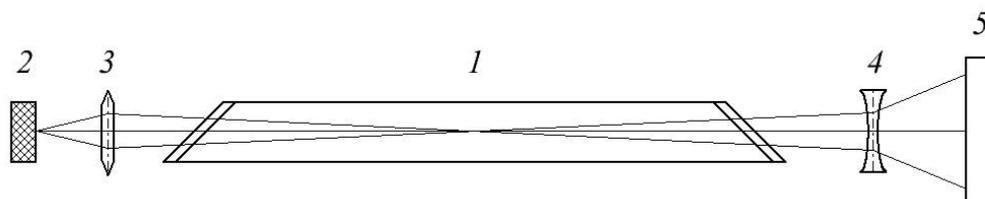
Метод лазерной подсветки характеризуется своей простотой и «компактностью» его реализации, которая обусловлена малыми массогабаритными параметрами лазеров. При этом данной методике присущ ряд недостатков. Прежде всего, лазерное излучение должно быть достаточно мощным, чтобы уровень сигнала на входе регистратора был выше порога чувствительности. Этот фактор может негативно сказываться на исследуемом объекте или процессе, искажая их реальное состояние. Помимо этого, особые требования предъявляют к параметрам пучка лазера и используемой оптической системе: чем выше уровень фоновой засветки, тем более узкой должны быть линия излучения лазера и полоса пропускания используемого фильтра. Несоблюдение данного условия приводит к тому, что изображение будет экранировано от наблюдателя фоновой засветкой. Разработка лазера, соответствующего указанным требованиям, существенно сказывается на экономических затратах.

Таким образом, метод лазерной подсветки может быть использован в том случае, когда энергия лазерного излучения существенно превышает энергию широкополосной экранирующей засветки, возникающей при протекании исследуемого процесса. Такое соотношение энергий позволяет минимизировать воздействие засветки на процесс визуализации [10], однако полностью подавить ее таким способом не представляется возможным.

#### 1.4.4 Лазерный проекционный микроскоп

Другой традиционный метод визуализации указанных выше процессов основывается на применении активных оптических систем. На рисунке 1.3 изображена схема лазерного проекционного микроскопа, основу которого составляет активная среда на парах металлов. Высокая

спектральная яркость излучения и большой коэффициент усиления в узкой полосе спектра позволяет визуализировать объекты и процессы, скрытые мощной фоновой засветкой.



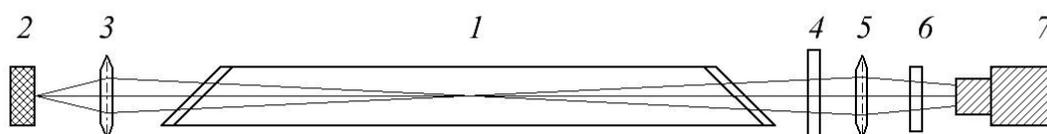
1 – лазерный усилитель яркости,  
2 – объект наблюдения, 3 – собирающая линза (объектив),  
3 – рассеивающая линза (объектив), 5 – экран  
Рисунок 1.3 – Визуализация посредством лазерного проекционного микроскопа

Излучение сверхсветимости лазерного усилителя яркости (1) фокусируется на объекте (2) с помощью объектива (3). Объектив (3) также используется для формирования изображения, которое затем попадает в активную среду усилителя яркости в момент времени, когда там еще присутствует инверсная населенность. Также в усилитель попадает и сигнал широкополосной фоновой засветки, но в активной среде происходит усиление лишь той длины волны, которая соответствует спектру генерации. Таким образом, полезный сигнал фильтруется в собственной активной среде усилителя яркости и далее полученное увеличенное изображение объекта проходит через рассеивающую линзу (4), которая проецирует полученное изображение на экран (5).

Очевидно, что предельно-допустимая дистанция от усилителя яркости до исследуемого объекта ограничивается временем существования инверсной населенности в активной среде (от 20 нс до 40 нс). В случае, когда дистанция составляет менее 1 м, указанное ограничение оказывается непринципиальным – визуализация объектов может быть проведена с пространственным разрешением порядка (0,5–1) мкм [10].

#### 1.4.5 Лазерный монитор

В работах [11, 25] было предложено устройство, названное «лазерным монитором». Само понятие лазерного монитора было введено И.И. Климовским. Принцип действия такого устройства аналогичен работе лазерного проекционного микроскопа. Отличительным признаком лазерного монитора является наличие высокоскоростной видеорегирующей аппаратуры, что позволяет наблюдать процессы как в режиме реального времени, так проводить их более детальное изучение в режиме постфактум.



- 1 – лазерный усилитель яркости, 2 – объект наблюдения,  
3 – собирающая линза (объектив), 4 – полосовой фильтр,  
5 – собирающая линза (объектив), 6 – полосовой фильтр,  
7 – видеорегирующее устройство

Рисунок 1.4 – Визуализация посредством лазерного монитора

Из рисунка 1.4 видно, что использование лазерного монитора предполагает оптическую систему, отличающуюся от рассмотренной ранее. Полосовой фильтр (4) селективно подавляет определенную длину волны генерации. Объектив (5) применяется для корректировки размера пучка в соответствии с размером матрицы видеорегирующего устройства (6). Для избегания эффекта засветки матрицы видеорегирующего устройства используется фильтр (7).

Поскольку лазеры на парах атомов меди работают в импульсно-периодическом режиме [1-5], необходима синхронизация импульсов генерации со съемкой видеорегирующей аппаратуры. В работе [25] для регистрации изображения была использована высокоскоростная видеокамера, скорость съемки которой существенно ниже ЧСИ лазерной генерации. В виду этого высокоскоростная видеокамера и оптический

усилитель работали асинхронно. Такой режим работы характерен тем, что изображение каждого кадра формируется несколькими импульсами сверхсветимости, попадающими в экспозицию. В результате этого изображение получается «размытым», то есть содержит искажения, которые связаны с вибрацией элементов оптической схемы усилителя и нестабильностью разряда от импульса к импульсу. Чтобы минимизировать эти искажения, необходимо регистрировать изображение в каждом кадре от одиночного импульса оптического усилителя.

В работе [26] реализована покадровая регистрация изображений, формируемых активной оптической системой и скоростной фотографической установкой ВФУ-1. Недостатком такой системы является необходимость длительной обработки получаемых на фотопленке изображений.

Работа [10] посвящена исследованию процесса горения и распространения теплового фронта посредством лазерного монитора. В работе представлен макет лазерного монитора с использованием активной среды высокочастотного лазера на парах бромида меди. Регистрация изображений процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза осуществлялась посредством камеры с неуправляемым затвором Casio EX-FH20, способной производить съемку со скоростью до 420 кадров/с. Очевидно, что скорость съемки является ограничивающим фактором временного разрешения системы. Представленные результаты в работе [10] позволяют дать количественную оценку исследуемого процесса (например, скорость распространения теплового фронта). Однако, авторы отмечают, что системе присуща достаточно высокая погрешность, поскольку каждый кадр формировался несколькими импульсами сверхсветимости усилителя аналогично работе [26].

Для увеличения временного разрешения лазерного монитора в работе [27] была использована высокоскоростная камера MotionPro X3 со скоростью съемки до 40 тысяч кадров/с. В качестве активного элемента системы использовался CuBr-лазер с полупроводниковым источником накачки. ЧСИ

составляла 28,8 кГц, длительность импульса сверхсветимости 40 нс, энергия импульса 2,7 мкДж. Экспериментально было установлено, что увеличение скорости съемки способствует появлению так называемых «пустых» кадров. Такой эффект обусловлен несогласованностью лазерной генерации и моментов срабатывания затвора камеры. Также в работе [27] представлена система синхронизации усилителя яркости и высокоскоростной видеокамеры. Синхронизация реализована формированием запускающего импульса, который поступает на затвор видеокамеры от схемы управления полупроводниковым источником накачки CuBr-лазера. Схема управления и видеокамера гальванически развязаны. Разработанная система регистрирует изображение от одиночного импульса сверхсветимости усилителя. Пространственное разрешение системы составило порядка 0,5 мкм. Временное разрешение –  $(10^{-4} - 10^{-5})$  с.

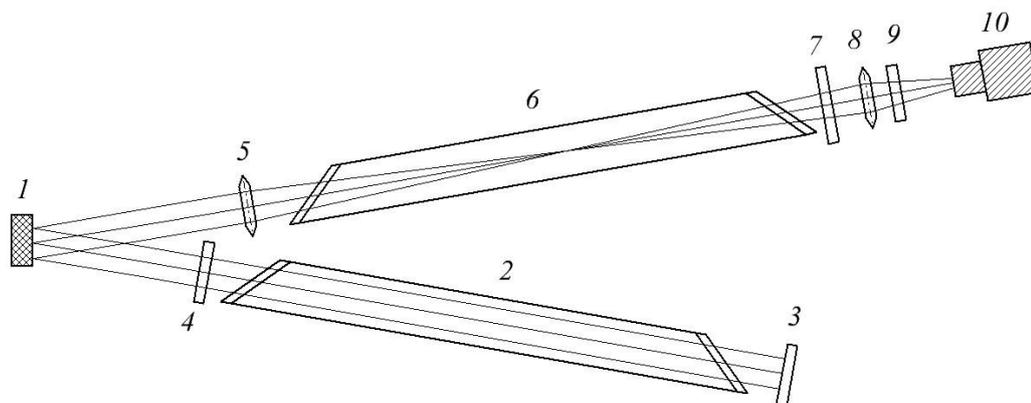
В дальнейшем [28] система синхронизации была модифицирована с целью оптимизировать работу лазерного монитора. Для ее реализации был использован мультивибратор, входной импульс для которого формировался микроконтроллером. Такой подход позволил варьировать параметры синхроимпульса: частоту следования, длительность, задержку относительно импульса управления источником накачки. В работе [15] проводились эксперименты по визуализации тестовых объектов, каждый кадр которых формировался за один импульс сверхсветимости лазерного усилителя. Длительность импульса составила 47 нс, ЧСИ – 21 кГц. Для регистрации изображений использовались камеры FastecHiSpec 1 и MotionProX3 со скоростями съемки до  $10^5$  кадров/с и до  $4 \cdot 10^4$  кадров/с соответственно.

#### 1.4.6 Бистатический лазерный монитор

Реализация бистатической схемы лазерного монитора подразумевает использование двух лазеров: одного – в качестве внешнего источника подсветки, другого – в качестве усилителя изображения. Преимуществом данной системы по сравнению с моностатическим лазерным монитором

является возможность независимой регулировки параметров лазерной подсветки и усиления изображения. Из этого вытекают два других достоинства бистатического лазерного монитора:

- возможность увеличения области зрения системы
- возможность увеличения предельного расстояния от источника излучения до исследуемого объекта при его визуализации



- 1 – объект наблюдения, 2 – внешний источник излучения,  
3 – зеркало, 4 – плоскопараллельная пластина, 5 – собирающая линза  
(объектив), 6 – усилитель яркости, 7 – полосовой фильтр,  
8 – собирающая линза (объектив), 9 – полосовой фильтр,  
10 – видеорегистрирующее устройство

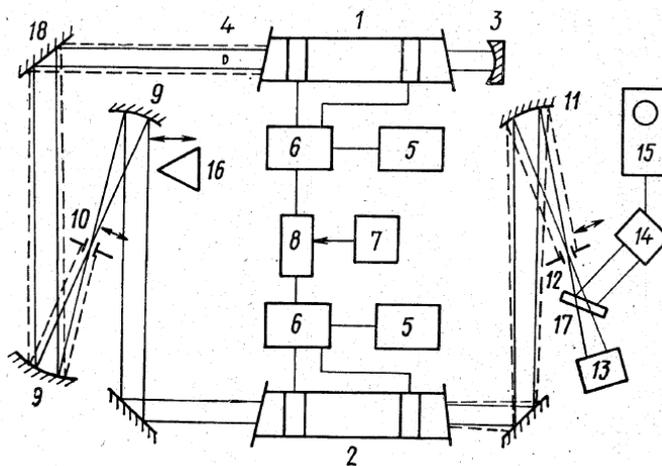
Рисунок 1.5 – Визуализация объекта по методу бистатического лазерного монитора

На рисунке 1.5 изображена схема бистатического лазерного монитора. Исследуемый объект (1) подсвечивается внешним источником излучения (2), после чего отраженный сигнал проходит через объектив (5), формирующий изображение. Формирование изображения происходит в активной среде усилителя яркости (6), работающего в режиме сверхсветимости. В результате процессов, протекающих в активной среде при инверсной населенности, на выходе усилителя яркости (6) получается усиленное изображение, которое затем проходит через оптическую систему

(7, 8, 9), аналогичную той, что была описана для моностатической схемы лазерного монитора. Наконец, изображение регистрируется высокоскоростной видеокамерой.

### 1.5 Система «Генератор – усилитель мощности»

Описанный принцип действия бистатического лазерного монитора аналогичен системе «Генератор – усилитель мощности». Исследованию такой системе посвящен ряд научных работ [29, 30]. Эффективность системы «Генератор – усилитель мощности» зависит от временного сдвига между началом импульса сверхизлучения усилителя и моментом поступления в активный объем усилителя сигнала от задающего генератора. Очевидно, что эффективность системы тем ниже, чем больше временное рассогласование сигналов. На рисунке 1.6 приведена схема экспериментальной установки, используемой в работе [29].

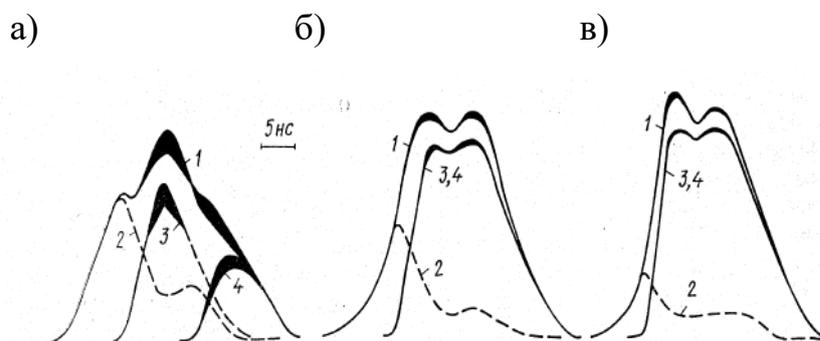


- 1 – задающий генератор, 2 – усилитель мощности, 3 – «глухое» зеркало, 4 – алюминированное зеркало, 5 – высоковольтные выпрямители, 6 – модуляторы, 7 – генератор, 8 – линия задержки, 9 – зеркала, 10 – диафрагма, 11 – «глухое» зеркало, 12 – диафрагма, 13 – термоэлектрический приемник ТИ-3, 14 – коаксиальный фотоэлемент ФЭК-14К, 15 – осциллограф С7-1 ОА, 16 – оптическая призма, 17 – плоскопараллельная пластина

Рисунок 1.6 – Схема экспериментальной установки

В качестве задающего генератора (1) и усилителя мощности (2) использовались промышленные образцы ГЛ-201 – активные элементы лазера на парах меди. Длина одного активного элемента и активной части разрядного канала составляла 130 см и 80 см соответственно, диаметр активного элемента – 2 см. «Глухое» (3) и алюминированное (4) зеркала образовывали телескопический неустойчивый резонатор. Возбуждение активных сред на переходах атомов меди осуществлялось импульсным источником питания, который включал два высоковольтных выпрямителя (5) и два идентичных модулятора (6). В качестве коммутационных приборов использовались тиратроны ТГИ1-2000/35. На вход модуляторов поступает импульс запуска, формируемый генератором (7). Линия задержки (8) позволяет сдвигать во времени друг относительно друга импульсы разрядного тока через каждый из активных элементов. Временной сдвиг варьировался в диапазоне от -50 нс до 50 нс. Частота следования импульсов составляла 8 кГц. Зеркала (9) и диафрагма (10) служат для подавления фоновой составляющей излучения задающего генератора. Зеркало (11) и диафрагма (12) использовались для выделения малорасходящегося пучка на выходе усилителя. Термоэлектрическим приемником ТИ-3 (13) измерял среднюю мощность излучения системы. Коаксиальный фотоэлемент (14) и осциллограф (15) использовались для регистрации временной развертки импульсов генерации. Излучение заводилось на регистрирующую аппаратуру посредством пластины (17).

Исследования проводили в установившемся оптимальном температурном режиме работы ЛАЭ, который обеспечивался при мощности питания от выпрямителя около 3,5 кВт (на каждый активный элемент) и напряжении на анодах тиратронов 21 кВ. На рисунке 1.7 приведены осциллограммы импульсов излучения суммарного пучка (1), пучка сверхсветимости (фоновый) (2), промежуточного (5) и дифракционного (4) пучков.



а) – на выходе задающего генератора, б) – на выходе усилителя без диафрагмы, в) – на выходе с диафрагмой диаметром 0,5 мм

Рисунок 1.7 – Осциллограммы импульсов излучения суммарного (1), фонового (2), промежуточного (3) и дифракционного (4)

Промежуточным называют пучок, который формируется за один двойной проход длины резонатора. Дифракционный пучок формируется за два таких двойных прохода. Промежуточный и дифракционный пучки авторы называют малорасходящимися. Импульсы излучения пучков частично перекрываются во времени, причем начало импульса промежуточного пучка отстает от начала импульса фонового на (8–10) нс, а дифракционного – на (17–20) нс. Интервал (8–10) нс соответствует времени одного двойного прохода, а (17–20) нс – двух двойных проходов излучением длины резонатора. Полная мощность излучения генератора составляла 18 Вт. Авторы работы [29] отмечают, что при подаче на вход усилителя суммарного пучка будут усиливаться, конкурируя между собой, все его составляющие, и для получения на выходе усилителя только пучков с малой расходимостью необходимо избавляться от влияния на его работу фонового излучения генератора. Плотность мощности фона во много определяется оптическим путем от задающего генератора до усилителя – длина пути в данной работе составляла 7 м. Регулируемая линия задержки позволила подобрать режим работы системы с максимумом мощности излучения на выходе усилителя 38 Вт. Для вершин осциллограмм импульсов на рисунке 1.7 а характерна размытость, которая обусловлена расходимостью импульсной энергии порядка 10 %. Расходимость возникает из-за механических колебаний

элементов конструкции и воздушных тепловых потоков. На рисунке 1.8 приведены зависимости мощности излучения в суммарном (1), фоновом (2) и малорасходящихся (3) пучках от временной расстройки системы. Знак «+» соответствует опережению сигнала генератора по отношению к максимуму эффективного усиления, а «-» соответствует отставанию. При расстройке сигнала генератора  $+(3-4)$  нс мощность в малорасходящихся пучках составила 31,5 Вт. При расстройке в сторону отставания мощность относительно быстро снижалась. При расстройке  $-(3-4)$  нс мощность в фоновом пучке достигала своего максимального значения в 20 Вт.

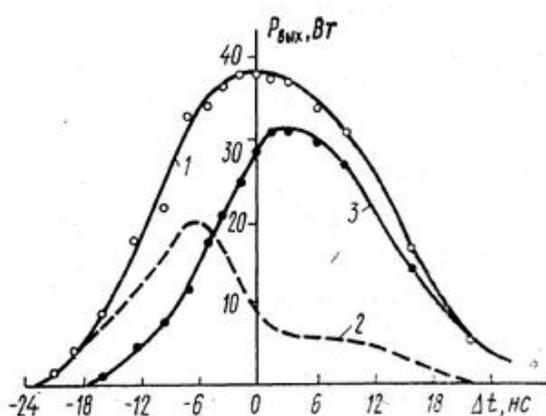


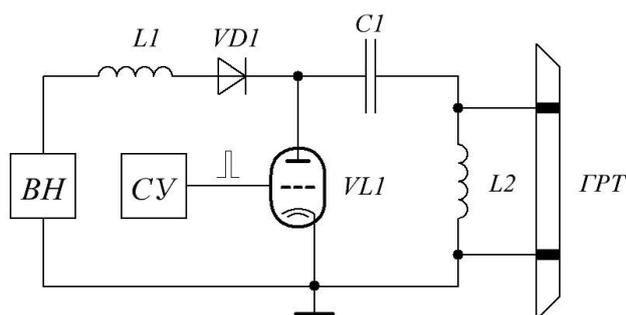
Рисунок 1.8 – Зависимость средне мощности излучения в суммарном (1), фоновом (2) и малорасходящихся (3) пучках от временной расстройки системы (без диафрагмы в коллиматоре)

Приведенные зависимости распределения мощности позволяют заключить, что во входном сигнале импульсы излучения пучков перекрываются во времени лишь частично – это позволяет вводить в зону эффективного усиления ту или иную составляющую излучения.

### 1.6 Традиционная схема накачки лазеров на парах металлов

Неотъемлемой частью работы любого лазера является его накачка – то есть процесс преобразования внешней энергии, например электрической, в энергию лазерного излучения. На рисунке 1.9 представлена традиционная схема накачки газовых лазеров. Высоковольтный источник постоянного

напряжения (ВН) заряжает емкостной накопитель энергии  $C1$  через зарядный дроссель  $L1$  и защитный диод  $VD1$ . Система управления формирует импульс запуска, который поступает на сетку тиратрона  $VL1$ , в результате чего он коммутирует. Следовательно конденсатор  $C1$  подключается параллельно нагрузке, в качестве которой используется газоразрядная трубка (ГРТ). Конденсатор  $C1$  с высокой скоростью разряжается на ГРТ, внутри которой формируется импульс напряжения отрицательной полярности. Затем следует пауза, во время которой накопительная емкость  $C1$  вновь заряжается от источника питания, и все процессы повторяются [31, 32].



$ВН$  – источник высокого напряжения,  $L1$  – зарядный дроссель,  $VD1$  – защитный диод,  $C1$  – накопительная емкость,  $L2$  – шунтирующий дроссель,  $GDT$  – газоразрядную трубку,  $VL1$  – тиратрон,  $СУ$  – система управления

Рисунок 1.9 – Традиционная схема источника накачки

В таких схемах в качестве коммутатора активно используют тиратроны, поскольку они в отличие от полупроводниковой техники позволяют коммутировать высоковольтное напряжение с высокой скоростью нарастания тока. Когда тиратрон открывается, напряжение на нем уменьшается до величины напряжения горения разряда, которое составляет порядка 50 В. Эта величина напряжения практически всегда существенно меньше напряжения используемого источника питания. По мере разряда конденсатора через тиратрон напряжение в промежутке анод-катод уменьшается. Когда напряжение станет ниже величины, требуемой для поддержания разряда, электроны и ионы диффундируют к электродам и

стенкам вакуумной оболочки, оседают на их поверхностях и рекомбинируют между собой, вследствие чего плазма «распадается». Соответственно протекание тока через тиратрон прекращается, промежуток анод-катод восстанавливает свои изоляционные свойства, то есть это эквивалентно тому, что прибор перешел в закрытое состояние.

Таким образом, тиратрон позволяет сформировать высоковольтный импульс за счет быстрого подключения емкостного накопителя энергии к нагрузке. СУ при этом должна обеспечивать формирования импульсов запуска со следующими параметрами:

- время длительности порядка 1 мкс;
- амплитуда напряжения от 300 В до 700 В;
- частота следования импульсов от 10 кГц до 50 кГц.

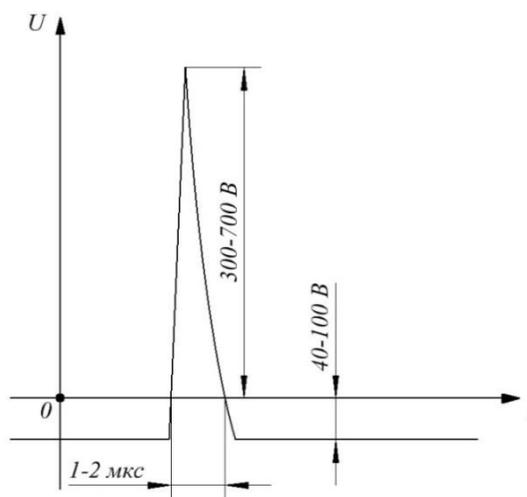


Рисунок 1.10 – Импульс запуска тиратрона и его параметры

На рисунке 1.10 изображен импульс напряжения, который поступает на сетку тиратрона. При этом во время паузы между управляющими импульсами на катод тиратрона подается отрицательное напряжение порядка (40–100) В. Это напряжение называют напряжением смещения, оно используется для ликвидации возможных ложных коммутаций прибора.

## Глава 2. Объекты и методы исследования

### 2.1 Накачка активных элементов

Накачка активных сред на переходах атомов меди осуществлялась за счет прямого разряда накопительных емкостей на ГРТ. Для этого были использованы источники накачки с импульсным зарядом рабочей емкости. В качестве коммутаторов в источниках использовались тиратроны ТГИ1-1000-25. Использование источников, изготовленных в лаборатории квантовой электроники ИОА СО РАН, позволило осуществлять накачку с ЧСИ от 10 кГц до 18 кГц. Разрабатываемые источники накачки позволили исследовать работу активных элементов при ЧСИ до 28 кГц. Номинальная емкость накопительных конденсаторов варьировалась от 330 пФ до 1500 пФ.

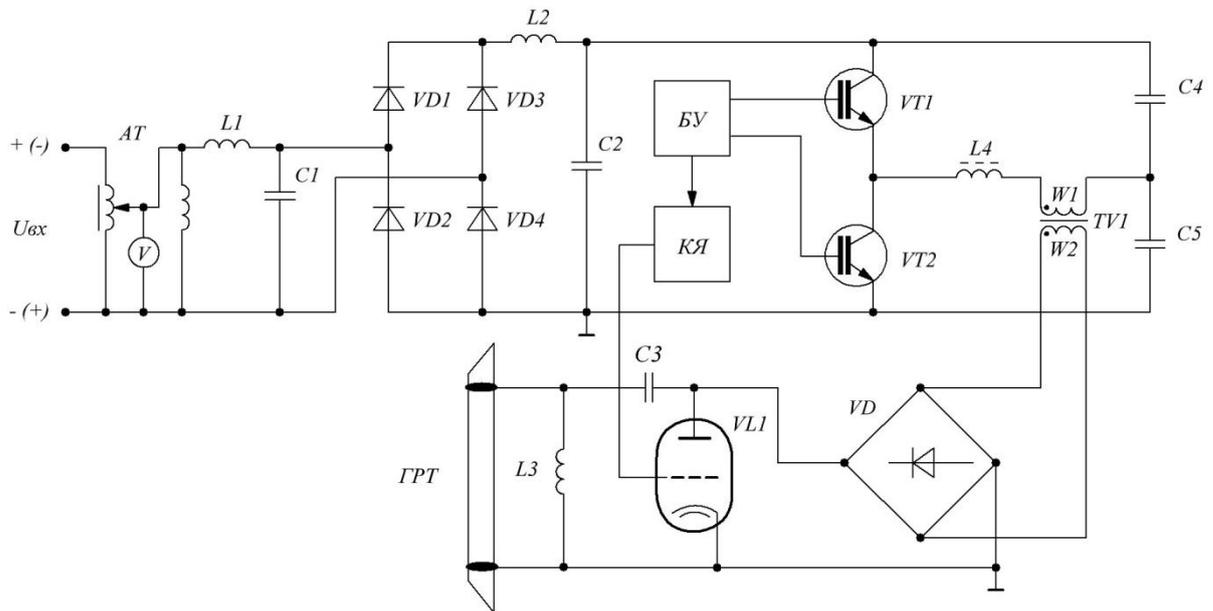
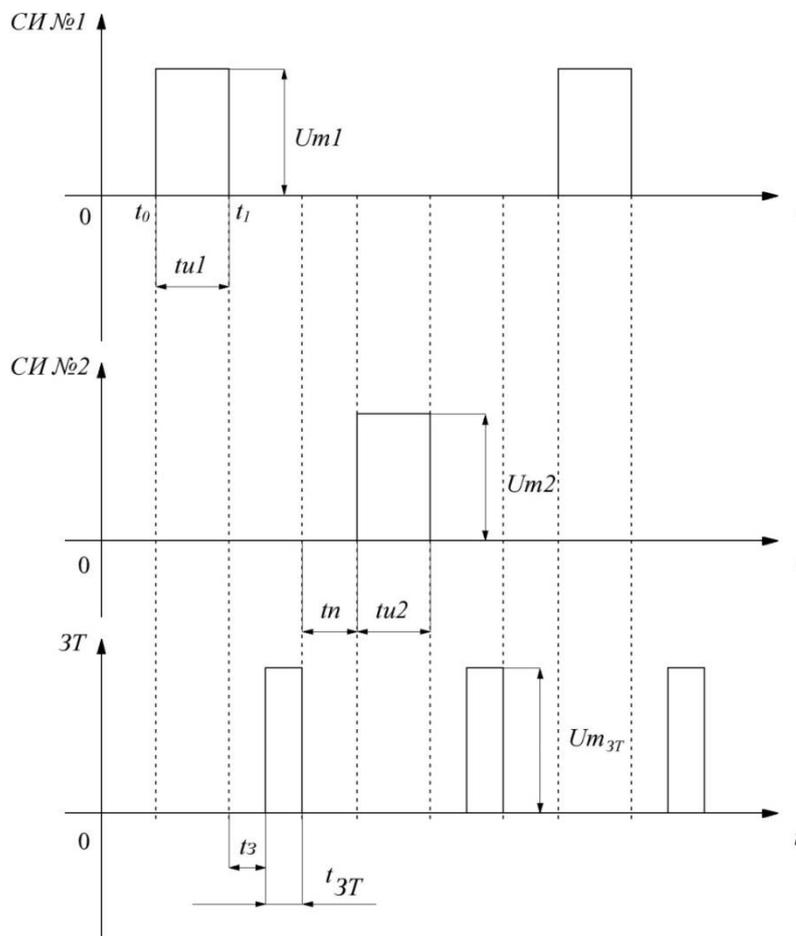


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема источника накачки CuBr-лазера

На рисунке 2.1 приведена принципиальная схема источника накачки с импульсным зарядом рабочей емкости. Сетевое напряжение 220 В частотой 50 Гц поступает на вход лабораторного автотрансформатора (АТ), который позволяет варьировать величину входного напряжения. Переменный сигнал выпрямляется, отфильтровывается и прикладывается к полумостовому инвертору, выполненному на мощных IGBT-транзисторах. В момент времени  $t_0$ , принятый за точку отсчета (см. рисунок 2.2), открывается транзистор  $VT1$ ,

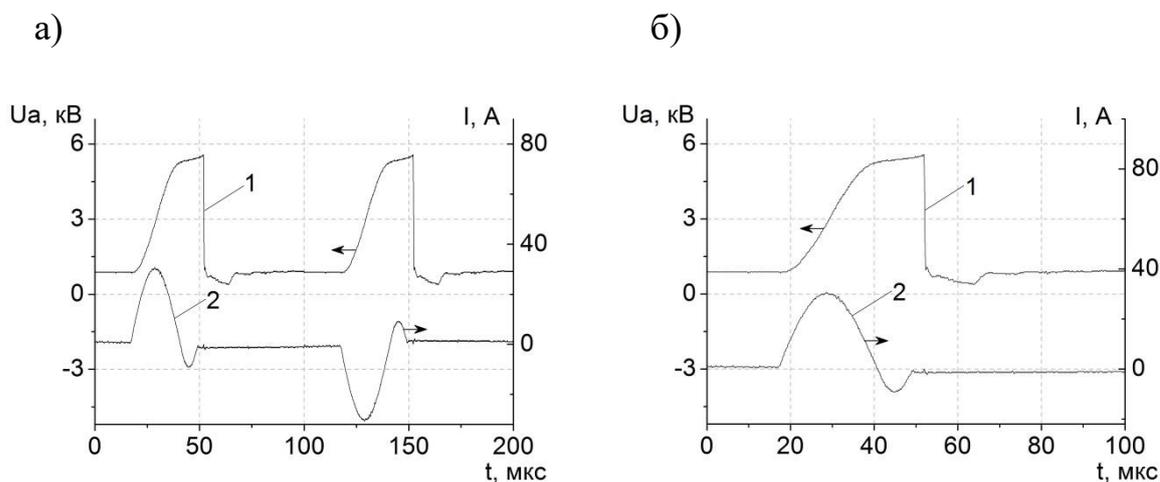
и через него начинает протекать импульс тока, длительность которого подбирается таким образом, чтобы рабочая емкость  $C4$  успевала зарядиться до максимального значения. Далее транзистор  $VT1$  запирается в некоторый момент времени  $t_1$ . После закрытия транзистора  $VT1$  следует задержка ( $t_3$ ) порядка нескольких мкс, после чего от системы управления приходит запускающий импульс на сетку тиратрона  $VL1$ .



СИ№1 и СИ№2 – серии импульсов №1 и №2 для открытия транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  соответственно; ЗТ – импульс запуска тиратрона

Рисунок 2.2 – Диаграммы работы системы управления

При коммутации тиратрона накопительный конденсатор  $C3$  разряжается на газоразрядную трубку (ГРТ). Затем следует пауза ( $t_{п}$ ), длительность которой задается с помощью системы управления (СУ). По окончании заданной паузы открывается транзистор  $VT2$ , и далее все процессы повторяются.



а) – временная развертка 25 мкс, б) – временная развертка 10 мкс

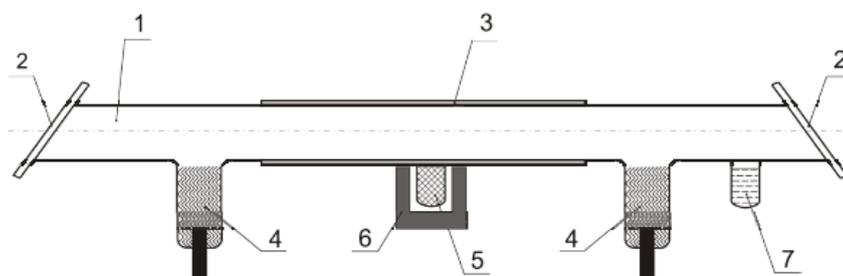
Рисунок 2.3 – Напряжение на аноде тиратрона и зарядный ток дросселя

На рисунке 2.3. приведены осциллограммы напряжения на аноде тиратрона и зарядный ток дросселя. Для минимизации динамических потерь в схеме коммутация тиратрона осуществляется в момент времени, когда ток дросселя спадает до нуля.

## 2.2 Конструкция активных элементов

На рисунке 2.4 приведена конструкция лазерного активного элемента. ГРТ (1) и ее выходные окна (2) изготавливаются из кварцевого стекла в Института оптики атмосферы СО РАН. Для обеспечения требуемой температуры внешней стенки ГРТ (порядка 680 °С) используется специальный нагревательный элемент с теплоизолятором. На один из электродов (4) подается высокое напряжение, второй же электрод заземляется.

Активный объем ГРТ заполняется парами бромида меди, порошок которого помещен в отсек (5) и нагревается элементом (6) до температуры порядка 500 °С. Кроме того, в конструкции предусмотрен генератор НВг, который используется в качестве буферного газа. Требуемые уровни рабочей температуры обеспечивает трехканальный терморегулятор.



1 – кварцевая трубка, 2 – выходные окна, 3 – нагревательный элемент с теплоизолятором, 4 – электроды, 5 – порошок бромида меди, 6 – нагревательный элемент, 7 – генератор HBr  
Рисунок 2.4 – Конструкция активного элемента

Рассмотренная конструкция идентична как для источника подсветки, так и для усилителя яркости бистатического лазерного монитора. Габаритные размеры ГРТ задающего генератора составили: длина активной зоны – 90 см, диаметр – 5 см. Что касается ГРТ усилителя яркости, то ее длина активной зоны составила 50 см, а диаметр – 5 см. Кроме геометрических размеров, активные элементы отличаются друг от друга формируемыми для них оптическими схемами. Например, для того, чтобы CuBr-лазер работал в режиме задающего генератора, были использованы глухие зеркала для образования неустойчивого телескопического резонатора. Более детальная информация об используемых оптических компонентах приводится в главе 3.

### 2.3 Измерительное оборудование

Для регистрации осциллограмм токов и напряжения использовались цифровые четырехканальные осциллографы RIGOL (DS1074B) и LeCroy (WJ324 A). Высокое напряжение регистрировалось измерительным высоковольтным щупом Tektronics P6015A. Электрический ток в схемах накачки регистрировался токовым кольцом Pearson Current Monitors 8450 с коэффициентом чувствительности 1:10 (В/А).

Для регистрации импульсов лазерного излучения использовались коаксиальные фотоэлементы ФЭК-22СПУ-М. Мощность излучения определялась посредством датчика Ophir 30C-SH.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4ТМ51	Васнев Николай Александрович

<b>Институт</b>	<b>ИФВТ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ВЭСЭ</b>
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с рекомендованным учебно-методическим пособием, поиск достоверной информации о стоимости требуемых ресурсов, изучение нормативно-правовых документов, расчеты бюджетных средств и отчислений.
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 и инновационного потенциала НТИ	Оценка готовности научного проекта к коммерциализации, выявление сильных и слабых сторон проекта. Анализ конкуренции на советующем сегменте рынка.
2. Разработка устава научно-технического проекта	Формирование проектной группы, определение функций каждого из членов группы, их трудозатраты и заработная плата. Определение заинтересованных сторон проекта.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Разработка календарного плана проекта, определение трудоемкости работы и бюджета, оценка существующих рисков.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки и существующих аналогов.

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сегментирование рынка</li> <li>2. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>3. Матрица SWOT</li> <li>4. Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации</li> <li>5. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей; Диаграмма Ганта</li> <li>6. График проведения и бюджет НТИ</li> <li>7. Калькуляция плановой себестоимости НИР</li> <li>8. Реестр рисков</li> <li>9. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</li> </ol>
--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент кафедры менеджмента	Черепанова Наталья Владимировна	Кандидат философских наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4ТМ51	Васнев Николай Александрович		

## Глава 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 5.1 Предпроектный анализ

#### 5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Существует понятие целевого рынка. Под ним, как правило, понимают отдельные сегменты рынка, на котором в будущем будет продаваться разработка. Сегментом является некоторая часть рынка, которая представляет собой группу потребителей, обладающих общими признаками между собой и отличными от других сегментов. Потребителям разных сегментов требуется определенной вид товара или услуги. Разделение потребителей на подобные группы (сегменты) является неотъемлемой частью предпроектного анализа. Этот процесс разделения называется сегментированием.

Выполним сегментирование рынка активных оптических систем для визуализации быстропротекающих процессов с фоновой засветкой по следующим критериям: вид фильтрации изображения, количество активных элементов. На основании этих критериев построим карту сегментирования рынка (рисунок 5.1).

	Вид фильтрации изображения	
	Пассивный	Активный
С одним активным элементом		
С двумя активными элементами		

Рисунок 5.1 – Карта сегментирования рынка активных оптических систем:

- на рынке существует ряд производителей и поставщиков;
- серийное производство отсутствует, но осуществляется производство лабораторных образцов по запросу;
- на рынке отсутствуют производители и поставщики

Из построенной карты сегментирования очевидно, что существующие на рынке активные оптические системы для визуализации быстропротекающих процессов в основном представляют собой образцы пассивного метода фильтрации с одним активным элементом. Следовательно, производство и поставка активных оптических систем с двумя активными элементами будет характеризоваться крайне низкой конкуренцией. Производство подобных активных оптических систем с пассивным типом фильтрации бессмысленно, поскольку наличие двух активных элементов уже обеспечивает активный вид фильтрации.

### 5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Известно, что рынок находится в постоянном движении и развитии. Следовательно, анализ существующих продуктов, способных составить конкуренцию разработке, необходимо проводить систематически. Такой подход позволит своевременно внести коррективы в разработку для успешного противостояния конкурентоспособным продуктам. Необходимо объективно оценивать достоинства и недостатки разработок конкурентов. Для этого может быть использована следующая информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Такой анализ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения дает возможность оценить эффективность научной разработки и определить направления для ее последующего роста. Данный анализ целесообразно

проводить с помощью оценочной карты, представленной в таблице 5.1. Требуется привести не менее трех конкурентных товаров и разработок.

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство в эксплуатации	0,02	2	3	4	0,04	0,06	0,08
2. Простота изготовления	0,02	2	3	4	0,04	0,06	0,08
3. Ремонтопригодность	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
4. Безопасность	0,02	2	2	3	0,04	0,04	0,06
5. Долговечность	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
6. Помехоустойчивость	0,01	3	3	3	0,03	0,03	0,03
7. Номинальная частота работы	0,04	4	3	5	0,16	0,12	0,20
8. Номинальная мощность излучения	0,06	4	3	3	0,24	0,18	0,18
9. Предельно-допустимая дистанция визуализации	0,2	4	3	2	0,8	0,6	0,4
10. Пространственное разрешение системы	0,2	4	3	2	0,8	0,6	0,4
11. Область зрения системы	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
12. Глубина фильтрации	0,2	4	3	2	0,8	0,6	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,02	4	3	3	0,08	0,06	0,06
2. Уровень проникновения на рынок	0,02	2	1	3	0,04	0,02	0,06
3. Цена	0,03	4	3	2	0,12	0,09	0,06
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
Итого	1	52	45	48	3,77	2,52	2,49

Ф – бистатический лазерный монитор, К1 – лазерный проекционный микроскоп, К2 – CAVILUX Smart.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 5.1, подбираются, исходя из

выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

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

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (5.1)$$

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

Данные, сведенные в таблицу 5.1, позволяют заключить, что наиболее конкурентоспособным из приведенных продуктов является разрабатываемый бистатический лазерный монитор. Критерии, за счет которых разработка показывает свою большую конкурентоспособность, включают: предельно-допустимую дистанцию визуализации, пространственное разрешение системы, область зрения системы, глубину фильтрации, номинальную мощность излучения.

### 5.1.3 SWOT-анализ

SWOT – это комплексный анализ научно-исследовательского проекта, оценивающий его сильные стороны, слабые стороны, возможности и угрозы. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Такой анализ содержит несколько этапов.

На первом этапе необходимо выявить сильные и слабые стороны проекта, определить какова возможность его успешной реализации, а также оценить возможную угрозу провала. Данные сведения представлены в таблице 5.2. Второй этап заключается в определении соответствия сильных и слабых

сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды (таблица 5.3).

Таблица 5.2 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта	Слабые стороны научно-исследовательского проекта
	<p>С1. Проект выполняется в Институте оптики атмосферы СО РАН, что обеспечивает доступ к необходимому производственному и измерительному оборудованию для реализации аппаратно-программного комплекса, обслуживающего бистатический лазерный монитор.</p> <p>С2. Высокий уровень компетенции исполнителей и консультантов проекта. В число последних входят доктора наук, областью научных интересов которых является квантовая электроника и физика лазеров.</p> <p>С3. Разработка позволяет разделить функции подсветки и усиления, что обеспечивает независимую регулировку соответствующих им параметров.</p> <p>С4. Разработка позволит достичь улучшения следующих характеристик системы визуализации (относительно моностатического лазерного монитора): область зрения системы будет увеличена с 1 см до 2 см (не менее чем в 2 раза), предельно-допустимая дистанция от источника излучения до исследуемого объекта будет увеличена с 3 м до 9 м (не менее чем в 3 раза).</p> <p>С5. Наличие прототипа научной разработки.</p>	<p>Сл1. Сложность изготовления.</p> <p>Сл2. Сложность эксплуатации.</p> <p>Сл3. Высокая стоимость ключевых элементов разработки.</p> <p>Сл4. Высокий уровень ЭМ излучения.</p> <p>Сл5. Необходимость соблюдения строгого электромагнитного и теплового режимов.</p>

## Продолжение таблицы 5.2 – Матрица SWOT

<p>Возможности:</p> <p>В1. Высокая стоимость существующих аналогов.</p> <p>В2. Импортзамещение.</p> <p>В3. Наличие спроса на разрабатываемый продукт в научных кругах.</p>	<p>Разработка включает ряд отличительных особенностей по сравнению с современными дорогостоящими аналогами, что обеспечит потребительский спрос на своем сегменте рынка и может позволить реализовать импортзамещение (С3, С4, коррелируют с В1, В2, В3).</p>	
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p> <p>У2. Низкий спрос из-за сложности эксплуатации и допуска к работе специалистов с квалификационной группой электробезопасности не ниже IV.</p> <p>У3. Ограничение на экспорт технологии.</p> <p>У4. Увеличение конкуренции.</p>	<p>Сложность эксплуатации может снизить интерес потенциального потребителя, который может отдать свое предпочтение более простым и известным аналогам (С3, С4 коррелирует с У2).</p>	<p>Ограничение на спрос внутри страны и на экспорт могут быть вызваны из-за длительного изготовления, дорогостоящих элементов, сложности эксплуатации, а также из-за повышенных требований к электробезопасности. (Сл1, Сл2, Сл3, Сл4, Сл5 коррелируют с У1, У2, У3).</p>

Интерактивная матрица проекта, представленная в качестве таблицы 5.3, используется как одна из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Анализ интерактивной матрицы представляется в форме записи коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и т.д. Анализируя данные, сведенные в интерактивную матрицу, можем заключить, что необходимо делать упор на отличительные особенности разработки от существующих аналогов.

Наиболее слабыми сторонам проекта оказались высокая стоимость ключевых элементов и сложность изготовления.

Таблица 5.3 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	-	+	+	-
	B2	0	0	+	+	+
	B3	+	+	+	+	+
Угрозы проекта	У1	0	-	-	-	-
	У2	0	-	+	+	-
	У3	-	-	-	-	-
	У4	-	-	+	+	+
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	-	-	-	-	-
	B2	+	+	+	+	-
	B3	-	-	-	-	-
Угрозы проекта	У1	+	-	+	-	-
	У2	+	+	-	+	+
	У3	0	0	+	-	-
	У4	+	+	+	-	-

На третьем этапе в таблицу 5.2 были внесены коррективы и сформулированы комментарии, отражающие корреляцию слабых и сильных сторон проекта с возможностями и рисками. Полученные результаты должны быть учтены при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

#### 5.1.4 Анализ конкурентных технических решений

Разработка оборудования включает этап оценки готовности проекта к коммерциализации – это помогает определить недостатки проекта и оценить возможность его самостоятельного завершения. Здесь необходимо рассмотреть степень проработанности научного проекта, а также уровень имеющихся знаний у разработчика. Для такой оценки был сформулирован ряд критериев, сведения о которых представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Оценка степени готовности 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 НИП	3	3
3.	Определены отрасли и технологии для предложения на рынке	3	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	1
11.	Проработаны вопросы выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	2
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	<b>42</b>	<b>32</b>

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле (5.2):

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (5.2)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;  
 $B_i$  – балл по  $i$ -му показателю. Из таблицы 5.4 очевидно, что проект обладает средней перспективой к коммерциализации. К наиболее слабо проработанным вопросам относятся: маркетинговые исследования рынков сбыта, разработка бизнес-плана и плана международного сотрудничества для выхода на зарубежный рынок. В настоящий момент перечисленным пунктам уделено меньшее внимание, поскольку проектная группа сосредоточена на устранении технических недостатков разработки.

## 5.2 Инициация проекта

### 5.2.1 Цели и результаты проекта

Данный раздел содержит информацию о заинтересованных сторонах проекта (таблица 5.5) и об ожидаемых результаты (таблица 5.6). Заинтересованными сторонами являются физические или юридические лица, принимающие активное участие в проекте, или же интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта

Таблица 5.5 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Руководитель проекта	Использование результатов проекта в дальнейших исследованиях
Исполнители проекта	Повышения уровня квалификации благодаря работе в научной сфере. Устные доклады о результатах работы на научных конференциях, публикации в журналах ВАК
Организация-заказчик	Использование результатов интеллектуальной деятельности для проведения экспериментальных исследований, публикаций их результатов, повышения репутации и конкурентоспособности организации
Спонсор проекта	Развитие российских научных исследований и программ. Повышение уровня качества научных исследований в стране. Получение доли выручки при успешной коммерциализации проекта

Таблица 5.6 – Цели и результат проекта

Цели проекта	Создание лабораторного образца системы управления активной оптической системой – бистатическим лазерным монитором.
Ожидаемые результаты проекта	Разрабатываемая система позволит управлять бистатическим лазерным монитором, предназначенным для визуально-оптического контроля изделий и быстропротекающих процессов с широкополосной фоновой засветкой. Основное преимущество разрабатываемого аппаратно-программного комплекса по сравнению с существующими аналогами будет заключаться в возможности управления двумя активными элементами – источником подсветки и усилителем яркости. Это обеспечит возможность независимой регулировки параметров подсветки и усиления. Такой подход позволит увеличить предельно-допустимую дистанцию визуализации и область зрения системы.
Критерии приемки результата проекта	Конечный лабораторный образец должен обладать параметрами и характеристиками, прописанными в ТЗ. Использование лабораторного образца должно обеспечивать получение практических результатов.
Требования к результату проекта	Разработка должна обеспечить улучшение следующих характеристик (относительно моностатического лазерного монитора): область зрения системы будет увеличена с 1 см до 2 см (не менее чем в 2 раза), предельно-допустимая дистанция от источника излучения до исследуемого объекта будет увеличена с 3 м до 9 м (не менее чем в 3 раза).

### 5.2.2 Организационная структура проекта

В таблице 5.7 показана рабочая группа проекта и определены их роли в его реализации. Прописаны функции, выполняемые участниками и их трудозатраты в проекте.

Таблица 5.7 – Рабочая группа проекта

№ п/п	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, день
1	Руководитель проекта	Постановка и формулировка цели проекта. Постановка ряда задач для реализации основной цели. Консультирование исполнителя проекта в области электроники, проведении экспериментов с активными оптическими системами, участие в экспериментах и обсуждениях полученных результатов.	42
2	Исполнитель проекта	Литературный обзор научных работ, посвященных данной тематике. Обзор существующих аналогов, сравнение их технических характеристик между собой и разрабатываемым аппаратно-программным комплексом. Разработка структурной и принципиальной схем аппаратно-программного комплекса. Изготовление лабораторного	201
3	Эксперт проекта	Консультирование руководителя и исполнителя проекта в области квантовой электроники, физики лазеров. Участие в обсуждении результатов экспериментов.	16
ИТОГО:			366

### 5.2.3 Ограничения и допущения проекта

Таблица 5.8 содержит информацию об ограничениях и допущениях проекта.

Таблица 5.8 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
1. Бюджет проекта	200000 р.
1.1. Источник финансирования	Первая выплата с Гранта победителя программы УМНИК, проводимой Фондом содействия инновациям (Протокол победителей от 17.01.17)
2. Сроки проекта:	15.09.2015-25.05.2017
2.1. Дата утверждения плана управления проектом	10.09.2015

Продолжение таблицы 5.8 – Ограничения проекта

2.2. Дата завершения проекта	16.06.2016
3. Прочие ограничения и допущения	Ограничения времени работы над проектом в связи с занятостью участников в учебной и рабочей деятельности. Ограничения работы с установкой, связанные с вредным влиянием шума, лазерного излучения и негативным влиянием электромагнитного поля на организм человека.

### 5.3 Планирование управления научно-техническим проектом

#### 5.3.1 План проекта

В таблицу 5.9 сведены основные этапы и содержание работ по выполнению НИР с распределением ответственных исполнителей. Диаграммы Ганта, которая иллюстрирует календарный план проекта, приведена в Приложении 3. На такой диаграмме каждый конкретный вид работ изображается протяженным во времени отрезком. График строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта.

Таблица 5.9 – Основные этапы работ по выполнению НИР

№ п/п	Название	Длительность, рабочие дни	Длительность, календарные дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания на НИР	11	15	01.09.2016	15.09.2016	руководитель
2	Анализ технического задания	13	17	16.09.2016	02.10.2016	исполнитель
3	Обзор литературы	34	46	03.10.2016	17.11.2016	исполнитель
4	Выбор структурной схемы устройства	6	8	18.11.2016	25.11.2016	исполнитель
5	Выбор принципиальной схемы устройства	12	18	26.11.2016	13.12.2016	исполнитель
6	Расчет принципиальной схемы устройства	25	37	14.12.2015	20.01.2017	исполнитель

Продолжение таблицы 5.9 – Основные этапы работ по выполнению НИР

6	Расчет принципиальной схемы устройства	25	37	14.12.2015	20.01.2017	исполнитель
7	Электромонтажные работы по реализации устройства	47	70	21.01.2017	31.03.2017	исполнитель
8	Проведение экспериментальных исследований	8	12	01.04.2017	12.04.2017	исполнитель, руководитель, эксперт
9	Корректировка параметров принципиальной схемы устройства	8	12	13.04.2017	24.04.2017	исполнитель, руководитель, эксперт
10	Экспериментальные исследования, обработка результатов	11	16	25.04.2017	10.05.2017	исполнитель, руководитель
11	Оформление расчетно-пояснительной записки	22	30	11.05.2017	09.06.2017	исполнитель
12	Сдача разработки и отчета о работе	4	6	10.06.2017	15.06.2017	исполнитель, руководитель
Итого:		201	287			

### 5.3.2 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты;
- специальное оборудование для научных работ;
- основная заработная плата;
- дополнительная заработная плата;
- отчисления на социальные нужды;
- научные и производственные командировки;
- накладные расходы;
- реестр рисков проекта;
- итого плановая себестоимость.

### 5.3.2.1 Сырье, материалы и покупные изделия

Денежные затраты на всевозможные виды материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, которые требуются для выполнения работ, формируются исходя из стоимости на их приобретения и платы за их транспортировку. На транспортно-заготовительные расходы отводят, как правило, (3–5) % от цены материалов. Будем считать, что данные расходы составят 3 %. Информация о стоимости используемого сырья, материалов, комплектующих изделий сведена в таблицу 5.10.

Таблица 5.10 – Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Микроконтроллер ATmega8A-AU (TQFP32)	3	100	300
Керамические чип-конденсаторы (SMD) 1206	84	0,5	42
Чип-резисторы (SMD) 1206	90	1	90
Микросхема SN74LS00D (SOIC)	3	3	9
Микросхема MC74HC08ADR2	3	24	72
Стабилизатор LM317 MSTT3E (SOIC)	3	22	66
Стабилизатор напряжения L7812CV	7	25	175
Стабилизатор напряжения L7805CV	1	12	12
Операционный усилитель LM358	3	12	36
Светодиоды	3	3	9
Переключатели	8	3	24
Плата управления	3	600	1800
Плата-драйвер	3	800	2400
Вилка на плату WF-2	50	5	250
Контакт для розект HU-T	50	1,30	65
Гнездо на кабель BLS	50	1	50
Гнездо на кабель	6	2	12
Диоды HER308, 3 А, 1000 В	168	10	1680
Резистор МЛТ, 5 МОм	168	0,5	84
Монтажная плата	6	200	1200
Плата управления	3	600	1800
Плата-драйвер	3	800	2400
HFBR-2532Z	4	700	2800

Продолжение таблицы 5.10 – Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
HFBR-1524Z	4	700	2800
Трансформатор с масляным охлаждением	3	3000	9000
Тиратрон ТГИ 1 270/12	3	2000	6000
Сетевой выпрямитель	3	3000	9000
Амперметр 5А (48х48)	3	400	1200
Вольтметр 300 В (48х48)	3	360	1080
Вентилятор 12В, 80х80х25мм	6	360	2160
Вентилятор 12В, 120х120х25мм	4	580	2320
Свинцово-оловянный припой оловянный припой	1	15	15
Всего за материалы		48951	
Транспортно-заготовительные расходы (3%)		1468	
Итого по статье С <sub>м</sub>		50419	

### 5.3.2.2 Специальное оборудование для научных работ

Статье затрат на приобретение различного оборудования содержит затраты на покупку и эксплуатацию специального оборудования. Сюда могут относиться приборы, контрольно-измерительная аппаратура, стенды т.д.

В данном случае необходимое для реализации проекта оборудование уже имеющееся в лаборатории, поэтому его стоимость будем учитывать как амортизационные отчисления (таблица 5.11). Для этого воспользуемся следующей формулой:

$$C_A = \frac{\Phi_{\text{пер}} \cdot N_a}{100\%}, \quad (5.3)$$

где  $\Phi_{\text{пер}}$  – первоначальная стоимость оборудования;

$N_a$  – норма амортизации.

Норма амортизации рассчитывается по формуле:

$$N_A = \frac{100\%}{T_{\text{сл}}}, \quad (5.4)$$

где  $T_{\text{сл}}$  – срок службы оборудования, мес.

Таблица 5.11 – Расчет затрат на спецоборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во	Фпер, тыс. руб.	Тсл, мес.	На, % в мес.	Са в мес., тыс. руб	Период реализации проекта, мес.	Са за весь период, тыс.руб.
1.	Цифровой осциллограф DS1074B	1	78	60	1,67	1,3	10	13
2.	Измерительный высоковольтный щуп P6015A	1	185	48	2,08	3,85	10	38,5
3	Токовое кольцо Pearson Current Monitors 8450	1	200	48	2,08	4,16	10	41,6
Итого:								93,1

### 5.3.2.3 Основная заработная плата

Статья учитывает заработную плату всех лиц, участвующих в выполнении проекта. Величина заработной платы зависит от трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Также здесь учитываются премии, выплачиваемые ежемесячно из фонда заработной платы в соответствии с Положением об оплате труда.

Для того, чтобы рассчитать основную заработную плату, необходимо знать среднедневную заработную плату работника и продолжительность работ:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (5.5)$$

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

$T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дней.

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

Среднедневную заработную плату определим по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (5.6)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней. Величина  $F_d$  определяется из таблицы 5.12, в которой представлен баланс рабочего времени.

Таблица 5.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель	Эксперт
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней:			
- выходные дни	104	104	104
- праздничные дни	15	15	15
Потери рабочего времени:			
- отпуск	28	28	28
- невыходы по болезни	0	7	0
Действительный годовой фонд рабочего времени ( $F_d$ , дней)	218	211	218

Месячный должностной оклад работника определяется в свою очередь по следующей формуле:

$$Z_m = Z_b \cdot k_p, \quad (5.7)$$

где  $Z_b$  – базовый оклад, руб;

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

Результаты расчета основной заработной платы сведены в таблицу 5.13. При расчете в качестве базового оклада  $Z_b$  берется сумма в 16 000 рублей для руководителя и эксперта – оклад в организации, где проводилась реализация проекта (Институт оптики атмосферы СО РАН). Оклад исполнителя зададим как 0,25 от оклада руководителя. Отпуск сотрудников Института составляет 28 календарных дней, следовательно, количество месяцев работы без отпуска в течение года составляет  $M=11,08$  месяца.

Таблица 5.13 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Зб, руб.	кр	Зм, руб	Здн, руб.	Тр, раб.дн	Зосн, руб.
Руководитель	16000	1,3	20800	1057,2	42	44394,0
Исполнитель	4000	1,3	5200	273,06	201	54885,1
Эксперт	16000	1,3	20800	1057,2	16	8457,6

#### 5.3.2.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Статья содержит выплаты, предусмотренные законодательством о труде. Это может быть оплата отпусков, вознаграждения и т.д. Дополнительная заработная плата определяется как 10-15% от основной заработной платы работников:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (5.8)$$

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

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

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

Таким образом, заработная плата будет равна:

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (5.9)$$

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

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

В таблице 5.14 представлены данные об основной и дополнительной заработной платы исполнителей проекта.

Таблица 5.14 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель	Эксперт
Основная зар. плата	44394,00	54885,10	8457,60
Дополнительная зар. плата (10 % от основной заработной платы)	443,94	548,85	84,57
Зар. плата исполнителя	44837,94	55433,95	8542,17
Итого по статье Сзп	108814,06		

### 5.3.2.5 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (5.10)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Коэффициент отчислений  $k_{\text{внеб}} = 27,1\%$  от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением НИР.

$$C_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot 108814,06 = 29488,61 \text{ руб}$$

### 5.3.2.6 Научные и производственные командировки

Данная статья расходов предусмотрена для оплаты командировок, связанных с выполнением проекта. На такие затраты выделяют порядка 10% от основной и дополнительной заработных плат:

$$C_{\text{ком}} = k_{\text{ком}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (5.11)$$

где  $k_{\text{ком}}$  – коэффициент затрат на командировочные расходы.

$$C_{\text{ком}} = 0,1 \cdot 108814,06 = 10881,4 \text{ руб}$$

### 5.3.2.7 Накладные расходы

Данная статья расходов включает затраты на хозяйственное обслуживание и управление, содержание, эксплуатацию, а также ремонт оборудования и инвентаря. Как правило на такие расходы отводят от 70 до 90 % от суммы основной заработной. Определим накладные расходы:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (5.12)$$

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

$$C_{\text{накл}} = 0,8 \cdot 108814,06 = 87054,25 \text{ руб}$$

На основании проведенных расчетов и полученных результатов вычисляется плановая себестоимость НИР (таблица 5.15).

Таблица 5.15 – Калькуляция плановой себестоимости НИР

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Сырье, материалы, покупные изделия	50419
Специальное оборудование для научных работ	93100
Заработная плата	108814,06
Отчисления на социальные нужды	29488,61
Научно-производственные командировки	10881,4
Накладные расходы	87054,25
Итого себестоимость НИР	379757,32

### 5.3.3 Реестр рисков проекта

Всегда следует учитывать возможные риски, которые могут повлечь за собой негативные последствия. Таблица 5.16 содержит информацию о таких рисках.

Таблица 5.16 – Реестр рисков

	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска*	Способы смягчения	Условия наступления
1.	Прекращение бюджетного финансирования	Необходимость снижения затрат на доработку проекта; Длительная отсрочка реализации проекта	2	3	Ср.	Поиск иных источников финансирования	Ухудшение экономической обстановки в стране
2.	Низкий спрос на конечную разработку	Неудача в коммерциализации	3	3	Выс.	Изменение технических характеристик устройства	Непрофессиональная проработка бизнес-плана; Развитие конкуренции

#### 5.4 Оценка сравнительной эффективности исследования

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}, \quad (5.13)$$

где  $I_{\Phi}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Результаты расчета интегрального показателя ресурсоэффективности приведены в форме таблицы 5.17.

Таблица 5.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий	Весовой коэффициент параметра	Разрабатываемый аппаратно-программный комплекс	Лазерный проекционный микроскоп	CAVILUX Smart
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,20	5	4	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	4	5
3. Помехоустойчивость	0,20	5	5	5
4. Энергосбережение	0,10	4	4	4
5. Надежность	0,15	3	3	4
6. Материалоемкость	0,20	5	3	3
ИТОГО	1	26	23	25

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p = 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 5 = 4,45$$

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

$$I_m^{a2} = \sum_{i=1}^n a_i b_i^{a2} = 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 = 4,15$$

Таким образом, опираясь на интегральный показатель ресурсоэффективности можем заключить, что разрабатываемый аппаратно-программный комплекс является более ресурсоэффективным и ресурсосберегающим по отношению к аналогам.

## Список публикаций студента

1. Васнев Н. А., Тригуб М. В. Система управления источника накачки CuBr-лазера [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 5-9 Октября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 1 - С. 255-257 – URL: <http://portal.tpu.ru/files/conferences/ctt/proceedings/2015/ctt-2015-1.pdf>
2. Ogorodnikov D. N., Trigub M. V., Torgaev S. N., Vasnev N. A., Evtushenko G. S. Modification and simulation of the power supply of a metal vapor laser // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016 - Vol. 124, Article number 012030. - p. 1-5
3. Васнев Н. А. Разработка модулятора для бистатического лазерного монитора // Ресурсоэффективным технологиям - энергию и энтузиазм молодых: сборник научных трудов VII Всероссийской конференции, Томск, 27-29 Апреля 2016. - Томск: Изд-во ТПУ, 2016 - С. 148-151
4. Васнев Н. А., Тригуб М. В. Система управления бистатическим лазерным монитором // Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии: материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых, Томск, 11-13 Мая 2016. - Томск: ИОА СО РАН, 2016 - С. 14-18
5. Trigub M. V., Ogorodnikov D. N., Vasnev N. A. Design of a Metal Vapor Laser Power Supply // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings, Moscow, May 12-14, 2016. - Москва: ВШЭ, 2016 - p. 1-4
6. Vasnev N. A., Trigub M. V., Evtushenko G. S. Control System for Bistatic Laser Monitor // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices: Proceedings, Novosibirsk, 30 June-4 July 2016. - Novosibirsk: NSTU, 2016 - p. 291-294
7. Васнев Н. А., Тригуб М. В. Система управления бистатическим лазерным монитором // Лазерно-информационные технологии в

- медицине, биологии и геоэкологии: труды XXIV Международной конференции, Новороссийск, 12-17 Сентября 2016. - Новороссийск: ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2016 - С. 41-42
8. Васнев Н. А., Тригуб М. В., Троицкий В. О., Димаки В. А., Власов В. В. Исследование процесса восстановления стационарного режима генерации CuBr-лазера // Оптика атмосферы и океана. - 2017 - Т. 30 - №. 3. - С. 259-263