

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

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование гашения и увеличения длительности импульса генерации CuBr-лазера

УДК 621.373.826:621.374

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ01	Карасев Николай Викторович		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов.
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
УК(У) -10	Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности
УК(У)-11	Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению
Общепрофессиональные компетенции	

Код компетенции	Наименование компетенции
ОПК(У)-1	Способен осуществлять поиск, обработку и анализ информации из различных источников и представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-2	Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач
ОПК(У)-3	Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин
ОПК(У)-4	Способен использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов объектов профессиональной деятельности
ОПК(У)-5	Способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин применительно к объектам профессиональной деятельности
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен осуществлять сбор и анализ данных по тематике исследований в области профессиональной деятельности
ПК(У)-2	Способен участвовать в проведении исследований
ПК(У)-3	Способен эксплуатировать и обслуживать высоковольтное оборудование научного и технологического назначения

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

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (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
4ТМ01	Карасев Николай Викторович

Тема работы:

Исследование гашения и увеличения длительности импульса генерации CuBr-лазера	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	20.06.2022
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования представляет из себя лазер на парах бромида меди, возбуждаемый двумя параллельными источниками питания. Цель работы – исследование эффективности гашения излучения CuBr лазера для трех оптических схем.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Введение</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Анализ механизма возникновения и способов управления генерацией <ol style="list-style-type: none"> 1.1. Механизм образования генерации CuBr лазера 1.2. Виды разрядов в активном объеме 1.3. Способы управления генерацией 1.4. Гашение генерации <p>Выводы к главе 1</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Объекты и методы исследования <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Описание экспериментальной установки

	2.2. Методика проведения эксперимента Выводы к главе 2 3. Описание экспериментов 3.1. Генерация 3.2. Однопроходное излучение 3.3. Сверхизлучение Выводы к главе 3 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 5. Социальная ответственность Заключение Список публикаций студента Список использованных источников Приложение А (справочное)
--	---

Перечень графического материала

(с точным указанием обязательных чертежей)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов, М.А., профессор, д.экон.н., ОСГН ШБИП НИ ТПУ
Социальная ответственность	Антоневич, О.А., доцент, к.биол.н. ООТД ШБИП НИ ТПУ
Раздел на иностранном языке	Кемерова, Н.С., старший преподаватель ОИЯ ШБИП НИ ТПУ

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Разделы на русском языке	Анализ механизма возникновения и способов управления генерацией Объекты и методы исследования Описание экспериментов Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Социальная ответственность
Разделы на английском языке	How does the radiation initiates

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

09.02.2022

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ01	Карасев Николай Викторович		

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

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Уровень образования магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2021 /2022 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:	20.06.2022
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.05.2022	Анализ механизма возникновения и способов управления генерацией	20
14.03.2022	Методика проведения эксперимента	20
14.03.2022	Описание экспериментов	30
30.05.2022	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
04.06.2022	Социальная ответственность	10
26.05.2022	Раздел ВКР, выполняемый на английском языке	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Жгун Дмитрий Владимирович	к. т. н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ01	Карасеву Николаю Викторовичу

Школа	ИШНПТ	Отделение	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Указаны ограничения и допущения проекта
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Районный коэффициент для города Томска 1,3 Отчисления во внебюджетные фонды 30 % Коэффициент, учитывающий накладные расходы: 0,2

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Разработка устава научно-технического проекта	Определение заинтересованных сторон и их ожиданий. Приведение ограничений и допущений проекта
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НТИ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение оценки экономической эффективности трех схмотехнических решений и сравнение их между собой.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. Сегментирование рынка 2. Оценка конкурентоспособности технических решений 3. Матрица SWOT 4. График проведения и бюджет НТИ 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ 6. Потенциальные риски
--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	04.03.2022
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов Магеррам Али оглы	д-р.экон.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ01	Карасев Николай Викторович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 4ТМ01		ФИО Карасев Николай Викторович	
Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

Гашение и увеличение длительности импульса генерации CuBr-лазера	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p>Объект исследования: лазер на парах бромида меди Область применения: визуально-оптическая диагностика Рабочая зона: лаборатория Размеры помещения: длина 7,8 м; ширина 6 м; высота 3,5 м Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Лазер на парах бромида меди (1 шт.); — Источники питания (2 шт); — Персональный компьютер (1 шт.); — Измеритель оптической мощности (1 шт.); — Четырехканальный осциллограф (1 шт.). <p>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: освещение объекта пучком лазерного излучения и последующая проекция изображения на экран.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при разработке объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Приказ от 15.12.2020 № 903н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок»</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования</p> <p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020);</p> <p>О статусе ученого и научного работника. Модель, модельный закон от 25.11.2008</p>
<p>2. Производственная безопасность при разработке:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Вредные факторы:</p> <p>Связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий, включая действие молнии и высоковольтного разряда в виде дуги, а также электрического разряда живых организмов переменного характера:</p> <ul style="list-style-type: none"> — электромагнитные поля радиочастотного диапазона; <p>Связанные со световой средой (некогерентными неионизирующими излучениями оптического диапазона электромагнитных полей) и характеризующиеся чрезмерными (аномальными относительно природных значений и спектра) характеристиками световой среды, затрудняющими безопасное ведение трудовой и производственной деятельности:</p>

	<p>— недостаток необходимого искусственного освещения;</p> <p>Связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего: температурой и относительной влажностью воздуха, скоростью движения (подвижностью) воздуха относительно тела работающего, а также с тепловым излучением окружающих поверхностей, зон горения, фронта пламени, солнечной инсоляции:</p> <p>— отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении.</p> <p>Опасные факторы:</p> <p>Связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий, включая действие молнии и высоковольтного разряда в виде дуги, а также электрического разряда живых организмов:</p> <p>— электрический ток;</p> <p>Связанные с неионизирующими излучениями:</p> <p>— лазерное излучение.</p> <p>Средства коллективной защиты: Экраны, щиты, корпуса оборудования, системы наблюдения; световоды</p> <p>Средства индивидуальной защиты: Очки, перчатки, халаты</p> <p>Будет производиться расчет искусственного освещения.</p>
3. Экологическая безопасность при разработке:	<p>Воздействие на селитебную зону: прямого воздействия не оказывает</p> <p>Воздействие на литосферу: нарушение плодородия почвы</p> <p>Воздействие на гидросферу: попадание тяжелых металлов и хлора в воду</p> <p>Воздействие на атмосферу: выброс угарного газа, оксидов азота, тяжелых металлов</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке:	<p>Возможные ЧС: выброс паров меди из ГРТ, пожар в результате короткого замыкания или воздействия мощного излучения</p> <p>Наиболее типичная ЧС: пожар в результате короткого замыкания</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
03.02.2022	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент,	Антоневич Ольга Алексеевна	канд.биол.наук.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ01	Карасев Николай Викторович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 116 с., 35 рис., 28 табл., 58 источников.

Ключевые слова: лазер на парах бромида меди, гашение генерации, импульс предыонизации, однопроходное излучение, сверхизлучение.

Объектом исследования является лазер на парах бромида меди. Цель работы – отследить зависимость мощности выходного излучения от энергии гасящего импульса для трех оптических схем.

В процессе исследования проводилась регистрация импульсов разрядного тока, разрядного напряжения и генерации для различных энергий импульсов гашения. Проводилось измерение мощности излучения с помощью прибора Ophir, ток с помощью датчика Pearson Current Monitor.

В результате исследования получены графики зависимости мощности выходного излучения от входного напряжения на гасящем источнике.

Степень внедрения: исследования проводились на лабораторной установке.

Область применения: лазерный монитор, лазерная спектроскопия, резка, медицина.

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Кинетика: процессы переноса энергии, импульса, заряда и вещества в различных физических системах (газах, плазме, жидкостях, твёрдых телах) и влияние на них внешних полей.

Инверсная населенность: неравновесное состояние квантовой системы, при котором населенность верхнего уровня энергии превышает населенность нижнего

Однопроходное излучение: вынужденное излучение, получаемое при снятии инверсной населенности при однократном прохождении лазерного излучения через активную среду.

Сверхизлучение: излучение, возникающее вследствие самопроизвольного зарождения и усиления корреляций первоначально независимых атомов с инверсной заселённостью верхнего энергетического уровня.

Оптический резонатор: совокупность нескольких отражающих элементов, формирующих стоячую световую волну и обеспечивающих положительную обратную связь для многократного прохождения лазерного излучения через активную среду.

Сокращения

В данной работе применены следующие сокращения:

ИОА СО РАН – Институт оптики атмосферы СО РАН

ЛКЭ – лаборатория квантовой электроники;

ЛПМ – лазер на парах меди;

ЛПГМ – лазер на парах галогенида меди;

ГРТ – газоразрядная трубка;

ЧСИ – частота следования импульсов.

Содержание

Введение	17
1. Анализ механизма возникновения и способов управления генерацией	19
1.1. Механизм образования генерации CuBr лазера	19
1.2. Виды разрядов в активном объеме	22
1.3. Способы управления генерацией	27
1.4. Гашение генерации	35
Выводы к главе 1	38
2. Объекты и методы исследования	39
2.1. Описание экспериментальной установки	39
2.2. Методика проведения эксперимента	41
Выводы к главе 2	42
3. Описание экспериментов	43
3.1. Генерация	43
3.2. Однопроходное излучение	44
3.3. Сверхизлучение	45
Выводы к главе 3	46
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	48
4.1. Предпроектный анализ	50
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	50
4.1.2. Анализ конкурентных технических решений	51
4.1.3. SWOT – анализ	52
4.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации	55
4.1.5. Методы коммерциализации научно-технического исследования	57
4.2. Инициация проекта	58
4.2.1. Цели и результаты проекта	58
4.2.2. Ограничения и допущения проекта	60
4.3. Планирование управления научно-техническим проектом	60
4.3.1. Иерархическая структура работ проекта	60

4.3.2. План проекта	61
4.3.3. Бюджет научного исследования	65
4.3.3.1. Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)	65
4.3.3.2. Специальное оборудование для экспериментальных работ	66
4.3.3.3. Основная заработная плата	67
4.3.3.4. Дополнительная заработная плата	68
4.3.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды	69
4.3.3.6. Накладные расходы.....	69
4.3.3.7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	69
4.3.3.8. Организационная структура проекта	70
4.3.3.9. План управления коммуникациями проекта	71
4.3.3.10. Реестр рисков проекта.....	72
4.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	73
Выводы по разделу.....	76
5. Социальная ответственность	78
Введение	78
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	79
5.2. Производственная безопасность	81
5.2.1. Факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий	81
5.2.2. Факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего	83
5.2.3. Факторы, связанные с неионизирующими излучениями	84

5.2.4. Факторы, связанные со световой средой (некогерентными неионизирующими излучениями оптического диапазона электромагнитных полей).....	85
5.3. Экологическая безопасность	87
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	89
Выводы по разделу.....	91
Заключение	92
Список публикаций студента	93
Список использованных источников	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А	101

Введение

Лазер на парах меди (ЛПМ), так же, как и лазер на парах галогенидов меди (ЛПГМ), в настоящее время активно используются в различных производственных процессах и исследованиях. Установки на их базе можно встретить как в промышленности (производство нанопорошков, лазерная резка) [1], так и в медицине (удаление родимых пятен) [2]. В последнее время развиваются системы визуально-оптической диагностики [3], а также рассматриваются перспективы применения подобных лазерных установок для передачи информации [4]. По характеристикам выходного излучения ЛПМ и ЛПГМ не имеют отличий, однако ЛПГМ требует меньшей температуры активного вещества, следовательно, упрощается инициация излучения. Особое распространение среди ЛПГМ получили лазеры на парах бромида меди, или CuBr лазеры.

Очевидно, что в ходе исследовательской работы или производственного процесса может возникнуть необходимость изменения конфигурации оптической системы, а также проведения каких-либо манипуляций с объектом, находящимся под действием лазерного излучения. Подобные мероприятия могут быть крайне опасными: оператор, в зависимости от мощности излучения, рискует получить повреждения органов зрения или термический ожог. Кроме того, для некоторых производственных процессов, например, микрообработка, требуется безынерционность. Поэтому возникает необходимость перевода лазера в т. н. «ждущий режим» (гашение генерации).

Гашение генерации необходимо производить оперативно, так же, как и возвращение лазера в режим генерации после проведения необходимых манипуляций. Без использования дополнительных технических приспособлений сделать это весьма затруднительно: простое отключение источника питания влечет за собой заплытие выходных окон газоразрядной трубки (ГРТ), поскольку не была уменьшена концентрация активного

вещества. Впоследствии запыление окон негативно скажется на качестве излучения. Кроме того, резкая коммутация может вывести из строя источник питания.

Концентрация активного вещества зависит от температуры его паров. Следовательно, для снижения концентрации необходимо снизить температуру. Этот процесс может занимать около двадцати минут. Столько же уходит на восстановление. Изучение различных способов управления генерацией позволяет подобрать оптимальное техническое решение и для эффективного гашения.

Целью данной работы является исследование эффективности гашения излучения CuVr лазера для трех оптических схем. В предыдущих работах рассматривалось стандартное излучение, полученное с помощью плоскопараллельного резонатора, в то время как эффективность гашения однопроходного излучения и сверхизлучение не рассматривалось. В этом и заключается научная новизна работы.

Исследуемый CuVr лазер разработан в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) СО РАН в лаборатории квантовой электроники (ЛКЭ).

1. Анализ механизма возникновения и способов управления генерацией.

1.1. Механизм образования генерации CuBr лазера

Прежде чем изучать способы управления генерацией необходимо рассмотреть механизм ее возникновения. Как и любые другие лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов, лазеры на парах меди (ЛПМ) и галогенидов меди (в частности, CuBr) обладают трехуровневой схемой накачки и работают в импульсно-периодическом режиме. Импульсный характер излучения связан с тем, что длительность импульса излучения ограничена временем жизни верхнего рабочего уровня [5].

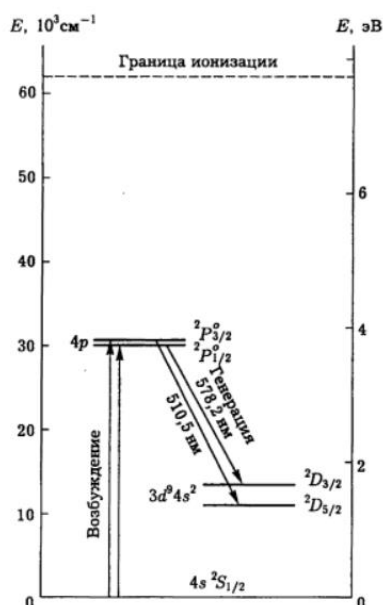


Рисунок 1 – Схема накачки атома меди [5]

Для эффективного заселения верхних рабочих уровней необходимо, чтобы электроны приобрели достаточную энергию (температуру). Поэтому в объеме ГРТ создается большое электрическое поле. Классический разряд в ГРТ – аperiодический аномально тлеющий. На рисунке 2 приведены типичные осциллограммы импульсов тока, напряжения и генерации.

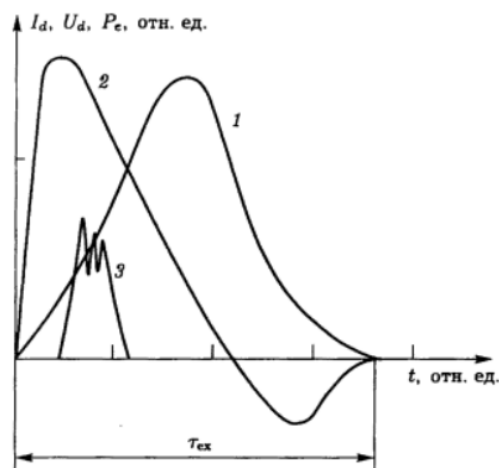


Рисунок 2 – Типичные импульсы разрядного тока (1), напряжения на электродах ГРТ(2) и генерации (3) во время импульса возбуждения активной среды лазеров на самоограниченных переходах [5].

На эффективность генерации влияют предимпульсные параметры: предимпульсная концентрация электронов (n_e), температура электронов (T_e) и заселение метастабильных уровней (N_m). Подробный анализ кинетики процессов в активном объеме ГРТ приведен в работе [6]. Авторами сделан вывод, что предимпульсная концентрация электронов увеличивает заселение метастабильных уровней, что негативно влияет на генерацию. Снизить влияние n_e можно внедрением в активный объем различных добавок.

Лазер, имеющий добавки, повышающие эффективность генерации, называется «лазером с модифицированной кинетикой». В качестве добавок применяют, в основном водородсодержащие. Их задача – повысить температуру активной среды (тем самым, увеличив концентрацию атомов меди), снизить концентрации метастабильных уровней и ускорить релаксацию атомов меди в основное состояние [7, 8]. Кроме того, водородсодержащие добавки позволяют создать задержку тока относительно напряжения. Это ведет к тому, что импульс тока начинается при большем значении напряжения, тем самым, увеличивая скорость роста температуры электронов.

Помимо водорода, в качестве добавки иногда внедряется цезий [7; 9]. Так же, как и водород, цезий способствует ускорению релаксации

метастабильных состояний атома меди за счет возбуждения резонансного уровня цезия [9]. Кроме того, такая добавка повышает мощность и КПД генерации.

Однако внедрение добавки требует соблюдение оптимального значения. Избыток может привести к довольно резкому падению интенсивности генерации. Поэтому управление мощностью генерации путем изменения концентрации добавки является нецелесообразным.

Для некоторых процессов необходимо использование ЛПМ с высокой частотой следования импульсов (ЧСИ). Однако на увеличение ЧСИ существуют определенные ограничения. Согласно [10], основное влияние на ЧСИ оказывает предимпульсная концентрация электронов, которая не только уменьшает инверсную населенность, но и сокращает время ее существования. Более того, в той же работе было отмечено, что наращивать ЧСИ можно до определенного критического уровня заселенности нижних лазерных уровней. Также из-за конечного времени разогрева электронов до определенной температуры имеет место заселение метастабильных уровней на фронте импульса возбуждения. Это подтверждает график из работы [6], приведенный на рисунке 3.

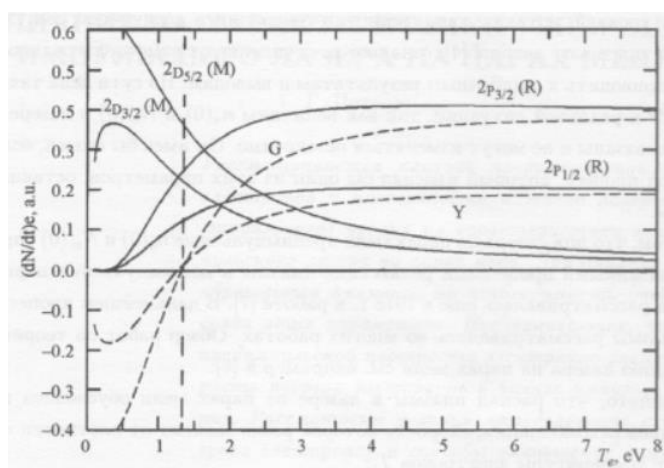


Рисунок 3 – Относительные скорости накачки лазерных уровней атома меди электронами с основного состояния атома как функция температуры электронов [6]

Исходя из данного рисунка и изложенных выше тезисов можно сделать вывод – необходимо увеличить скорость изменения температуры электронов. Наиболее эффективный способ достичь подобной цели – создание задержки импульса тока относительно импульса напряжения. Помимо введения водородсодержащих добавок, добиться этого можно использованием разрядов иного типа, отличного от аномально тлеющего, а также внедрением новых технических решений в источники питания

1.2. Виды разрядов в активном объеме

Как уже было сказано в разделе 1.1, основным источником накачки как для ЛПМ, так и для CuVg лазера является электрический разряд, зажигаемый в ГРТ. Изначально использовался тлеющий разряд. Однако данный вид разряда обладает низкой скоростью нарастания тока, поэтому в данный момент проводятся исследования по применению других видов разрядов для накачки лазера.

В работе [11] описаны перспективы использования емкостного разряда для накачки CuVg лазера. Свое название подобный разряд получил благодаря тому, что между электродами и ГРТ возникает емкостная связь. Сами же электроды вынесены наружу. Использование емкостного разряда требует изменения конструкции ГРТ, что представлено в [12]. На рисунке 4 показаны варианты конструкции ГРТ для накачки емкостным разрядом.

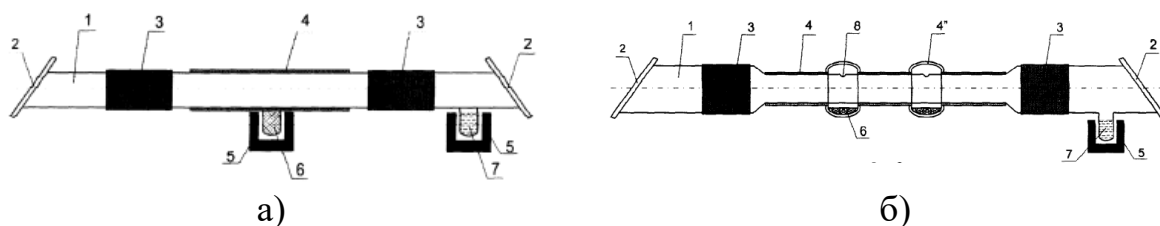


Рисунок 4 – Варианты конструкции ГРТ [12]

Емкостный разряд уже зарекомендовал себя при накачке газовых лазеров, в частности, CO₂ лазеров [13]. Эксперимент по накачке CuVg лазера емкостным разрядом впервые был проведен в [14]. Авторы данной работы отмечают относительную простоту повышения частоты следования

импульсов (ЧСИ) в качестве основного преимущества при использовании подобного способа накачки.

Однако высокие значения ЧСИ требуют некоторой модификации источников питания. В частности, использование коммутаторов, работающих на более высокой частоте, чем обычные тиратроны, частотный диапазон для которых ограничен 10-20 кГц. Обычно используют таситроны, однако возможно применение ламповых коммутаторы, как, например, в работе [15]. Авторы работы отметили, что, несмотря на меньшую мощность генерации, чем при использовании тиратронных коммутаторов, КПД установки выше, поскольку эта мощность достигается при пониженном энергокладе в разряд.

Более подробное исследование частотных и энергетических характеристик продольного емкостного разряда приведено в работе [16]. В данном исследовании был обнаружен ряд интересных эффектов. Во-первых, установлена причина возможности понижения энергоклада в разряд. Достигается это благодаря быстрому вводу энергии, а значит, более эффективному заселению верхнего рабочего уровня. Во-вторых, отмечено, что наличие водородсодержащей добавки приводит к росту мощности излучения при сохранении длительности импульса. При классической накачке тлеющим разрядом эффект прямо противоположный: практически неизменная амплитуда при увеличенной длительности импульса излучения. Однако при накачке емкостным разрядом, как отмечено авторами, эффект достигается только при диаметре ГРТ более 2 см.

Помимо всего прочего, авторами работы [16] отмечено, что использование емкостного разряда позволяет реализовать новый способ накачки: вовсе без использования внешних накопительных емкостей. В данной схеме роль емкостного накопителя энергии играет собственная емкость ГРТ. Кроме того, в данной схеме отсутствует шунтирующая индуктивность. Таким образом схема без внешних накопительных емкостей не только проще с конструктивной точки зрения, но и обладает меньшей

индуктивностью, что увеличивает скорость нарастания тока и улучшает характеристики генерации. Общая схема накачки без внешних накопительных емкостей и полученные осциллограммы тока, напряжения и генерации приведены на рисунке 5.

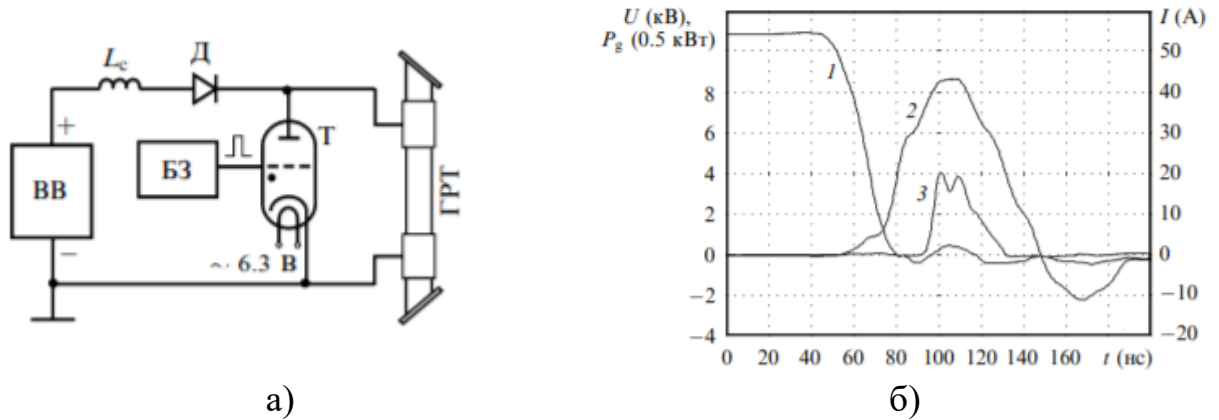


Рисунок 5 – а) накачки без внешних накопительных емкостей (ВВ – высоковольтный выпрямитель; БЗ – блок заряда; Т – таситрон Д – зарядный диод; L_c – зарядный дроссель); б) осциллограммы напряжения (1), тока (2) и генерации (3) для схемы без внешних накопительных емкостей [16]

Несмотря на возможность получения высоких ЧСИ, высокий КПД, а также относительную простоту конструкции ГРТ и минимальные внесения изменений в источник питания, использование емкостного разряда обладает определенными недостатками. Опыт эксплуатации показывает, что остро стоит вопрос обеспечения помехозащищенности как систем управления и синхронизации (при наличии), так и измерительной аппаратуры. Кроме того, сами электроды расположены снаружи ГРТ, что потребует от оператора определенной осторожности.

Помимо емкостного разряда, рассматриваются перспективы использования импульсно-периодического индукционного разряда. Авторы работы [17] одними из первых применили индукционный разряд для получения генерации на парах бромида меди. Несмотря на удачный эксперимент, авторы отмечают сложность в зажигании индукционного разряда. В частности, сложность в сообщении электронам энергии в несколько

эВ, поскольку поле замыкается вокруг оси разряда [17]. Поэтому, помимо чисто индукционного разряда, авторами [17] был предложен комбинированный разряд: зажигание индукционного разряда одновременно с емкостным. Предложенные варианты схемы приведены на рисунке 6.

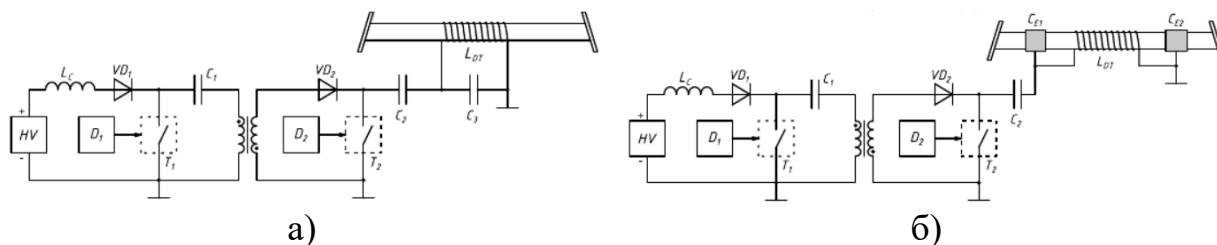


Рисунок 6 – Варианты схемы экспериментальной установки: а) для инициации индукционного разряда; б) для инициации комбинированного разряда [17]

В дальнейшем проводилось численное моделирование процесса возбуждения CuVr лазера индукционным разрядом, результаты которого приведены в работе [18]. В [18] авторы, основываясь на экспериментальных данных, попытались создать условия эффективной генерации CuVr лазера при зажигании индукционного разряда. В ходе исследования были отмечены недостатки. Помимо уже указанной сложности в сообщении энергии электронам, из-за чего приходится повышать напряжение заряда рабочей емкости до 30 кВ, проблемой так же является низкий коэффициент связи между индуктором и плазмой газового разряда. Решение, предложенное авторами, заключается в уменьшении диаметра индуктора, однако в таком случае придется уменьшить толщину теплоизоляционного слоя на ГРТ. Тем не менее, помимо перечисленных недостатков, у накачки индукционным разрядом имеется несколько весьма существенных преимуществ. Одно из них – быстрый ввод энергии, благодаря которому предимпульсная плотность электронов изменяется незначительно и довольно плавно. Этот эффект, согласно [6], снижает предимпульсную заселенность метастабильных уровней, что существенно повышает выходную мощность излучения и КПД генерации. Кроме того, сама форма импульсов тока и напряжения индукционного разряда (рисунок 7) представляет интерес.

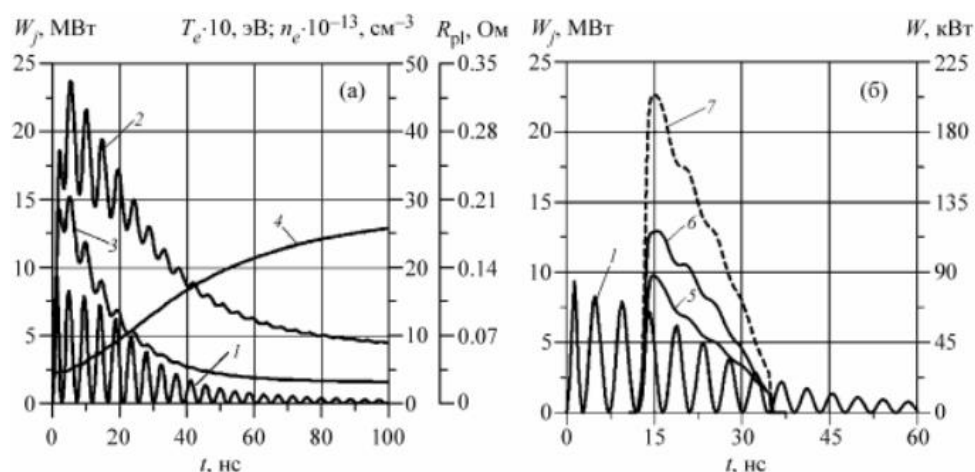


Рисунок 7 – зависимость от времени параметров: а) импульса возбуждения: 1 – мощности Джоулева тепловыделения в плазме (W_j); 2 – температуры электронов (T_e); 3 – сопротивления плазмы (R_{pl}); 4 – предимпульсной плотности электронов; б) мощности излучения: 5 – желтой линии; 6 – зеленой линии; 7 – суммарная мощность обеих линий [18]

В работе [19], посвященной изучению влияния характеристик разряда на генерацию, был открыт ряд достаточно интересных эффектов, которые открывают широкие перспективы для управления мощностью и длительностью выходного излучения. Более подробно о системах управления лазерным излучением изложено в разделе 1.3.

Использование различных видов разрядов преследует несколько целей. Во-первых, повышение частоты следования импульсов (ЧСИ), что является необходимостью для некоторых производственных процессов. Во-вторых, увеличить срок жизни электродов и, как следствие, не позволить материалу электродов проникать в активный объем. Особенно остро проблема износа электродов стоит для лазеров с модифицированной кинетикой ввиду более химически агрессивной среды. Также проводятся поиски снижения рассеивания энергии на электродах. В работе [20] было установлено, что общие потери энергии на электродах могут достигать от 10 до 30 % относительно энергии, запасенной в накопительном конденсаторе.

Повышения КПД генерации так же можно добиться путем изменения способа накачки.

Однако управление энергией генерации в данном случае подразумевает изменение характеристик импульса генерации, что может привести к негативному влиянию на характеристики активного вещества, в частности, на концентрацию атомов меди в CuVr лазере. Поэтому для управления, как правило, применяются дополнительные технические средства.

1.3. Способы управления генерацией

Основная задача управления импульсом генерации заключается в изменении либо его амплитуды, либо длительности. Как уже было показано в разделах 1.1 и 1.2, обеспечить условия эффективной генерации можно внедрением водородсодержащей добавки или использованием альтернативных способов накачки. В данном разделе будут рассматриваться схемотехнические решения.

Повысить эффективность генерации также можно, введя в разрядный контур обострительные емкости. Такой способ управления применяется достаточно давно и является относительно простым. Поэтому и существует множество вариантов схем.

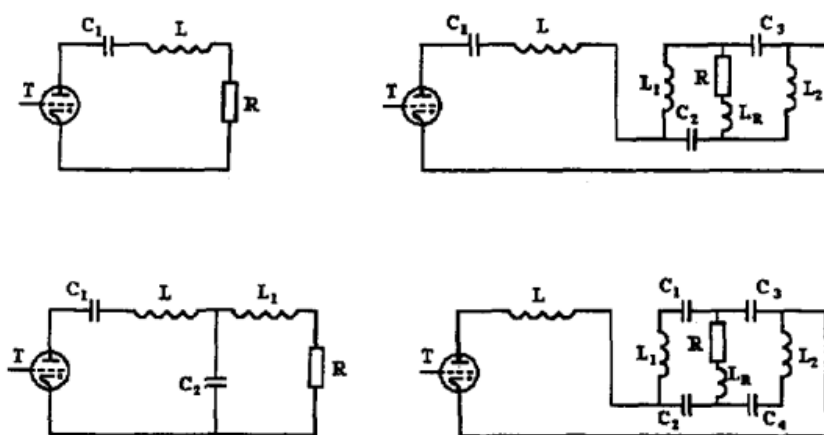


Рисунок 8 – Варианты конструкции контура возбуждения [21]

Наиболее эффективна схема с т.н. сложным контуром возбуждения [22]. Подобным образом, как отмечается в работе [22], возможно повысить

энергетический потенциал лазера при повышенной ЧСИ за счет увеличения частоты свободных колебаний в контуре. В качестве примера схем со сложным контуром возбуждения можно изучить в работе [23]. В работе [21] проведено сравнение схем без обострительной емкости, с обострительной емкостью, а также с различными вариантами сложных контуров. Таким образом, было экспериментально показано повышение мощности лазерного излучения и КПД.

Однако данный способ не годится для оперативного управления генерацией. Повышение мощности генерации и КПД достигается за счет изменения значения емкостей, а также схемы их подключения. Это требует отключения установки, проведения соответствующих манипуляций и последующего включения. Данный процесс весьма небыстрый, поэтому обострительные емкости применяются исключительно как дополнительное средство улучшения качества пучка.

Один из наиболее эффективных способов организации управления CuBr лазера – подача сдвоенных импульсов на ГРТ. Первый импульс – диссоциирующий или импульс предыонизации (диссоциирует молекулы CuBr), а второй производит возбуждение атома меди. Последний также называют либо основным, либо генерирующим. При накачке сдвоенными импульсами важна энергия диссоциирующего импульса. Она должна быть достаточной для наработки активного вещества. Причем, чем меньше ЧСИ, тем больше должна быть эта энергия. Данный тезис подтверждается работой [24], в которой реализован режим одиночных импульсов генерации. Свое название этот режим работы CuBr лазера получил из-за низкой ЧСИ (50-100 Гц). Характерной чертой является накачка сдвоенными импульсами, поскольку получить генерацию одиночным импульсом при столь низкой частоте невозможно. Осциллограмма на рисунке 9 показывает расположение импульса генерации относительно диссоциирующего и основного импульсов

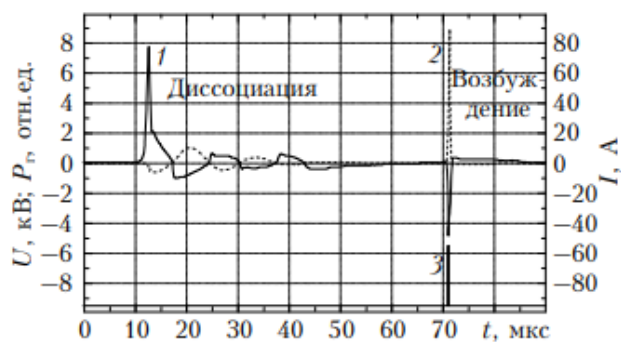


Рисунок 9 – Импульсы напряжения (1); тока (2) и генерации (3) в режиме одиночных импульсов генерации [24]

Хорошо видно, что амплитуда напряжения диссоциирующего импульса при накачке частотой 50 Гц практически равна амплитуде импульса возбуждения (около 8 кВ).

Регулирование энергии импульса генерации проводится изменением задержки между диссоциирующим и основным импульсом, что продемонстрировано на рисунке 10.

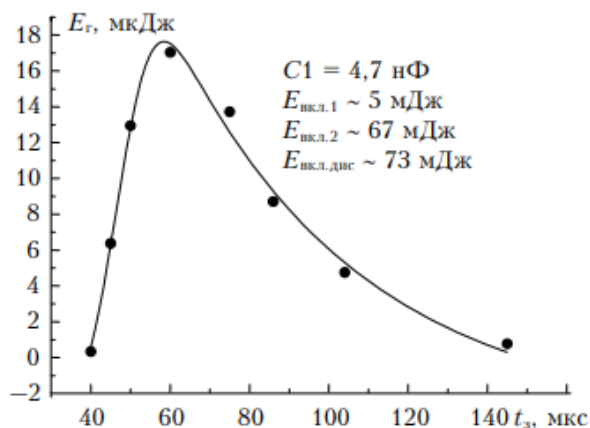


Рисунок 10 – Зависимость энергии импульса генерации от задержки между основным и диссоциирующим импульсами [24]

Применение импульса предыонизации для управления мощностью генерации возможно и на стандартных ЧСИ CuVr лазера, что подтверждает работа [25]. Так же, как и в приведенной выше работе, регулирование мощности излучения производилось при помощи изменения времени

задержки между импульсами. Кроме того, изменялась энергия импульса предыонизации.

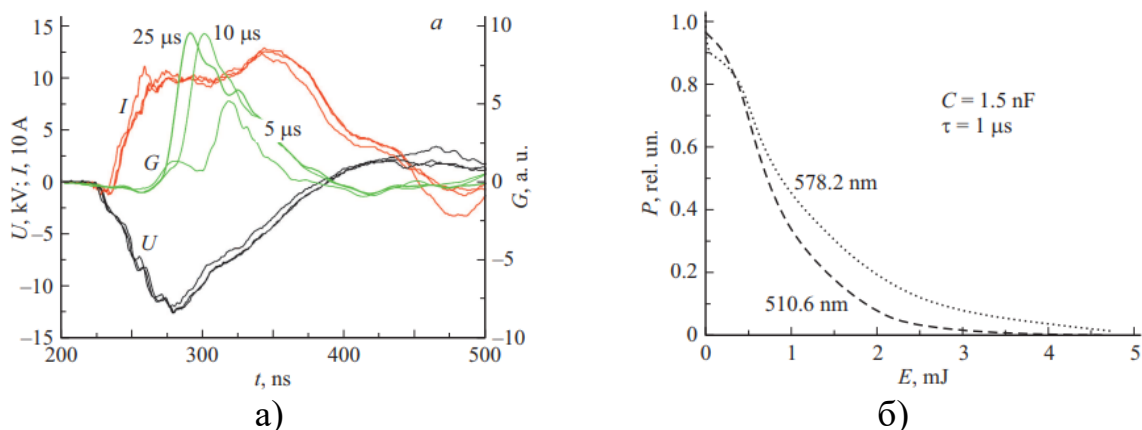


Рисунок 11 – а) Осциллограммы импульсов (а) напряжения (U), тока (I) и генерации (G); б) Зависимость мощности излучения от энергии импульса гашения при задержке 1 мкс [25]

Из рисунка видно, что данная установка позволяет выделить желтую линию излучения при погашенной зеленой, что весьма удобно при некоторых исследовательских мероприятиях.

Широкое применение нашли установки на базе CuVr-лазера системы генератор-усилитель. Чтобы не создавать дополнительных источников питания и не усложнять конструкцию, создатели патента [26] предложили способ управления выходным импульсом генерации путем изменения сдвига между импульсом генератора и импульсом усилителя. Кроме того, был проведен эксперимент, призванный изучить эффективность подобного способа возбуждения [27]. В результате, авторами были выделены четыре «зоны», в зависимости от расположения импульса генератора относительно импульса усилителя.

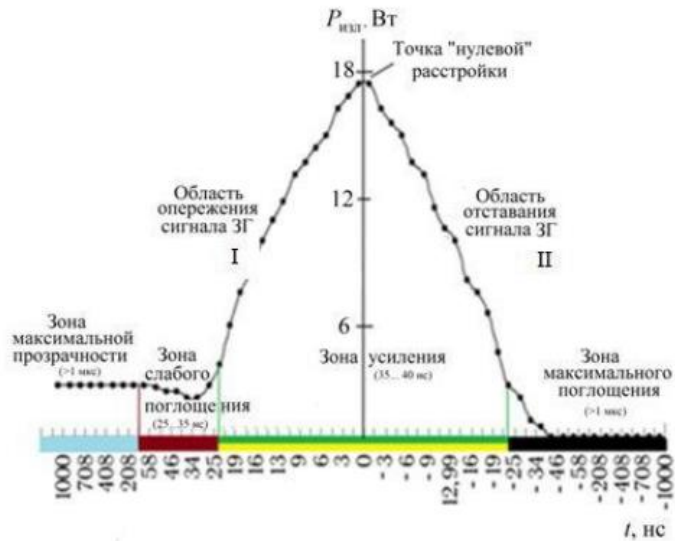
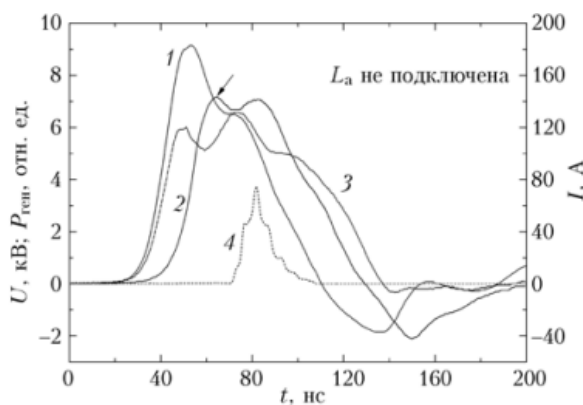
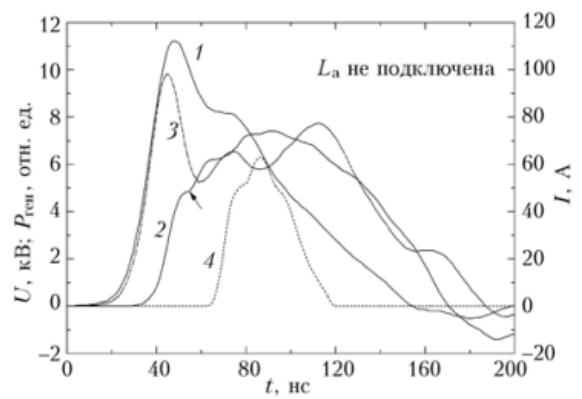


Рисунок 12 – Зависимость выходной средней мощности излучения от временной расстройки светового импульса излучения генератора относительно импульса усилителя (I – импульс генератора опережает импульс усилителя; II - отстает) [27]

Возможность изменения индуктивности разрядного контура для регулирования амплитуды импульса генерации показана в работе [28]. Несмотря на то, что изначально целью авторов данной работы была изучить и минимизировать влияние индуктивности источника питания, изменение скорости нарастания тока путем введения в схему дополнительной индуктивности как способа управления генерацией имеет место. Эксперименты проводились на CuVg лазере как при наличии, так и при отсутствии водородсодержащей добавки.



а)



б)

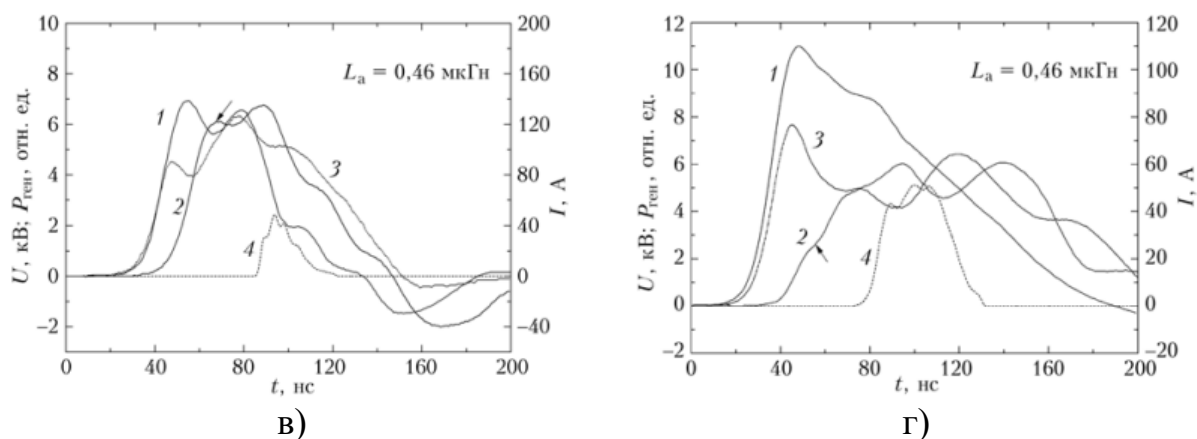


Рисунок 13 – Осциллограммы импульсов напряжения (1); тока на ГРТ (2); тока через тиратрон (3); генерации (4): а);в) без водородсодержащей добавки; б);г) при наличии водородсодержащей добавки [28]

Как отмечают авторы, введение водородсодержащей добавки позволяет сделать лазер более устойчивым к влиянию индуктивности источника питания. Это подтверждают осциллограммы на рисунке 13. Таким образом, данный способ управления не столь эффективен для лазеров с модифицированной кинетикой.

Отдельно следует отметить такой способ управления генерацией как приложение внешнего магнитного поля. В разделе 1.2 проводилось описание накачки продольным индукционным разрядом. Принцип остался тот же: намотка индуктора поверх ГРТ, однако в данном случае индуктор является лишь источником магнитного поля. Накачка же осуществляется классическим образом, с использованием двух электродов, внутренних или внешних.

Влияние внешнего магнитного поля на лазерное излучение было исследовано в работе [29]. Для эффективного управления генерацией авторами работы были использованы два источника питания (один – производит накачку лазера, другой – обеспечивает питание индуктора), а также разработана система синхронизации. Новизна работы заключается в использовании для управления импульсного магнитного поля, а не постоянного, исследование которого проводилось в более ранней работе [30].

В ходе экспериментов изменялись параметры времени задержки между импульсом управления и генерации и величина магнитной индукции (рисунок 14).

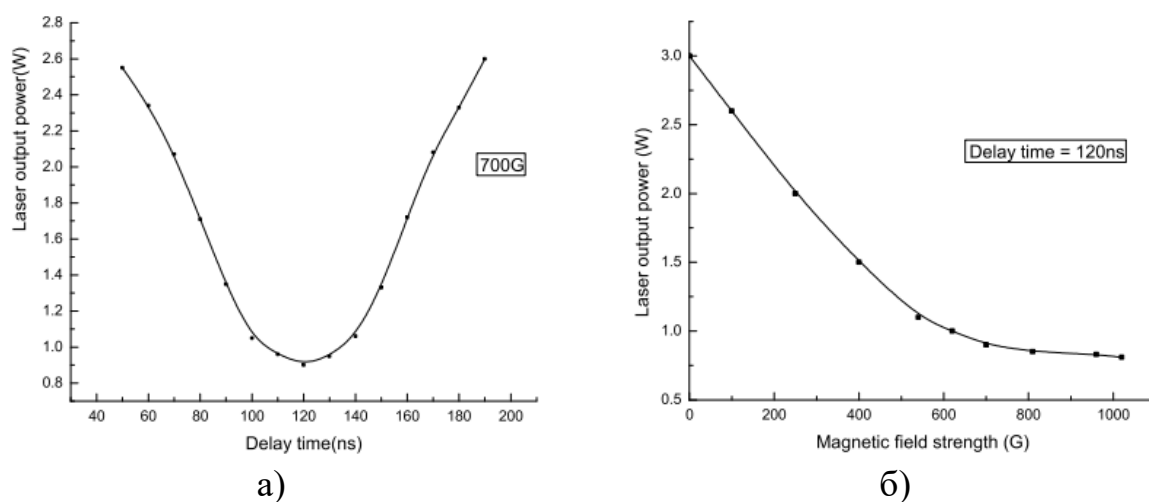


Рисунок 14 – а) выходная мощность генерации в зависимости от времени задержки при постоянном значении магнитной индукции; б) выходная мощность генерации в зависимости от значения магнитной индукции при постоянном времени задержки [29]

Также следует отметить благотворное влияние внешнего магнитного поля на распределение мощности по диаметру пучка [31].

Широкие перспективы управления при помощи индукционного разряда открывает эксперимент, проведенный в работе [19]. В качестве источника накачки используется цуг с ЧСИ импульсов 10-70 МГц, изменяя которую можно воздействовать на мощность и форму выходного излучения. Отмечается, что при определенном значении ЧСИ мощность генерации может приобрести максимальное значение, однако форма сигнала при этом искажается. Более того, при определенной частоте (в данной работе около 10 МГц) импульс генерации распадается на два. Связано это, как отмечают авторы, с количеством пульсаций температуры электронов.

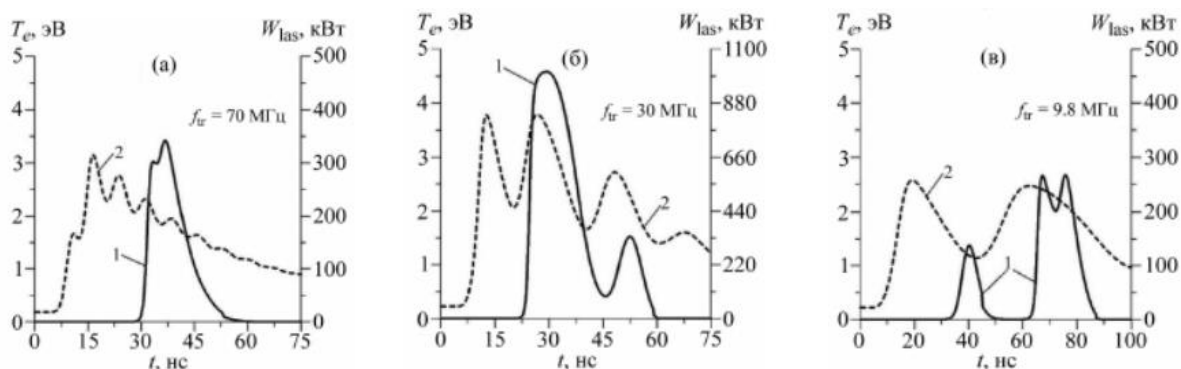


Рисунок 15 – Импульсы генерации (1) и температуры электронов (2) для разных ЧСИ в цуге [19]

Далее необходимо осветить вопрос регулирования длительности импульса генерации. Это может быть крайне полезно при использовании CuVr лазера в активных оптических системах, в частности, для визуализации удаленных объектов. Максимальная достигнутая на сегодняшний момент длительность импульса генерации составляет 320 нс [32]. Однако в данной работе CuVr лазер работал на низких частотах (2-4 кГц). Кроме того, использовался принцип ограничения тока.

Исследования по увеличению длительности импульса генерации проводились также в работах [33; 34]. Основная цель работ – отследить влияние количества импульсов в цуге, времени задержки между цугом импульсов (исполняющего роль импульсов диссоциации) и импульсом генерации, а также водородсодержащей добавки на длительность импульса генерации. Помимо этого, был реализован принцип управления длительностью импульса, при чем, на типичной рабочей ЧСИ для CuVr лазера (10 кГц).

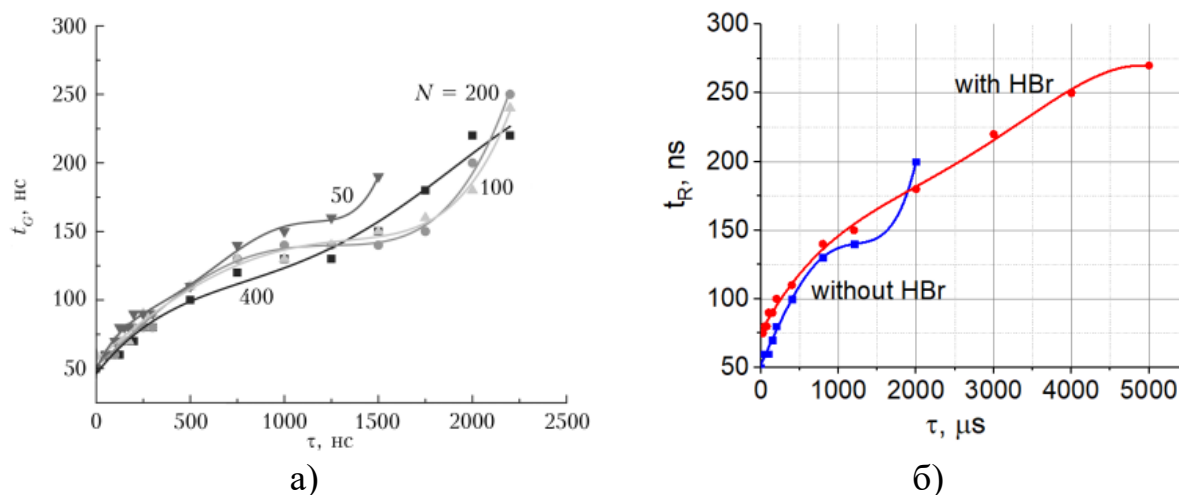


Рисунок 16 – а) зависимость длительности импульса генерации от числа импульсов в цуге [33]; б) сравнение длительности импульса генерации при наличии и отсутствии водородсодержащей добавки [34]

Из рисунка видно, что использование водородсодержащей добавки позволяет расширить диапазон возможных задержки между импульсами. Ограничения связаны с самим импульсом генерации, который заметно искажается, и мощностью генерации. Несмотря на сложность схемы, которая состояла из трех источников питания, она позволяет реализовать оперативное управление генерацией.

1.4. Гашение генерации

Под гашением генерации подразумевается перевод лазера в ждущий режим. Это означает, что лазер некоторое время не должен испускать излучения. Принцип гашения генерации заключается в заселении метастабильного уровня и последующей его релаксации для восстановления генерации. Более подробное описание приведено в работе [10].

Однако существует ряд сложностей, с которыми придется столкнуться при проектировании подобных систем. Основной критерий – эффективное подавление генерации. Также после вывода лазера из ждущего режима генерация должна сохранять свои параметры (мощность и длительность импульса). Наконец, желательна простота конструкции установки.

В работе [35] проведено сравнение эффективности гашения генерации с помощью цуга импульсов и дополнительного импульса. Возбуждение CuBr лазера цугом импульсов широко распространено. Кроме того, за время паузы между цугами лазер может перейти в ждущий режим. Анализ подобной возможности приведен в работе [36]. Проводился поиск подходящего времени между цугами. В ходе исследования выяснилось, что при длительной паузе происходит увеличение числа молекул CuBr, следовательно, требуется больше энергии для диссоциации активного вещества. Соответственно, такой способ управления может быть применен для ЛПМ, в котором диссоциация активного вещества не требуется.

Кроме того, как отмечается авторами [35], возобновление накачки после перерыва характеризуется переходным процессом с нелинейной зависимостью энергии импульсов возбуждения. Также, как отмечено в [37], многие лазеры работают в режиме саморазогрева, т.е. энергия разряда тратится в том числе и на поддержание рабочей температуры активного вещества. Авторы данной работы отмечают, что длительный перерыв серьезно замедляет выход установки в рабочий режим. Поэтому большее распространение получила установка, использующая дополнительный импульс.

Одна из первых систем управления для лазеров на самоограниченных переходах была описана в [38]. В дальнейшем, конструкция совершенствовалась [39; 40], однако логика работы осталась прежней. Имеются два источника, один из которых формирует импульс диссоциации, а другой – импульс накачки. Тем не менее, встречаются и установки, имеющие один источник питания, как правило, использующие полупроводниковые коммутаторы. В качестве примера подобной установки можно привести работу [4]. В данной работе был использован полупроводниковый коммутатор, на основе IGBT-транзисторов, на затвор которых подавался двоякий управляющий сигнал. Управление амплитудой импульса

генерации осуществлялось за счет изменения амплитуды напряжения гасящего импульса. Осциллограммы, полученные в ходе эксперимента, приведены на рисунке 17.

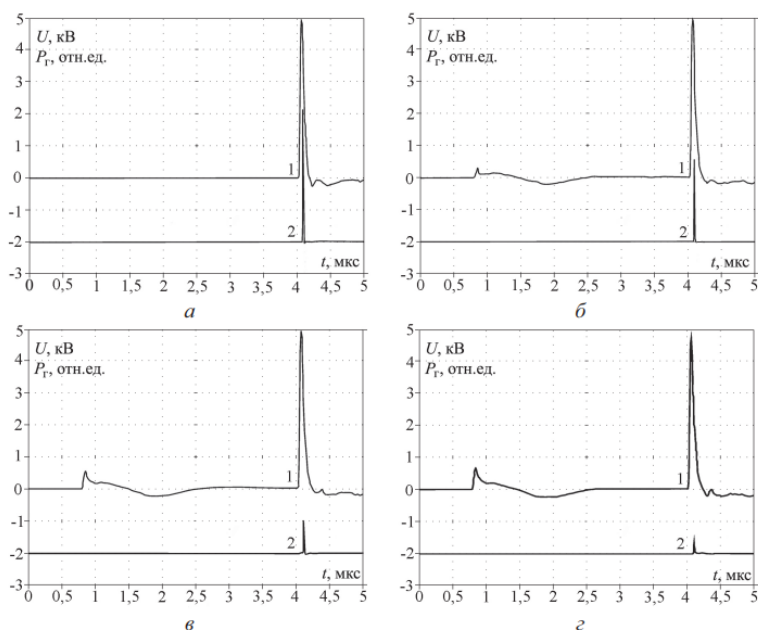


Рисунок 17 – Осциллограммы импульсов: 1 – напряжения на ГРТ; 2 – генерации для различных напряжений гасящего импульса [4]

Однако сами авторы отмечают, что использовать полупроводниковые коммутаторы целесообразно только для ГРТ малого объема. Связано это, прежде всего, со стоимостью необходимых комплектующих. Для ГРТ большого объема необходим дополнительный источник питания, что подтверждает тезис, выдвинутый в [38].

В уже упомянутой в разделе 1.3 работе [25] было показано, что в определенном диапазоне времен задержки импульс диссоциации может выступать в роли гасящего. Регулировочная характеристика представлена на рисунке 18.

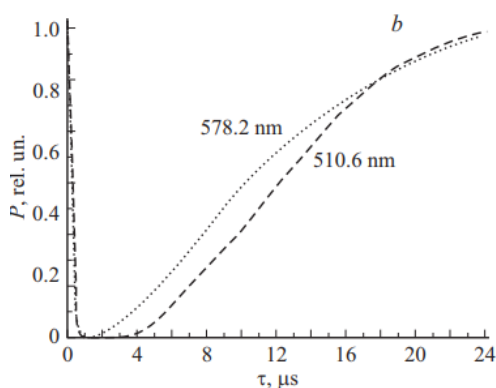


Рисунок 18 – Регулировочная характеристика [25]

Хорошо видно, что оптимальное для гашения время задержки при постоянной энергии гасящего импульса лежит в пределах 1-2 мкс.

Выводы к главе 1

На эффективность генерации влияют предимпульсные параметры, в частности, предимпульсная плотность электронов и скорость изменения их температуры. Наилучшие параметры излучения достигаются благодаря быстрому заселению верхних рабочих уровней. Для достижения этой цели применяются разные способы: как введение добавок в активный объем ГРТ, так и изменение способа возбуждения активной среды, а также внедрение схемотехнических решений.

Среди множества способов управления энергией выходного излучения вплоть до полного подавления была выбрана схема с дополнительным источником питания. Несмотря на сложность реализации, такая схема является универсальной. Более того, в зависимости от времени задержки и ориентации относительно импульса генерации, возможно как усилить, так и ослабить интенсивность излучения.

2. Объекты и методы исследования

2.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка имеет вид, схожий с приведенной в [25]. Так же имеются два источника: генерирующего и гасящего. Генерирующий источник предназначен для формирования импульса накачки. Гасящий источник предназначен для гашения генерации. Схема экспериментальной установки изображена на рисунке 19.

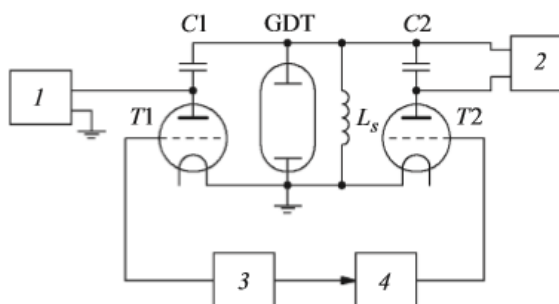


Рисунок 19 – Схема экспериментальной установки: 1 – источник генерации; 2 – источник гашения; T1, T2 – тиратроны; C1, C2 – накопительные емкости; GDT – ГРТ; 3 – система управления; 4 – линия задержки [25]

Логика работы источников заключается в следующем: сперва на ГРТ подается цуг с фиксированным значением импульсов. Далее с определенной задержкой подается гасящий импульс. Время задержки (τ) устанавливается экспериментально. Логика работы источников для наглядности показана на рисунке 20.

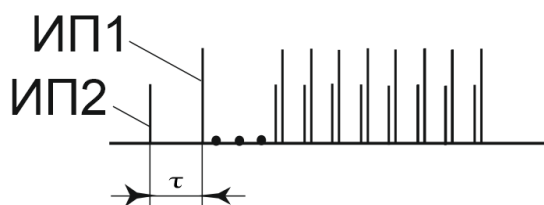


Рисунок 20 – Логика работы источников (ИП1 – основной источник питания; ИП2 – гасящий источник питания; τ – время задержки)

Источники питания выполнены по одной топологии. В их основу положен импульсный разряд рабочей емкости на ГРТ, описанный в [41]. При проектировании подобных источников авторы работы преследовали конкретную цель – увеличение срока службы газонаполненного коммутатора (в данном случае, тиратрона). Использование традиционных источников питания (например, схема Блюмляйна) имеет серьезный недостаток: электроды коммутатора постоянно находятся под высоким напряжением, из-за чего возникает эрозия. Чтобы этого избежать, необходим период релаксации газового промежутка. Поэтому авторами работы был спроектирован источник питания на базе инвертора. И гасящий, и генерирующий источники имеют одинаковую топологию. Обострительные емкости отсутствуют. Схема источников показана на рисунке 21.

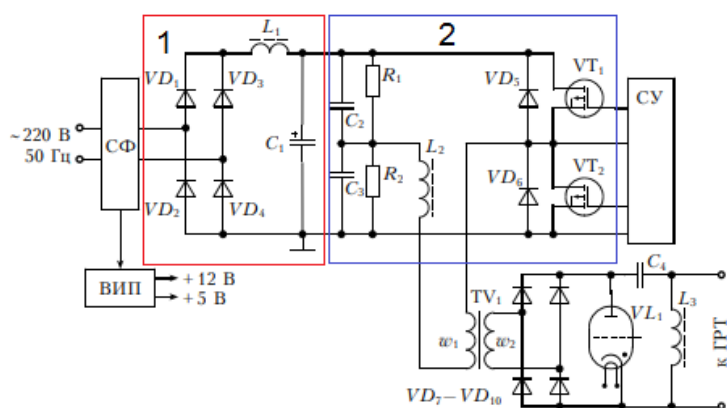


Рисунок 21 – Функциональная схема источника питания [41]: 1 – Мостовая схема выпрямления; 2 – Полумостовой инвертор; TV1 – Высоковольтный трансформатор; СУ – Схема управления; С4 – Емкостной накопитель энергии; СФ – сетевой фильтр

Поскольку установка состоит из двух источников, а изменяемым параметром является время задержки, необходимо синхронизировать работу источников. Для этого используется система управления и синхронизации, собранная на основе микроконтроллера AVR ATМega8. Схема системы управления и синхронизации приведена на рисунке 22.

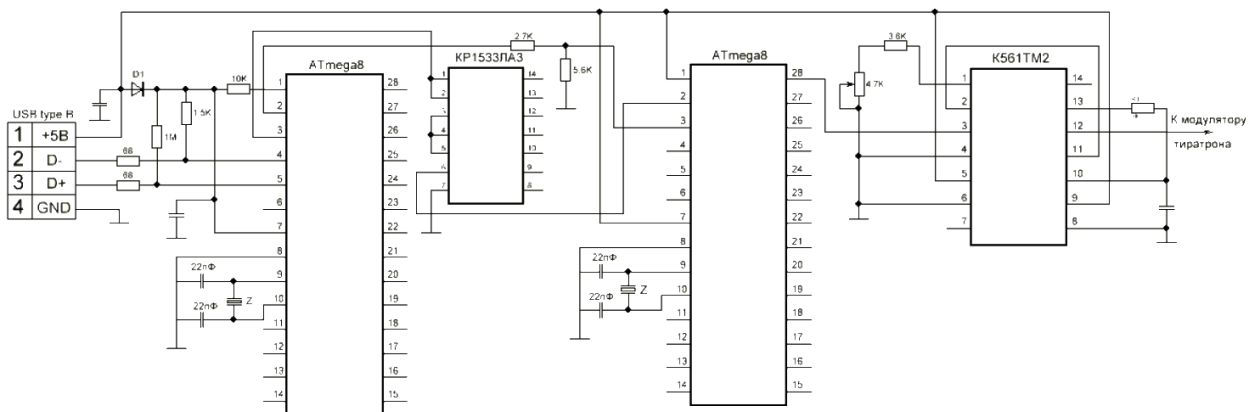


Рисунок 22 – Схема системы управления

Конструкция ГРТ является «классической». Имеются внутренние электроды и подогреваемые снаружи контейнеры с активным веществом. Длина активной зоны ГРТ – 90 см, диаметр – 5 см (активный объем). В качестве буферного газа используется неон. Давление – 30 Торр. Конструкция представлена на рисунке.

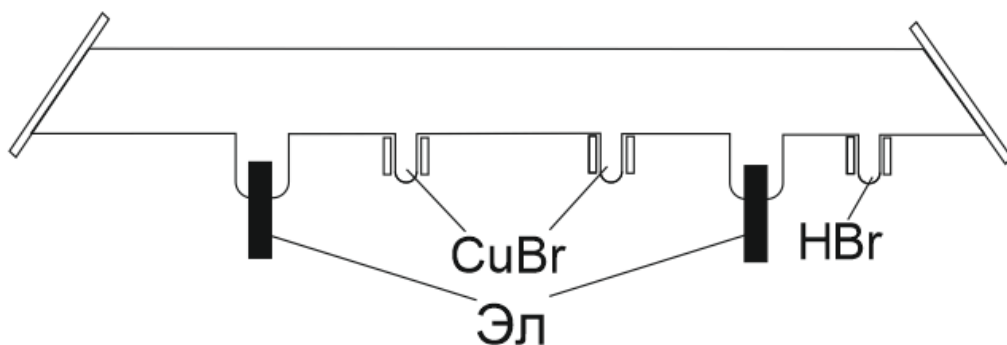


Рисунок 23 – Газоразрядная трубка: Эл – электроды; CuBr – контейнеры с активным веществом; HBr – контейнер с водородсодержащей добавкой

2.2. Методика проведения эксперимента

Целью данной работы является отслеживание изменения выходной мощности лазерного излучения от напряжения, подаваемого на вход гасящего источника.

Параметры установки:

— Рабочее напряжение 14 кВ (Входное напряжение $U_{\text{вх}} = 200 \text{ В}$);

- Частота следования импульсов 10 кГц;
- Время задержки между генерирующим и гасящим импульсом $\tau = 170$ нс;
- Температура стенок ГРТ $T = 860$ °С;
- Температура активного вещества $T = 480$ °С;

Внедрение водородсодержащей добавки в ГРТ не осуществлялось.

Фиксируемые параметры:

- напряжение разряда, U , кВ;
- ток разряда, I , А;
- параметры генерации, G , о.е.;
- средняя мощность генерации, P , мВт.

Мощность генерации фиксировалась с помощью измерителя оптической мощности Ophir. Напряжение разряда, ток разряда и параметры генерации фиксировались с помощью осциллографа LeCroy. Осциллограммы впоследствии подвергались обработке с помощью программного пакета Origin 2018.

Выводы к главе 2

Работа представляет из себя продолжение экспериментов, проведенных в [25; 33], однако большее внимание уделено гасящему источнику. Если раньше его целью было просто погасить в определенное время генерацию для удобства измерения, то сейчас ставится вопрос о влиянии напряжения, выдаваемого гасящим источником, на мощность генерации.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Тема: «Гашение и увеличение длительности импульса генерации CuVr-лазера»

Краткое описание:

Благодаря относительно высокому КПД и высокой однородности излучения лазер на парах бромида меди (CuVr лазер) является универсальной базой для создания установок, применимых как в промышленности (для лазерной резки и производства нанопорошков), так и в медицине (удаление родимых пятен). В исследовательских работах широкие перспективы открывает визуализация удаленных объектов, экранированных мощной фоновой засветкой. Подобные установки так же возможно реализовать на базе CuVr лазера.

Однако по-прежнему стоит вопрос об организации оперативного управления мощностью выходного излучения вплоть до полного его подавления (так называемый «ждущий режим»). Существует множество вариантов конструкции системы управления, однако наиболее распространенными являются два: с помощью цуга импульсов или с помощью дополнительного импульса. Последний требует дополнительный источник питания, однако позволяет более эффективно управлять мощностью генерации и сколь угодно долго поддерживать систему в ждущем режиме. Также можно использовать комбинацию, в которой в качестве дополнительного импульса используется цуг. Кроме того, можно внедрить водородсодержащую добавку в активный объем лазера для улучшения характеристик выходного излучения.

Поскольку проект постепенно внедряется в производство, необходимо определить не только потенциальных потребителей результатов исследования, но и определить наиболее эффективный вариант исполнения с

точки зрения затрат на производство и удовлетворения необходимым для потребителя критериям.

4.1. Предпроектный анализ

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. Для этого необходимо определить потенциальных потребителей результатов исследования. Основными потребителями результатов исследования могут являться как коммерческие, так и некоммерческие организации. Разделить их можно как по размерам, так и по сферам деятельности. Одной из сфер деятельности является промышленное производство, для которого необходимы как промышленное оборудование (лазерные станки, оборудование для производства нанопорошков), так и системы контроля (неразрушающий контроль, визуализация процессов, экранированных мощной фоновой засветкой и т.д.). Следующей сферой деятельности может быть сфера услуг, в частности, медицинских (офтальмология, косметология). Кроме того, потребителями результатов исследования выступают различные научно-исследовательские организации. Они могут потреблять как промышленное оборудование для собственных нужд и исследований конечных продуктов производства, так и научно-исследовательское оборудование (лазерный проекционный микроскоп). Для наглядности составлена карта сегментирования рынка, приведенная на рисунке 30.

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

■ Фирма А ■ Фирма Б ■ Фирма В

Рисунок 30 – Карта сегментирования рынка

4.1.2. Анализ конкурентных технических решений

В ходе исследования будут рассматриваться три варианта реализации CuBr-лазера с возможностью управления энергией генерации:

1. CuBr-лазер, возбуждаемый цугами импульсов с одним источником питания;
2. CuBr-лазер, возбуждаемый двумя параллельными источниками питания;
3. Гибридный лазер (CuBr с добавкой HBr) возбуждаемый цугами импульсов с двумя параллельными источниками питания.

Поскольку необходим объективный анализ достоинств и недостатков каждого варианта исполнения, необходимо провести анализ. В таблице 4 показано сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4 – Сравнение конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,06	3	5	5	0,18	0,3	0,3
2. Температура бромида меди	0,2	5	5	5	0,1	0,1	0,1
3. Выход активного вещества	0,06	4	5	5	0,24	0,3	0,3
4. Качество пучка	0,12	4	5	5	0,48	0,6	0,6
5. Диапазон рабочих частот	0,08	4	4	5	0,32	0,32	0,4
6. Длительность импульсов генерации	0,14	4	4	5	0,56	0,56	0,7
7. Энерговклад в генерацию	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
8. Безопасность	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16

Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
2. Цена сырья	0,03	5	3	3	0,15	0,09	0,09
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
4. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
Итого	1	49	51	51	3,35	3,59	3,61

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

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

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

Из приведенного анализа видно, что гибридный лазер и лазер с двумя параллельными источниками питания, в целом, схожи как по экономическим критериям эффективности, так и по техническим критериям эффективности. Однако гибридный лазер чуть более конкурентоспособен. Связано это с решением более широкого спектра задач, а также с улучшением качества пучка.

4.1.3. SWOT – анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны НИ и выявленные возможности и угрозы для реализации

проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Универсальность конструкции	Сл1. Наличие деталей, изготавливаемых по индивидуальному заказу.
С2. Широкий спектр применения	Сл2. Дороговизна технологии
С3. Экологичность технологии.	Сл3. Большой комплекс проводимых исследований перед пуском в серийное производство
С4. Относительная простота регулировки мощности	
С5. Низкая стоимость источника накачки	
С6. Наличие спроса на технологию	
Возможности	Угрозы
В1. Возможность создания мощного импульсного лазера	У1. Создание конкурентами производственного прототипа
В2. Возможность применения в различных отраслях: от промышленности до медицины	У2. Развитая конкуренция технологий производства
В3. Возможность построения лабораторной установки	

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 6 – 9.

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта							
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	B1	+	+	-	-	-	-
	B2	+	+	-	+	+	+
	B3	+	+	-	+	-	-

Таблица 7 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	-	+	-
	B2	+	+	+
	B3	-	0	-

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

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

Таблица 9 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

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

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 10.

Таблица 10 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта С1. Универсальность конструкции С2. Широкий спектр применения С3. Экологичность технологии. С4. Относительная простота регулировки мощности С5. Низкая стоимость источника накачки С6. Наличие спроса на технологию</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта Сл1. Наличие деталей, изготавливаемых по индивидуальному заказу. Сл2. Дороговизна технологии Сл3. Большой комплекс проводимых исследований перед пуском в серийное производство</p>
<p>Возможности В1. Возможность создания мощного импульсного лазера В2. Возможность применения в различных отраслях: от промышленности до медицины В3. Возможность построения лабораторной установки.</p>	<p>Направления развития В1С1С2; В2С1С2; В3С1С2. Универсальность конструкции и, как следствие, широкий спектр применений позволяет создать на базе CuVr – лазера практически любую установку, что существенно расширяет номенклатуру выпускаемой продукции. В2С4С5С6. Простота регулировки параметров существенно облегчает работу оператора, а низкая стоимость источника накачки позволяет перезаряжать установку по истечении срока выработки. В3С4. Установка может использоваться для обучения студентов благодаря простоте регулирования параметров</p>	<p>Сдерживающие факторы В1Сл2. Существует спектр задач (в т.ч. промышленных), решить которые может лазер большой мощности. Несмотря на высокую стоимость, в некоторых случаях такая технология является незаменимой. В2Сл1Сл2Сл3. Существует комплекс операций, невозможных для выполнения иным способом, кроме лазерного излучения. Также ключевую роль играет безопасность установки на производстве.</p>

<p>Угрозы У1. Создание конкурентами производственног о прототипа У2. Развитая конкуренция технологий производства</p>	<p>Угрозы развития У1С2С6. Производственный прототип необходимо дорабатывать для снижения количества возможных неисправностей при эксплуатации. У2С1С2С6. Несмотря на конкуренцию, благодаря широкому спектру применения возможно занять определенную технологическую нишу.</p>	<p>Уязвимости: У1Сл3. При производстве лазерного оборудования важную роль играет безопасность не только оператора, но и (например, в офтальмологии) клиента. В данном случае большое количество испытаний является вынужденной мерой. У2Сл2. Из-за наличия деталей, изготавливаемых по индивидуальному заказу добиться значительного удешевления конструкции крайне трудно, а в случае, когда определяющими факторами являются надежность и безопасность, практически невозможно.</p>
--	--	--

SWOT – анализ показывает, что основная угроза связана с наличием конкурентов и их возможностью первыми создать прототип. Однако ключевую роль в лазерной технике играет безопасность. Чем больший комплекс технологических испытаний пройдет прототип, тем выше окажется его безопасность для пользователя. Кроме того, существует спектр технологических операций, осуществимых только мощным лазерным излучением малой длительности импульсов. Также широкая область применения и универсальная конструкция позволяют создать различные виды установок на единой базе, тем самым, унифицировав их.

4.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

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

и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	4
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	5
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	3
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	4
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	4
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	4
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	4

15	Проработан механизм реализации научного проекта	3	3
ИТОГО БАЛЛОВ		52	55

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

4.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Выбор метода коммерциализации важен для получения наибольшей отдачи при реализации разработки на рынке. Зависеть этот выбор будет от перспективности проекта, оценка которой была произведена в разделе 4.1.4. Перспективность проекта выше среднего. Поскольку сильная сторона проекта – наличие достаточно компетентных в области разработки лазерного оборудования людей, наиболее эффективными методами коммерциализации могут быть:

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

Наиболее эффективным, вероятнее всего, будет инжиниринг, поскольку имеются различные варианты конструкции различных элементов проекта (источники питания различной топологии и мощности, различные

конструкции ГРТ и пр.). Кроме того, источники питания, в целом, универсальны для импульсного и высоковольтного оборудования и могут использоваться в различных электроразрядных установках, не только в лазере.

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

Поскольку производственная сеть не слишком развита, то франчайзинг на данном этапе рассматривать не стоит.

4.2. Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

4.2.1. Цели и результат проекта.

В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики,

спонсоры, общественность и т.п. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представить в таблице 12.

Таблица 12 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Пользователь	— Эффективность управления генерацией лазера — Простота конструкции
Организация (разработчик)	— Получение прибыли с продажи готового изделия — Получение экспериментальных результатов и их анализ
Научный руководитель	Научная статья
Студент	— Научная статья — Выполненная ВКР

В таблице 13 представлена информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта включают, в том числе, цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 13 – Цели и результаты проекта

Цели проекта	<ul style="list-style-type: none"> — Сбор информации о способах увеличения КПД и улучшения эффективности управления лазером — Внедрение систем, призванных увеличить мощность излучения и КПД установки — Сборка источников питания, системы управления и синхронизации — Изготовление газоразрядной трубки лазера — Испытание лазера в режиме генерации — Отстройка системы управления — Проведение испытания системы управления — Сравнение затрат энергии с уже имеющимися аналогами
Ожидаемые результаты проекта	Универсальная установка на базе CuBr лазера

Критерии приемки результатов проекта	Успешное прохождение комплекса испытаний
Требования к результату проекта	Требование:
	— КПД установки не уступает имеющимся аналогам — Простота управления мощностью выходного излучения

4.2.2. Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Информация представлена в таблице 14.

Таблица 14 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
Бюджет	1000000 рублей
Источник финансирования	Грант РФФ
Сроки проекта	01.06.2021 – 31.05.2022
Фактическая дата утверждения плана управления проектом	20.06.2021
Плановая дата завершения проекта	31.05.2022

4.3. Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

4.3.1. Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется

содержание всего проекта. На рисунке 31 показана иерархия этапов выполнения ВКР.



Рисунок 31 - Иерархическая структура ВКР

4.3.2. План проекта

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki,рук} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

$$T_{ki,инж} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где $k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал,рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

$$k_{кал,инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

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

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Проведение эксперимента»:

$$t_{\text{ожі}} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 10}{5} = 7,6 \text{ чел.} - \text{дн.},$$

$$T_{\text{рі}} = \frac{t_{\text{ожі}}}{\mathcal{C}_i} = \frac{7,6}{1} = 7,6 \text{ раб.дн.}.$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,48,$$

где $T_{\text{вых}}; T_{\text{пр}}$ - количество выходных и праздничных дней соответственно. В 2022 для пятидневной рабочей недели было 118 выходных и праздничных дней.

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Проведение эксперимента»:

$$T_{\text{кі.инж}} = T_{\text{рі}} \cdot k_{\text{калю.инж}} = 7,6 \cdot 1,48 = 11,25 \approx 11 \text{ кал.дн.}.$$

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 66} = 1,22.$$

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Разработка технического задания»:

$$t_{\text{ожі}} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1,8 \text{ чел.} - \text{дн.},$$

$$T_{\text{рі}} = \frac{t_{\text{ожі}}}{\mathcal{C}_i} = \frac{1,8}{1} = 1,8 \text{ раб.дн.}.$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{\text{кі.рук}} = T_{\text{рі}} \cdot k_{\text{кал.рук}} = 1,8 \cdot 1,22 = 2,2 \approx 2 \text{ кал.дн.}.$$

Все полученные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 15.

Таблица 15 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}		
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	2	-
Выбор направления исследований	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1	1
Подбор и изучение материалов по теме	-	5	-	8	-	6,2	-	6,2	-	9
Календарное планирование работ по проекту	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	3	-
Ознакомление с установкой, настройка измерительных приборов	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2
Снятие показаний установки, необходимых для анализа	-	6	-	10	-	7,6	-	7,6	-	11
Обработка осциллограмм и составление графиков	-	8	-	10	-	8,8	-	8,8	-	13
Сравнение показаний при разных режимах работы и анализ экспериментальных данных	2	2	4	4	2,8	2,8	1,4	1,4	2	2
Консультация в ходе выполнения эксперимента	3	-	5	-	3,8	-	3,8	-	5	-

Написание научной статьи	10	-	14	-	11,6	-	11,6	-	14	-
Оформление отчета по УИРС	-	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4

После расчета и сведения в таблицу временных показателей проектирования, на основе полученной таблицы строится диаграмма Ганта.

№ п/п	Этап работы	Исполнители	T _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				Февр.			Март			Апрель									
				3	1	2	3	1	2	3									
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2	■															
2	Выбор направления исследований	Руководитель; инженер	2	■	■														
3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	9		■	■	■												
4	Календарное планирование работ по проекту	Руководитель	3		■														
5	Ознакомление с установкой, настройка измерительных приборов	Инженер	2			■													
6	Снятие показаний установки, необходимых для анализа	Инженер	11			■	■	■											
7	Обработка осциллограмм и составление графиков	Инженер	13			■	■	■											
8	Сравнение показаний при разных режимах работы и анализ экспериментальных данных	Руководитель; инженер	4						■	■									
9	Консультация в ходе выполнения эксперимента	Руководитель	5							■									
10	Написание научной статьи	Руководитель	14								■	■	■						
11	Оформление отчета по УИРС	Инженер	4															■	

■ - руководитель ■ - инженер

Рисунок 32 – Диаграмма Ганта

Таблица 16 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	69
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	42
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	27

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

4.3.3. Бюджет научного исследования

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

4.3.3.1. Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 17. Все числа приведены для третьего варианта исполнения

Таблица 17 – Сырье, материалы и комплектующие изделия

Наименование	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Порошок CuBr	0,02 кг	800*	16
Порошок HBr	0,02 кг	64**	1280
Импульсный источник питания (общая стоимость комплектующих)	2	30000	60000
Схема запуска тиратрона (общая стоимость комплектующих)	2	5000	5000
Итого:		66296	

* - цена указана за 1 кг;

** - цена указана за 1 г.

4.3.3.2. Специальное оборудование для экспериментальных работ

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

Таблица 18– Специальное оборудование для экспериментальных работ

Наименование оборудования	Количество единиц, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Газоразрядная трубка (ГРТ)	1	200000	200000
Тиратрон ТГИ1-1000/25	1	12500	12500
Тиратрон ТГИ1-500/16	1	18500	18500
Лабораторный автотрансформатор (ЛАТР)	2	4600	9200
Итого		240200	

Т.о., общие затраты на опытный образец составили 306496 руб.

4.3.3.3. Основная заработная плата

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

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_0} = \frac{40950 \cdot 10,3}{246} = 1714,5 \text{ руб.},$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц; F_0 – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (табл. 4.14); M – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

- при отпуске в 28 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. Дней $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_0} = \frac{31200 \cdot 11,2}{213} = 1640,6 \text{ руб.}.$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_d) k_p = 21000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 40950 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_d) k_p = 16000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 31200 \text{ руб.},$$

где Z_{mc} – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб. (для Института оптики атмосферы СО РАН); k_{np} – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_{∂} – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 19 – Баланс рабочего времени исполнителей

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

Таблица 20 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{mc}, руб$	k_{np}	k_{∂}	k_p	$Z_m, руб$	$Z_{\partial n}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$Z_{ocn}, руб$
Руководитель	21000	0,3	0,2	1,3	40950	1714,5	23	39434
Инженер	16000	0,3	0,2	1,3	31200	1640,6	29	47577
Итого:								87010

4.3.3.4. Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{\partial on} = k_{\partial on} \cdot Z_{ocn} = 0,15 \cdot 39434 = 5915,1 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_{\partial on} = k_{\partial on} \cdot Z_{ocn} = 0,15 \cdot 47577 = 7136,5 \text{ руб.},$$

где $k_{\partial on}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

4.3.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (39434 + 5915,1) = 13604,7 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (47577 + 7136,5) = 16414 \text{ руб.},$$

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

4.3.3.6. Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как: печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

Накладные расходы в целом для третьего варианта исполнения:

$$\begin{aligned} Z_{накл} &= (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр} = \\ &= (66296 + 240200 + 87010 + 5915,1 + 7136,5 + 13604,7 + 16414) \cdot 0,2 = 87315 \text{ руб.}, \end{aligned}$$

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

4.3.3.7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 21.

Таблица 21 – Группировка затрат по статьям

Статьи								
Вариант исполнения	Сырье, материалы	Специальное оборудование	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
1	35016	235600	87010	13051,6	30018,7	400696,3	80139,26	480835,56
2	65016	240200	87010	13051,6	30018,7	435296,3	87059,26	522355,56
3	66296	240200	87010	13051,6	30018,7	436576,3	87315,26	523891,56

4.3.3.8. Организационная структура проекта

На практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать таблицу 22.

Таблица 22 – Выбор организационной структуры научного проекта

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

Для данного проекта предпочтительнее использовать матричную структуру проекта. Связано это с относительной сложностью проекта и необходимостью задействовать специалистов различных профилей.

Например, химики необходимы для синтеза активного вещества, стеклодувы – для производства ГРТ. Для проектирования и производства источников питания необходимо задействовать специалистов как по силовой электронике (для изготовления силовой части), так и цифровой электроники (для разработки систем управления и синхронизации), а также по программированию. Специалисты-оптики необходимы для отстройки оптической системы. У каждого специалиста есть свой функциональный руководитель, однако каждый из специалистов может работать над разными проектами. Пример матричной структуры проекта можно увидеть на рисунке 33.



Рисунок 33 – Примерный вид матричной структуры проекта

4.3.3.9. План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. Пример плана управления коммуникациями приведен в таблице 23.

Таблица 23 – Пример плана управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Руководитель проекта	Представителю заказчика	Ежеквартально (первая декада квартала)

2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Участникам проекта	Еженедельно (пятница)
3.	Документы и информация по проекту	Ответственное лицо по направлению	Руководителю проекта	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Не позже дня контрольного события по плану управления

4.3.3.10. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию по данному разделу необходимо свести в таблицу (таблица 24).

Таблица 24

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Отсутствие поставок электронных компонентов из-за рубежа	Остановка производства источников питания	4	5	высокий	Поиск аналогов в России	Неблагоприятная внешнеполитическая ситуация
2	Отказ заказчика	Нереализованная продукция	2	4	средний	Изменение предложения текущему заказчику или поиск другого	Изменение требований заказчика
3	Получение заказчиком неработающего изделия	Репутационный удар	1	4	средний	Более тщательные испытания, ремонт по требованию заказчика	Халатность при проведении испытаний, нарушение правил транспортировки

4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

4.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Данный показатель получается в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения рассмотрены:

1. CuBr-лазер, возбуждаемый цугами импульсов с одним источником питания;
2. CuBr-лазер, возбуждаемый двумя параллельными источниками питания;
3. Гибридный лазер (CuBr с добавкой HBr) возбуждаемый цугами импульсов с двумя параллельными источниками питания.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

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

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{B1} = 480835,56$ руб, $\Phi_{B2} = 522355,56$ руб, $\Phi_{B3} = 523891,56$ руб.

$$I_{\text{финр}}^{B1} = \frac{\Phi_{B1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{480835,56}{523891,56} = 0,92;$$

$$I_{\text{финр}}^{B2} = \frac{\Phi_{B2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{522355,56}{523891,56} = 0,99;$$

$$I_{\text{финр}}^{B3} = \frac{\Phi_{B3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{523891,56}{523891,56} = 1.$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант исполнения 1 признан наиболее приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 25).

Таблица 25 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИ

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Критерии				
1. Безопасность при использовании установки	0,3	4	4	4
2. Помехоустойчивость	0,2	4	4	4
3. Способствует эффективному управлению энергией излучения	0,2	2	5	5

4. Энергосбережение	0,1	5	4	4
5. Удобство в эксплуатации	0,2	4	4	4
ИТОГО	1	3,7	4,2	4,2

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{B1} = 0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 2 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 = 3,7;$$

$$I_{B2} = 0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 4,2;$$

$$I_{B3} = 0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 4,2,.$$

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

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}} .$$

$$I_{B1} = \frac{3,7}{0,92} = 4,02, \quad I_{B2} = \frac{4,2}{0,99} = 4,24, \quad I_{B3} = \frac{4,2}{1} = 4,2.$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 26).

Таблица 26 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,92	0,99	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,7	4,2	4,2
3	Интегральный показатель эффективности	4,02	4,24	4,2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,95	1	0,99

Из данных, приведенных в таблице 26, видно, что финансовая и ресурсная эффективность всех трех вариантов имеет минимальные расхождения, однако наиболее эффективным признан вариант исполнения 2 (CuVr-лазер, возбуждаемый двумя параллельными источниками питания). Связано это с большей финансовой эффективностью по сравнению с третьим и большей ресурсоэффективностью по сравнению с первым.

Выводы по разделу:

В ходе проведения исследования были рассмотрены три варианта исполнения, каждый из которых имеет право занять определенную технологическую нишу, поскольку обладает определенными достоинствами. Однако, судя по результатам проведенных анализов, вариант исполнения CuVr лазера с двумя параллельными источниками питания. Несмотря на то, что данный вариант проигрывает по стоимости способу возбуждения цугами импульсов, он позволяет реализовать управление более эффективно.

В целом, перспективность проекта можно оценить, как среднюю. Производство сложное, требует изготовления деталей по индивидуальному заказу, зависимо от импортных комплектующих. Однако имеется сеть

потребителей, заинтересованных в данной продукции, а также относительно новая и незанятая технологическая ниша (например, визуализация).

Для успешного выведения продукции на рынок необходимо расширять сеть потребителей в различных сферах. Это также может дать базу экспериментальных данных для дальнейших исследований.

Список публикаций студента

Увеличение длительности импульса генерации CuBr лазера при работе в цуговом режиме / М.В. Тригуб, В.А. Димаки, В.О. Троицкий, Н.В. Карасев // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – т. 34. – № 3. – с. 218-222.

Increase in the CuBr Laser Pulse Duration in the Pulse Train Mode / Trigub M.V., Dimaki V.A., Troitskii V.O., Karasev N.V. // Atmospheric and Oceanic Optics, 2021, V. 34. No. 04. pp. 357-361.

Increase of Radiation Pulse Duration of CuBr-Laser in the Train Mode / N.V. Karasev, V.A. Dimaki, V.O. Troitskii [et al] // IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electronic Devices and Materials (EDM). – 2021. – pp. 279-282.

Карасев, Н.В., Увеличение длительности импульса генерации CuBr-лазера при работе в цуговом режиме / Н.В. Карасев, В.О. Троицкий, М.В. Тригуб // Сборник трудов XXIX Международной Конференции «Лазерно-информационные технологии». 13-18 сентября 2021 г., г. Новороссийск. 2021. С. 65-66.