

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

Институт: **Физики высоких технологий**

Направление подготовки: **11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»**

Кафедра: **Высоковольтной электрофизики и сильноточной электроники**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ХеСl лазер с мощностью излучения 100 Вт
УДК 621.373.826.038.823

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ51	Аманжол Абай Буланулы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с	Панченко Юрий Николаевич	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Черепанова Наталья Владимировна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Задорожная Татьяна Анатольевна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ВЭСЭ	Ратахин Николай Александрович	д.ф.-м.н., Академик РАН		

Томск – 2017 г.

Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Способность демонстрировать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания физико-химических и технологических основ получения и использования эксимерных лазеров и применять их для решения научных и инженерных задач наукоемкого производства на мировом уровне
P2	Способность планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своей специализации с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующих выполняемой работе, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы, использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности.
P3	Способность интегрировать знания различных и смежных видов деятельности и решать задачи, требующие абстрактного мышления и оригинальности анализа для концептуализации инженерных моделей выбранного технологического направления
P4	Способность оценивать экономическую эффективность новых разработок и их инновационную направленность, выполнять требования по защите окружающей среды

Форма задания на выполнение выпускной квалификационной работы

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Физики высоких технологий

Направление подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника

Кафедра Высоковольтной электрофизики и силовоточной электроники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

Н. А. Ратахин

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ51	Аманжол Абай Буланулы

Тема работы:

ХеСl лазер с мощностью излучения 100 Вт

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(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.).

Электроразрядный импульсно-периодический эксимерный ХеСl лазер с автоматической УФ-предыонизацией, измерительная аппаратура (осциллограф Tektronix TDS3014, калориметр марки Gentec-E, Терморегулятор ОВЕН ТРМ210), баллоны с газами (Хе, НСl, Ne), конденсаторная батарея, насос марки 2НВР-5Д (форвакуумный), система управление регулятором и схемой электрического питания эксимерного лазера.

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>	- обзор литературы по теме ВКР; - описание электроразрядного импульсно-периодического эксимерного ХеСl лазера с автоматической УФ-предыонизацией; - проведение экспериментов, расчетов; - экспериментальные результаты и их обсуждение; - расчеты ежемесячного расхода на проведение экспериментов и способы уменьшения затрат при сохранении качества получаемых результатов; - анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация в формате Microsoft Power Point, 16 слайдов
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доц. каф. менеджмента Черепанова Н.В.
Социальная ответственность	асс. каф. ЭБЖ Задорожная Т.А.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с	Панченко Юрий Николаевич	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ51	Аманжол Абай Буланулы		

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

Институт **Физики высоких технологий**
Направление подготовки **11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»**
Уровень образования **магистратура**
Кафедра **Высоковольтной электрофизики и сильноточной электроники**
Период выполнения (**осенний 2015/2016 /, весенний семестр 2016/2017 учебного года**)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

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

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
14.02.17	<i>Обзор литературы</i>	7
06.03.17	<i>Определение системы возбуждения лазера</i>	10
26.03.17	<i>Приготовление газовой смеси, юстировка лазера</i>	5
11.04.17	<i>Программирование в Microsoft Visual Studio</i>	8
28.04.17	<i>Измерение и анализ полученных результатов (эксперименты)</i>	30
12.05.17	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	15
15.04.17	<i>Социальная ответственность</i>	25

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с	Панченко Юрий Николаевич	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ВЭСЭ	Ратахин Николай Александрович	д.ф.-м.н., Академик РАН		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ51	Аманжол Абай Буланулы

Институт	ИФВТ	Кафедра	ВЭСЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроника и нанoeлектроника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научно-исследовательского проекта (НИП): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Для разработки проекта потребуются следующие ресурсы: - финансовые ресурсы для оплаты труда исполнителям проекта (районный коэффициент для Томска, коэффициент дополнительной зарплаты); - человеческие ресурсы (руководитель, эксперт, исполнитель проекта)
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Использовалась система отчисления на социальные нужды
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Предпроектный анализ; Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения; SWOT - анализ
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1. Цели и результаты проекта 2. Инициация проекта 3. Организационная структура проекта 4. Иерархическая структура работ 5. Контрольные события проекта
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	1. Бюджет научно – технического исследования (НТИ) 2. Расчет материальных затрат НТИ 3. Планирование, управления научно-техническим проектом 4. Основная заработная плата исполнителей темы 5. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала 6. Отчисления на социальные нужды 7. Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	

1. *Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений*
2. *Цели и результаты проекта*
3. *Итоговая матрица SWOT - анализа*
4. *Иерархическая структура проекта*
5. *Календарный план - график проведения исследования в виде диаграммы Ганта*
6. *Бюджет проекта*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Черепанова Н.В.	к.ф.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ51	Аманжол А.Б.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ51	Аманжол Абай Буланулы

Институт	ИФВТ	Кафедра	ВЭСЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроника и наноэлектроника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Эксимерный ХеСl лазер с мощностью излучения 100 Вт. Характеристики эксимерного лазера EL-500-100: - Зарядное напряжение на накопительной емкости составляет 22-24 кВ. - Лазер работает на смеси Ne:Xe:HCl - 800:8:1, находящейся под абсолютным давлением 3.8 атм. - Длина волны излучения $\lambda \sim 308$ нм. К рабочей зоне относиться производственное помещение лаборатории. Применяется в микротехнологиях, фотолитографии, лазерной медицине и ряде других областей.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).	Условия труда работающих характеризуются возможностью воздействия на них следующих вредных производственных факторов: 1.1. Физические вредные факторы: - Отклонение показателей микроклимата в помещении - Превышение уровней шума - Превышение уровней вибрации - Превышение уровней электромагнитных и ионизирующих излучений - Недостаточная освещенность рабочей зоны - Утечки токсичных и вредных веществ в атмосферу - Повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны 1.2. К опасным факторам относится: - Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека - Электрический ток
---	--

2. Экологическая безопасность: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	Анализ воздействия объекта на атмосферу: Количество вредных веществ (водород, аргон, азот), выделяемых при работе лазера, не превышает установленных норм, вещества выделяются лишь периодически и выводятся из помещения вытяжкой (после откачки).
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.	Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу. При возникновении ЧС, такого как пожар нужно: -Сообщить о пожаре в пожарную охрану -Если есть возможность отключить электроэнергию. -Покинуть помещение, используя основные и запасные пути эвакуации
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	В лаборатории запрещено использование труда несовершеннолетних лиц. Привлечение трудящихся к работам в ночное время не производится. Практикуется применение спецодежды и СИЗ. Спецпитание и особое лечебно-профилактическое обслуживание отсутствует. Особенности обязательного социального страхования и пенсионного обслуживания стандартные. Проводимые исследования достаточно безопасны для человека, за исключением опасности воздействия лазерного излучения. В процессе работы выполняются технологические перерывы, проветривание помещения. Также есть комната психологической разгрузки.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Задорожная Т.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ51	Аманжол А.Б		

Реферат

Выпускная квалификационная работа магистра состоит из введения, заключения, списка литературы; содержит 112 с., 28 рисунков, 19 таблицы, приложение А (обязательное), демонстрационный материал (16 слайдов), 65 использованных источников литературы.

Ключевые слова: электроразрядный эксимерный лазер, генерация, излучение, однородный объемный разряд, удельная мощность накачки, искровая предыонизация, длительность и энергия импульса генерации, КПД лазера, система прокачки газа.

Объектом исследования является электроразрядный импульсно-периодический эксимерный XeCl лазер с автоматической УФ-предыонизацией.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2007.

Оглавление

Введение	13
1 Особенности работы и применения электроразрядных эксимерных лазеров	15
1.1 Исследование кинетики образования эксимерных молекул	15
1.1.1 Эксимерные молекулы	15
1.1.2 Исследование механизмов образования эксимерных молекул XeCl^*	16
1.2 Способы создания активной среды электроразрядных эксимерных лазеров	22
1.2.1 Эксимерные лазеры	22
1.2.2 Эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов	24
1.3 Системы возбуждения электроразрядных эксимерных лазеров	26
1.3.1 LC – генератор с инвертированием напряжения	30
1.3.2 Схема с перезарядкой емкости на емкость и искровой предыонизацией	33
1.4 Влияние системы предыонизации на работу XeCl лазера	36
1.4.1 Источники УФ-излучения	37
1.4.2 Рентгеновская предыонизация	39
2 Экспериментальные приборы и методики измерений	41
3 Экспериментальные результаты и их обсуждение	45
3.1 Экспериментальная установка и ее характеристики	45
3.1.1 Система газонаполнения	46
3.1.2 Система термостабилизации газовой камеры	48
3.1.3 Программа управления работой лазерной системы	50
3.1.4 Замена рабочей смеси в разряде	53
3.1.5 Расчет охлаждения газовой смеси теплообменника	56
3.2 Результаты проведенного исследования	63

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	69
4.1 Предпроектный анализ	69
4.2 Инициация проекта	72
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом	74
5 Социальная ответственность	84
5.1 Производственная безопасность	84
5.2 Экологическая безопасность	96
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	98
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	100
Заключение	106
Список использованных источников	107
Приложение А	113
Приложение Б	117

Введение

Создание эксимерных лазеров дало в руки исследователей мощный и эффективный источник когерентного излучения в ультрафиолетовой области спектра. За истекшее десятилетие появилось большое количество работ, посвященных как исследованию самих эксимерных молекул, созданию и совершенствованию лазеров на этих молекулах, так и многочисленным применениям эксимерных лазеров в микроэлектронике, фотохимии, генерации мощного излучения в видимом и ВУФ-диапазонах, термоядерных исследованиях.

По мере увеличения энергии и мощности генерации, а также совершенствования самих лазерных систем сфера использования эксимерных лазеров быстро расширяется. Однако повышение энергии и мощности излучения электроразрядных эксимерных лазеров имеет фундаментальные физические ограничения, которые при превышении оптимальных значений энергии генерации и частоты повторения импульсов обуславливают уменьшение эффективности лазера, снижение надежности и стабильности его работы и, в конечном счете, увеличение затрат на эксплуатацию лазера.

К настоящему времени опубликовано несколько обзоров, посвященных эксимерным лазерам. В основном в них рассматриваются физические условия получения генерации на эксимерных молекулах, механизмы формирования населенности рабочих уровней, характер неравновесности активной среды.

В 1990-х гг. в рамках национальных и международных программ на создание мощных эксимерных лазеров киловаттной мощности, преимущественно на молекулах XeCl , были направлены усилия многих научных групп, некоторым из которых удалось создать лазеры мощностью 1 кВт и более. Эксимерные лазеры нашли широкое применение в микроэлектронике, медицине, научных и прикладных исследованиях.

Все это определяет актуальность поиска решений, позволяющих оптимизировать конструкцию и метод работы эксимерных лазеров, повысить их мощность и снизить затраты на получение энергии генерации при различных сочетаниях энергии генерации и частоты повторения импульсов.

В настоящей работе описан мощный импульсно-периодический ХеСl-лазер с системой питания на коммерческих тиратронах, в котором возможно достижение высокого уровня средней мощности излучения.

Цель настоящей работы - разработка и проведение экспериментальных исследований импульсно-периодического ХеСl-лазера с мощностью излучения 100 Вт.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих основных задач:

1. Исследование условий повышения энергии излучения и эффективности работы электроразрядного импульсно-периодического ХеСl лазера.
2. Разработка ПУ для контроля и регулировки температуры разрядной камеры.

Личный вклад автора заключается в участии по созданию экспериментальных установок и проведении экспериментов, в выполнении оценочных расчетов, интерпретации и анализе полученных результатов. Постановка задачи и общее руководство работой осуществлялось к.ф.-м.н. Ю.Н. Панченко. Представленные результаты получены лично Аманжол А. Б. или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

1 Особенности работы и применения электроразрядных эксимерных лазеров

1.1 Исследование кинетики образования эксимерных молекул

1.1.1 Эксимерные молекулы

Наиболее мощными и эффективными источниками когерентного излучения в ультрафиолетовой и вакуумной ультрафиолетовой областях спектра являются в настоящее время эксимерные лазеры.

Рабочей средой эксимерных лазеров служит смесь газов высокого давления (как правило, давление выше 1 атм) с обязательным присутствием в смеси в качестве основного компонента (более 90% по объему) атомов инертных газов*). Атомы инертных газов обладают замкнутыми электронными оболочками и поэтому не образуют молекул в основном электронном состоянии. Однако в возбужденном электронном состоянии образуется прочная химическая связь с величиной потенциала связи от 0,5 до 2 эВ, и такая молекула, устойчивая в возбужденном электронном состоянии и неустойчивая в основном, называется эксимерной молекулой. Эксимерные молекулы обладают рядом уникальных свойств: чрезвычайно высоким квантом к. п. д. люминесценции 50-70%, отсутствием поглощения собственного излучения на длине волны люминесценции, большой величиной энергии кванта излучения, способностью сохранять излучающие свойства до очень высоких (десятки атмосфер) давлений рабочей среды, возможностью реализации четырехуровневой лазерной схемы. Эти свойства эксимерных лазерных сред позволили создать целый класс мощных лазеров ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового диапазонов, обладающих к. п. д. $\approx 10\%$, и чрезвычайно высокой импульсной мощностью и энергией излучения. В режиме высокой частоты следования импульсов достигается и высокая средняя мощность излучения.

Впервые о принципиальной возможности создания лазеров на электронных переходах молекул из устойчивого возбужденного состояния в неустойчивое основное сообщил Ф. Г. Хоутерманс в 1960 г., подробно проанализировавший лазер на связанно-свободных электронных переходах в молекуле водорода. В этой же статье Ф. Г. Хоутерманс в качестве перспективных лазерных сред предложил инертные газы. Работа [1], появившаяся еще до создания первых лазеров на рубине и гелий-неоне, на 10 лет предвосхитила запуск первого эксимерного лазера на димере ксенона [2-4].

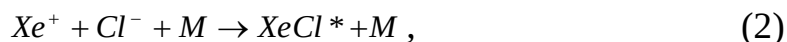
1.1.2 Исследование механизмов образования эксимерных молекул XeCl^*

Основным параметром активной среды эксимерного лазера, определяющим его главные характеристики: энергию импульса генерации, КПД, удельный энергопотребление и др., - является концентрация эксимерных молекул, образующихся при накачке. Она в свою очередь определяется концентрациями компонентов плазмы, участвующих в образовании XeCl^* по тому или иному механизму, и константами скоростей соответствующих реакций.

Основными механизмами образования молекул XeCl^* в смеси He-Xe-HCl являются гарпунная реакция с участием нейтральных частиц плазмы



и трехчастичная ион-ионная рекомбинация



где M - третья частица. Константа скорости реакции (2) с участием атомов Xe^* ($^3\text{P}_2$, $^3\text{P}_1$) и HCl ($\nu=1$) равна $5,6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ [5]. Константа скорости реакции (2) достигает $2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ при давлении 2,2 атм (расчетные данные для буферного газа Ne [6]), что сравнимо с константами диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов инертных газов [7]. Поэтому роль реакции

(2) в XeCl-лазере можно оценить, сравнив рекомбинационные процессы в газовых смесях без галогеноносителя и в рабочей смеси эксимерного лазера.

На рисунке 1.1 приведены кривые временного проведения поглощения с уровня 3P_2 атома He^* в смеси $He : He = 550 : 8$, $p = 2.2$ атм и рабочей смеси с добавкой 0,2% HCl (кривые 1 и 2 соответственно).

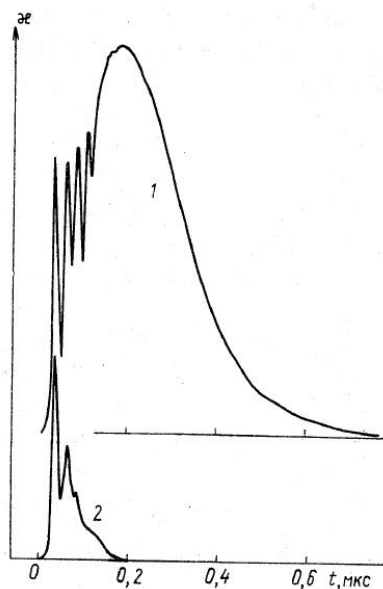


Рисунок 1.1 - Временные зависимости поглощения с уровня 3P_2 атомов He^* в смеси $He : He : HCl = 550 : 8 : 1$ (2); полное давление смеси $p = 2.2$ атм.

В соответствии с полученными ранее результатами [8] в смеси He-Xe выделяются два основных механизма заселения возбужденных уровней атома Хе. Процессы заселения в начальной стадии разряда обусловлены прямым ударным возбуждением атомов Хе. Другим механизмом является заселение уровней He^* при рекомбинации ионов Хе и He_2^+ . Это приводит к появлению длинного хвоста в поглощении с провалами, вызванными осцилляциями накачки (максимумы разрядного тока соответствуют минимумам поглощения). При добавлении в газовую смесь 0,2% HCl ход кривой поглощения в начальной стадии не меняется, тогда как практически полностью исчезает хвост, связанный с рекомбинацией.

В смеси He-Xe при концентрации электронов $N_e = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ основными процессами рекомбинации являются диссоциативная и ударно-радиационная рекомбинации. Константа скорости ударно-радиационной рекомбинации сильно зависит от энергии электронов и в смеси He - Xe может достигать $10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$ [9]. Константа скорости диссоциативной рекомбинации ионов Xe_2^+ существенно больше: $k = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ [29], однако скорость такой рекомбинации при $N_e = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ определяется главным образом скоростью конверсии ионов Xe^+ в димеры Xe_2^+ . Константа скорости конверсии $k = 1,1 \cdot 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$ [10], поэтому характерное время образования ионов Xe_2^+ в наших условиях $\tau = 180 \text{ нс}$.

Исчезновение рекомбинационного хвоста в поглощении при добавлении HCl объясняется тем, что вместо конверсии ионов Xe^+ в димеры Xe_2^+ и их рекомбинации с электронами основной реакцией рекомбинации в рабочей смеси становится реакция (2), имеющая при концентрации $[\text{Cl}^-] \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ характерное время $\tau \sim 10 \text{ нс}$. Таким образом, ион-ионный механизм образования эксимерных молекул XeCl^* играет существенную роль.

Чтобы определить, какой из механизмов - (1) или (2) - доминирует на той или иной стадии разряда, необходимо определить абсолютные концентрации и временное поведение компонентов, принимающих участие в реакциях, и конечного продукта реакции - эксимерных молекул XeCl^* .

Для определения роли ион-ионной реакции было исследовано образование ионов Cl^- в разряде.

На рисунке 1.2, а приведен участок спектра поглощения плазмы XeCl -лазера в области 336 - 345 нм, соответствующий моменту времени $t = 40 \text{ нс}$. В спектре отчетливо видна характерная "ступенька" в области 343 нм, которая соответствует порогу фотоотрыва электрона для иона Cl^- [11,12].

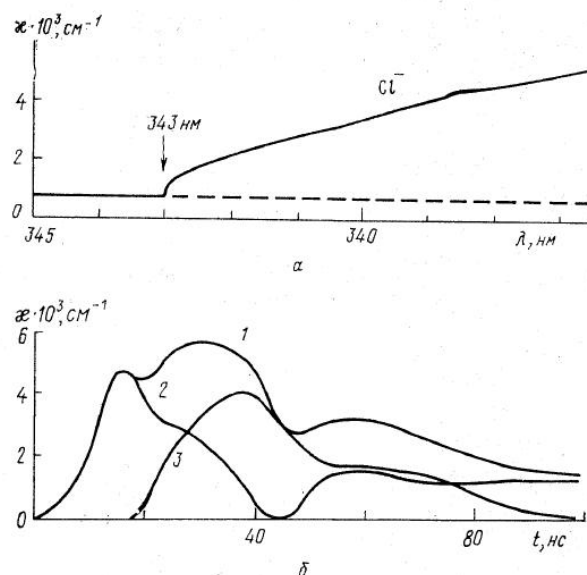


Рисунок 1.2 Участок спектра поглощения плазмы XeCl-лазера в области 337-345 нм (а) и временное поведение поглощения на длинах волн $\lambda = 338$ (1) и 345 нм (2) (б); кривая 3 (разность кривых 1 и 2) отражает концентрацию ионов Cl^- в разряде

Для определения временного поведения поглощения ионами Cl^- необходимо учитывать перекрытие спектра поглощения Cl^- с поглощением континуума. Истинная кривая поглощения ионов Cl^- (кривая 3 на рисунке 1.2, б) определялась как разность кривых поглощения, снятых в разных спектральных областях.

Временное поведение поглощения континуума в области 336 - 345 нм несколько иное, чем в длинноволновой области. Добавочный размытый максимум при $t = 30$ нс связан, по-видимому, с наложением в ближней УФ области полосы поглощения димеров Xe_2^+ . Сечения поглощения Xe_2^+ на длине волны 345 нм известно [13], что позволяет оценить концентрацию $[\text{Xe}_2^+] \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

На рисунке 1.2 (кривая 1) приведена абсолютная концентрация ионов Cl^- в разряде. При вычислении концентрации использовалось значение сечения поглощения $7 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ на $\lambda = 338$ нм, удовлетворяющее в пределах погрешностей данным разных авторов [14,15].

Основной механизм образования ионов Cl^- в разряде - диссоциативное прилипание электронов:



Скорость реакции (3) сильно зависит от энергии электронов и степени колебательного возбуждения HCl [16,17]. В начальной стадии разряда, когда средняя энергия электронов велика, а концентрация колебательно-возбужденных молекул $\text{HCl}(\nu)$ мала, образование Cl^- идет медленно, поэтому в течение первых 15 нс разряда ионы Cl^- достигается к $t = 40$ нм и составляет $5,8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Для определения абсолютной концентрации эксимерных молекул XeCl^* использовался метод измерения усиления слабого сигнала. Коэффициент усиления слабого сигнала g_0 пропорционален концентрации эксимерных молекул: $g_0 = \sigma N$, где σ - сечение вынужденного перехода; N - концентрация молекул XeCl^* .

При теоретических оценках для перехода $B \rightarrow X$ молекул XeCl^* обычно используют $\sigma = 4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, однако, как было показано в [18], σ существенно зависит от длительности спектрального состава зондирующего импульса. Поэтому для определения концентрации эксимерных молекул по измеренным значениям g_0 необходимо знать эффективное сечения вынужденного перехода, соответствующего конкретному импульсу зондирования.

Определение σ проводилось по измерению плотности энергии насыщения $E_s = h\nu / \sigma$. Параметр E_s находился из измеренной зависимости входной и выходной плотностей энергии импульса $E_{\text{вх}}$ и $E_{\text{вых}}$ по формуле Франца-Нодвика [19]. Полученные значения $E_s = 2,1 \pm 0,2 \text{ мДж/см}^2$ соответствует сечению вынужденного перехода $\sigma = (3,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$.

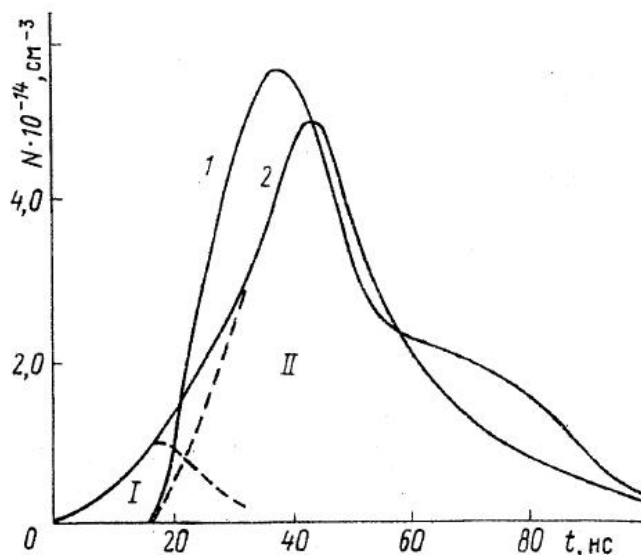


Рисунок 1.3 - Временные зависимости концентрации ионов Cl^- (1) и эксимерных молекул XeCl^* (2) в разряде; отмечены области, где образование XeCl^* идет, в основном, по гарпунному (I) и ионному (II) механизмам

На рисунке 1.3 (кривая 2) приведена временная зависимость концентрации эксимерных молекул XeCl^* в разряде. Усиление слабого сигнала и спонтанное сечение XeCl^* [20] показывают, что образование XeCl^* начинается практически сразу после начала разряда. Поскольку в течение первых 15 нс разряда ионы Cl^- не детектируются, это позволяет предполагать, что в начальной стадии разряда основным каналом образования молекул XeCl^* является гарпунная реакция (5). Соответствующая область I показана на рисунке 1.3. Максимум концентрации XeCl^* в этой области по времени совпадает с максимумом концентрации Xe^* и составляет 10^{14} см^{-3} . На последующей стадии разряда концентрация Xe^* резко падает и начинается интенсивное образование ионов Cl^- . Область II на рис. 6 является областью, где основной механизм образования XeCl^* - ион-ионная рекомбинация (2). Максимальная концентрация XeCl^* на этой стадии составляет $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и достигается к моменту времени $t = 40\text{-}50 \text{ нс}$.

Таким образом, в начальной стадии разряда доминирует гарпунная реакция (1). Она дает вклад и на последующих стадиях, поскольку Xe^* детектируется в течение всего разряда (рисунок 1.2, б).

Для теоретического исследования кинетики образования эксимерных XeCl^* молекул использована упрощенная модель, блок-схема которой представлена на рисунке 1.4.

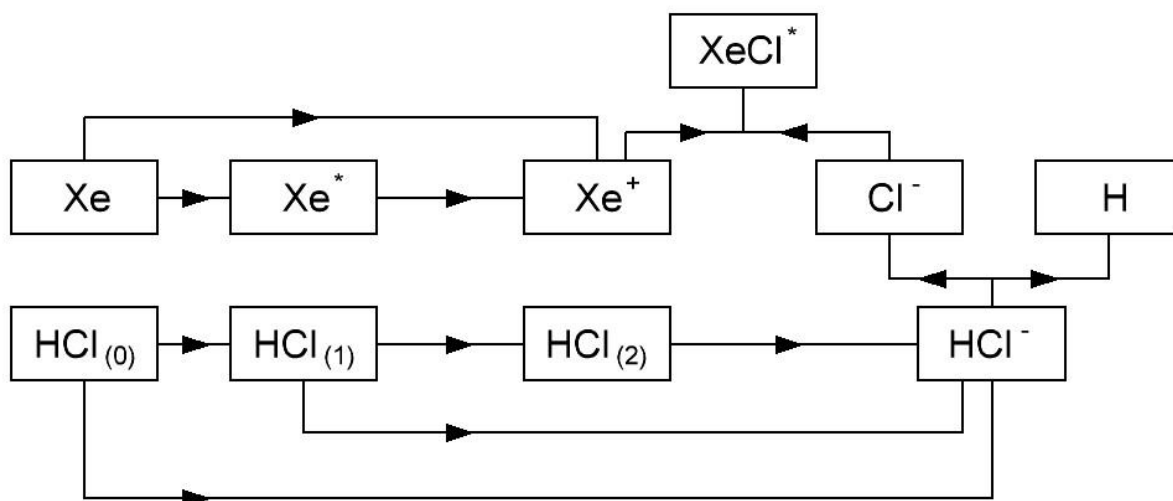


Рисунок 1.4 - Блок-схема упрощенной модели кинетики образования XeCl^* - молекул.

1.2 Способы создания активной среды электроразрядных эксимерных лазеров

1.2.1 Эксимерные лазеры

Принципиальная особенность инертных газов, отличающая их от других газообразных веществ, состоит в том, что инертные газы атомарны. По этой причине в инертных газах любые процессы электронного возбуждения и ионизации, сопровождаемые последующей релаксацией возбуждения, практически не имеют безызлучательных каналов релаксации, характерных для многих молекулярных газовых сред. Наиболее ярко это свойство инертных газов проявляется при высоких (более 1 атм) давлениях и в конденсированном

состоянии, когда быстрая релаксация возбужденных электронных состояний молекул через процессы столкновительного обмена энергией и последующую колебательную релаксацию возбуждения приводит к ослаблению оптического излучения других молекулярных газовых сред.

Инертные газы являются наиболее эффективными источниками неравновесного оптического излучения в видимом, ультрафиолетовом и вакуумном ультрафиолетовом диапазонах длин волн.

Инертные газы низкого давления ($P < 10^{-3}$ атм) характеризуются линейчатыми атомарными спектрами излучения, а при высоких давлениях (от 0,5 атм и выше) линейчатое излучение полностью исчезает (за исключением видимого и инфракрасного диапазонов) и появляется молекулярное ультрафиолетовое излучение эксимеров инертных газов. При повышении давления и в конденсированном состоянии инертные газы, как газовые люминофоры, сохраняют чрезвычайно высокую эффективность люминесценции в пределах 50-70% [43]. Добавления молекулярных примесей к сжатым инертным газам полностью тушит люминесценцию эксимеров инертных газов [22]. При небольших концентрациях примесей, менее 1%, возбужденные инертные газы эффективно передают энергию возбуждения как молекулам примеси, так и короткоживущим производным молекулам, образующимся через возбужденные, химически активные состояние атомов инертного газа с участием атома молекулярной примеси, с последующей эффективной люминесценцией уже при распаде нового искусственно созданного эксимера. Излучение таких производных эксимеров из атомов инертных газов и атомов молекулярной примеси лежит в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. В эксимерных лазерных средах излучающей частицей является либо эксимер инертного газа, либо производные эксимеры, состоящие из атомов инертного газа и атомов молекулярной примеси. По существу, малая молекулярная добавка к сжатому инертному газу является эффективным внутренним преобразователем вакуумного ультрафиолетового

излучения атомов и эксимеров инертных газов в ближнее ультрафиолетовое и видимое излучение производных эксимеров и молекул примеси.

В 1966 г. Н. Г. Басов предложил в качестве рабочего вещества для лазеров с электронной накачкой в ультрафиолетовой области спектра инертные газы. В 1967 г. А. Г. Молчановым, И. А. Полуэктовым, Ю. М. Поповым были сформулированы пороговые условия генерации в лазерах на кристаллах инертных газов [23]. Экспериментальные исследования люминесценции инертных газов в газообразном, жидком и твердом состояниях [24,25,26,38-40] при накачке мощным электронным пучком, выполненные в ФИАН, показали, что в "сжатых и конденсированных инертных газах Хе, Кг, Аг и их смесях излучение инертных газов, независимо от их агрегатного состояния, происходит посредством образования и последующего излучательного распада двухатомных эксимерных молекул" [28,29,30-33].

1.2.2 Эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов

Поиск новых эксимерных лазерных сред на производных эксимерах, получаемых путем добавления к сжатым инертным газам небольших количеств молекулярной примеси, привел к открытию нового класса димеров RX^* , в которых R - атом благородного газа, а X - атом галогена [29-39]. Излучение этих молекул обусловлено переходом из связанного возбужденного состояния молекулы RX^* на репульсивное или слабо связанное основное состояние, которое образуется из комбинации атома инертного газа в состоянии 1S_0 и атома галогена в состояниях $^2P_{3/2}$ и $^2P_{1/2}$. О первом лазере такого типа (генерация была получена при возбуждении электронным пучком смеси Хе : Br₂) сообщалось в работе [30].

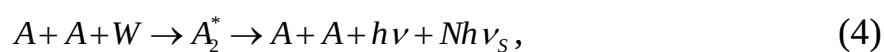
Таблица 1 - Длины волн генерации и излучательное время жизни эксимерных молекул галогенидов инертных атомов

Экимер	Длина волны генерации, нм	Излучательное время жизни, нс
Ar_2	126	5
Kr_2	147	6
Xe_2	172	6
ArF	193	4
$KrCl$	222	19
KrF	248	8
$XeBr$	282	15
$XeCl$	308	11
$XeF(B \rightarrow X)$	351	16
$XeF(C \rightarrow A)$	510	100
XeO	540	200
KrO	558	1000
Ar_2F	290	180
Kr_2F	420	170
Xe_2F	550	150
$HgBr$	510	24

Впоследствии генерации была получена еще на целом ряде смесей благородных газов с галогенами [34-37]. В таблице 1 приводятся длины волн генерации основных эксимерных лазеров.

Подробные сведения о перечисленных эксимерных молекулах и лазерах на их основе можно найти в обзорах [26,32,33,41].

Обобщенная схема процесса образования и излучательного распада эксимерной молекулы была опубликована в работах [34,42]:



где A - атом в основном электронном состоянии, W - энергия возбуждения, A_2^* - возбужденная двухатомная молекула (эксимер), $h\nu$ - энергия излучаемого фотона, $Nh\nu_s$ - энергия поступательного движения расталкивающихся атомов в основном электронном состоянии.

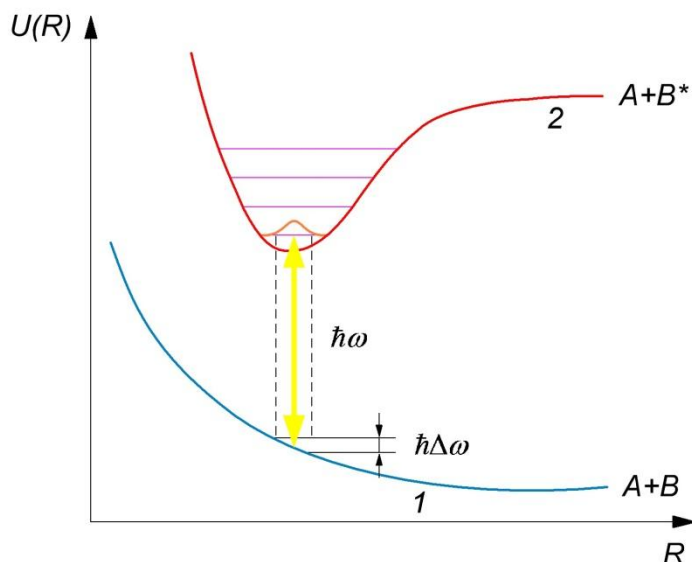


Рисунок 1.5 - Схема оптических переходов в эксимерной молекуле Xe_2^* .

1 - основное состояние; 2 - возбужденное состояние

Соответствующая схема лазерных оптических переходов в эксимерной молекуле была впервые опубликована 1970 г. в работах Н. Г. Басова и др. [8,40,43] (рисунок 1.5).

1.3. Системы возбуждения электроразрядных эксимерных лазеров

Впервые генерация на эксимерных молекулах получена в 1975 г. [44]. Излучательный переход в эксимерных молекулах происходит между верхним электронным состоянием, которое имеет потенциальный минимум, и нижним слабосвязанным состоянием, что обуславливает широкую полосу усиления. Широкая полоса и малое время жизни молекулы в возбужденном состоянии

порядка $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$ с, требуют для создания активной среды высоких энерговкладов $\sim 10^{-2}$ Дж/см³ [45]. Равномерное возбуждение при таких давлениях может достигаться несколькими способами:

- 1) Пучком электронов.
- 2) Накачка разрядом, контролируемым пучком электронов.
- 3) Возбуждение самостоятельным разрядом с предварительной ионизацией.

Первые два способа накачки являются наиболее перспективными при получении импульсов излучения с энергией десятки-сотни джоулей.

При создании лазеров работающих с большой частотой повторения и высокой средней мощностью, более перспективен третий способ. В этом случае энергия от внешнего поля передается электронам газоразрядной плазмы, которые тратят ее на возбуждение частиц газа или плазмы. Этот способ технически проще других и сразу же создает неравновесное состояние газа, так как средняя энергия электронов в газовом разряде значительно превышает тепловую энергию атомов. Поэтому газовый разряд используется в большинстве типов лазеров.

При возбуждении молекулярных лазеров преимущества газоразрядного способа возбуждения связаны с тем, что первоначально основная часть вводимой в газ энергии тратится на возбуждение колебательных уровней молекулы. Это связано с механизмом процесса возбуждения колебательных уровней молекулы электронным ударом. Данный процесс включает в себя образование промежуточного состояния отрицательного иона молекулы и носит резонансный характер. Для тех значений энергии столкновения, при которых возможно образование автоионизационного состояния отрицательного иона молекулы, сечения возбуждения колебательных уровней молекулы сравнимы с ее поперечным размером. При этом энергия, вводимая в газ, идет в основном на возбуждение колебательных уровней молекул. Согласно теоретическим данным видно, что для не очень малых средних энергий

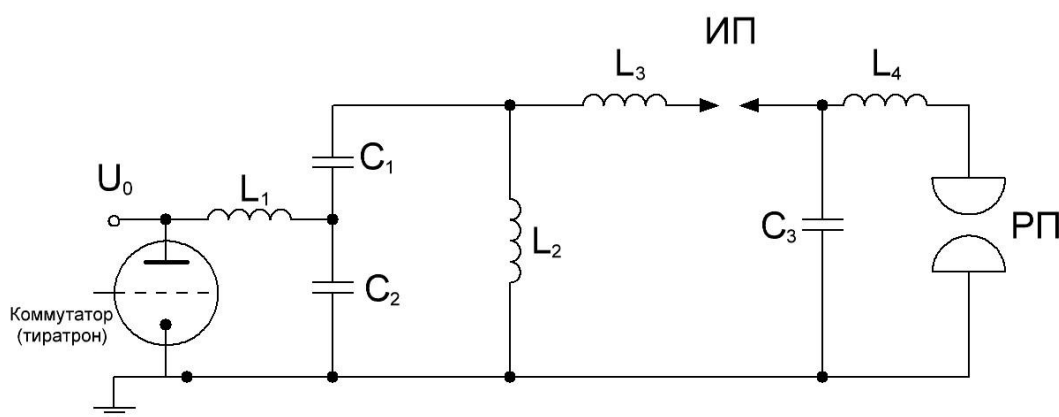
электрона энергия, получаемая им от электрического поля, тратится в основном на возбуждение колебательных, уровней молекул газа.

Удельная мощность, вкладываемая в единичный объем активной среды газового лазера при его газоразрядном возбуждении, возрастает с увеличением разрядного тока и давления газа. Однако при превышении некоторых предельных значений давления или тока такое возрастание сопровождается не увеличением, а уменьшением выходной мощности лазеров с газоразрядным возбуждением. Это связано с возникновением сжатия или контракции разряда, которое проявляется при достаточно большом токе или давлении и состоит в резком уменьшении области, заполненной разрядным током. Сжатие приводит к появлению больших пространственных неоднородностей оптических и электрических свойств активной среды, к ее значительному перегреву и к уменьшению степени неравновесности газоразрядной плазмы. Общей причиной сжатия разряда является его температурная неоднородность, которая приводит к тому, что заряженные частицы образуются преимущественно в более прогретой осевой области разрядной трубки. Разряд сжимается, если значительная часть заряженных частиц рекомбинирует в объеме трубки, не успев достичь стенок. Тогда радиус области, заполненной заряженными частицами, оказывается много меньше радиуса трубки, причем как повышение тока, увеличивающее температурную неоднородность разряда, так и повышение давления, увеличивающее относительную роль объемных процессов в рекомбинации заряженных частиц, сопровождается дальнейшим сжатием разряда.

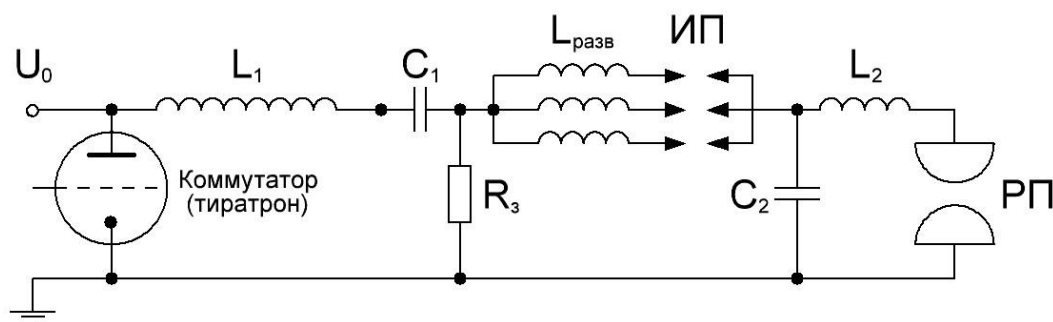
Существенно повысить удельный энерговклад в активную среду газоразрядных лазеров без ухудшения ее оптических свойств можно в результате использования конвективного охлаждения газа. Скорость прокачивания газа через объем, заполненный разрядом, при заданном значении вводимой в разряд мощности выбирают таким образом, чтобы за время пребывания в разрядной области газ не успел нагреться до температуры, при

которой, с одной стороны, разрушается инверсная заселенность, а с другой, возникают пространственные неоднородности, приводящие к сжатию разряда.

Еще один радикальный способ преодоления проблем, связанных с повышением удельного энерговклада в активную среду газоразрядных лазеров, — это использование импульсного разряда. Длительность импульса выбирают меньше, чем характерное время процессов переноса, которое, как правило, определяет время развития неустойчивостей. Поэтому в таком режиме удастся избежать развития неустойчивости разряда, приводящей к его сжатию. Использование импульсного разряда для возбуждения газовых лазеров позволило существенно увеличить рабочее давление для широкого класса газоразрядных лазеров и увеличить удельные выходные характеристики таких лазеров. Одна из особенностей электроразрядных эксимерных лазеров - это сложность удержания объемного сильноточного разряда высокого давления в течение длительного времени, из-за развития неоднородностей в разряде приводящих к его контрагированию [46]. Накачка в таких лазерах осуществляется от генераторов, которые формируют импульс возбуждения в единицы-десятки наносекунд и напряжением в десятки и сотни киловольт. К таким схемам накачки относятся LC-инвертор [47-50] и схема с перезарядкой емкости на емкость [51-54]. Принципиальные электрические схемы изображены на рисунке 1.6.



а)



б)

Рисунок 1.6 - Схемы питания разряда в эксимерных лазерах:

а) LC – генератор; б) схема с перезарядкой емкости на емкость

C_n - накопительная емкость, $C_{об}$ - обострительная емкость, РП - разрядный промежуток, К - коммутатор, R_z - зарядное сопротивление, искры - предыонизация.

Во всех схемах присутствуют 2 контура:

а) Контур с малой индуктивностью, включающий в себя обострительную (разрядную) емкость и разрядный промежуток.

б) Контур с большой индуктивностью, включающий в себя накопительную емкость и коммутирующие элементы.

Несмотря на схожесть элементов использующихся в схемах каждая схема имеет свои особенности использования.

1.3.1 LC – генератор с инвертированием напряжения

Схема генератора приведена на рисунке 1.6,а. Накопительные конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются через сопротивление R_z или индуктивность. При коммутации разрядника в контуре LC_1 начинается колебательный процесс и через время $\pi\sqrt{LC_1}$ происходит перезарядка емкости C_1 , в результате на

высоковольтном электроде возникнет напряжение больше напряжения пробоя разрядного промежутка.

К достоинствам этой схемы питания следует отнести небольшие значения питающих напряжений, более высокое по сравнению со схемой перезарядки емкости на емкость, нарастание напряжения на разрядном промежутке. Однако при перезарядке емкости C_1 , через коммутатор начинает течь большой ток, что накладывает свои условия на выбор коммутаторов, в качестве которых в такой схеме чаще всего используют искровой разрядник. Но такие разрядники имеют большие потери энергии, малый срок службы, порядка 10^5 импульсов. Кроме того, в данной схеме присутствует удвоенное число накопительных конденсаторов, что ведет к увеличению габаритов и стоимости изделия.

В настоящее время в литературе имеется большое количество экспериментальных результатов, полученных в результате исследований импульсно-периодических электроразрядных с автоматической УФ-предыонизацией эксимерных лазеров. В работе [47] с помощью LC – генератора, включающего в себя магнитное звено сжатия и тиратрон ТГИ 1-1000/25, осуществлялась накачка активной среды $HeCl$ лазера. В этом случае схема возбуждения позволила реализовать фронт роста напряжения до 30 кВ за время не более 80 нс, на имеющемся межэлектродном зазоре 21 мм.. Полученная энергия в импульсе достигала 120 мДж при КПД накопленной энергии в обострительных конденсаторах до 2%. В работе [48] при использовании LC-схемы накачки ArF -лазера максимальная энергия выходного излучения составила 550 мДж с полным КПД 1.36%. В качестве коммутатора использовался разрядник РУ-65.

В работе [49] исследовано влияние параметров накачки на эффективность работы газоразрядного эксимерного KrF -лазера на смеси $He - Kr - F_2$. Разработана теоретическая модель системы возбуждения и кинетических процессов в плазме такого лазера. Создана система накачки на

основе LC-инвертора с искровым разрядником в качестве высоковольтного коммутатора, автоматической УФ-предыонизацией и низкоиндуктивным разрядным контуром. Для увеличения КПД и энергии излучения KrF -лазера на смеси $He - Kr - F_2$ в работе предложено увеличить интенсивность накачки до 4 МВт/см^3 путем увеличения индуктивности между LC-инвертором и разрядным контуром до 100 нГн . Получена энергия генерации 1 Дж с КПД 2% .

В работе [50] для достижения максимальных значений энергии генерации и КПД $KrCl$ -лазера на смесях с буферным газом гелием применялась система возбуждения, в которой использовалась схема LC-инвертора, с высоковольтным коммутатором на основе искрового разрядника РУ-65. В $KrCl$ -лазере с активной средой на основе буферного газа He получена энергия генерации 320 мДж с КПД от запасенной в конденсаторах энергии 0.5% при зарядном напряжении 30 кВ . Длительность импульсов излучения составила $22 \pm 1 \text{ нс}$, а импульсная мощность - 15 МВт .

В работе [56] производилась оптимизация LC-генератора для KrF -лазера с буферным газом He . Достигнуты максимальная энергия 820 мДж и КПД 2.4% (при энергии 570 мДж). Лазер был способен работать с частотой повторения импульсов 50 Гц .

В работе [57] разработан электроразрядный KrF -лазер с индуктивно-емкостной стабилизацией разряда и частотой повторения импульсов до 4 кГц . Многосекционный разрядный промежуток с общей длиной 25 см формировался 25 парами анодно-катодных пластин. Максимальная энергия импульса генерации составила $\sim 6 \text{ мДж}$ для смеси $Ne - Kr - F_2$ при полном давлении $1.6\text{--}3.2 \text{ атм}$. Максимальная эффективность лазера была равна 1.4% .

В работе [58] исследован длинноимпульсный электроразрядный $HeCl$ -лазер с активным объемом $9 \times 6 \times 100 \text{ см}$. Для возбуждения лазера в [58] используется двухконтурная схема с импульсной зарядной накопительной емкостью, в качестве которой применялись бумажно-масляные конденсаторы, образующие формирующую линию. Коммутация накопительной емкости

осуществлялась многоканальным протяженным разрядником. Предыонизация лазерной смеси обеспечивалась рентгеновским излучением. Лазер генерировал импульс излучения длительностью 300 нс на полувысоте с энергией 10 Дж и равномерным распределением интенсивности по выходной апертуре.

1.3.2 Схема с перезарядкой емкости на емкость и искровой предыонизацией

Схема с перезарядкой емкости на емкость на рисунке 1.6,б. Зарядка накопительной емкости осуществляется от внешнего источника. При коммутации разрядника происходит зарядка разрядных емкостей C_p через искровые промежутки, обеспечивающие предварительную подсветку разрядного промежутка, по достижении на C_p напряжения пробоя происходит пробой разрядного промежутка и начинается формирование объемного разряда. В качестве коммутатора в данной схеме можно использовать промышленные тиратроны с ресурсом работы более 10^8 импульсов.

Данная схема достаточно технологична в изготовлении и надежна, на ней легко осуществить импульсно периодический режим работы с высокой частотой повторения импульсов.

В работе [60] авторы исследовали влияние межэлектродного расстояния и соотношение величин обострительной и накопительной емкости на выходную энергию генерации $HeCl$ лазера с буферным газом Ne . Исследования от давления буферного газа Ne и зарядного напряжения для $HeCl$ лазера с частотой включения до 7 Гц проводились в работе [60]. В обоих случаях энергия генерации была близка к 120 мДж с полученным КПД $\sim 1\%$. В работах [53,54] авторами изучалось влияния величины предыонизации на устойчивость горения разряда, а также зависимость эффективности работы лазера от интенсивности накачки. Следует отметить, что в работе [58] показывается, что при длительности импульса накачки $\sim 20-30$ нс для $HeCl$ лазера, с увеличением мощности накачки от 1,25 до 3 МВт/см³, КПД лазера падает от 2.3 до 1.7 %. В

этих работах, авторы использовали в качестве управляемого сильноточного коммутатора – тиратрон ТГИ 1-1000/25 или другой аналогичный тиратрон. При этом, искровые промежутки, осуществляющие УФ-предыонизацию, устанавливались либо в зарядном, либо в разрядном контуре при частичном или полном прокачивании через них энергии.

Следующей особенностью формирования активной среды в эксимерном электроразрядном лазере, является необходимость создания начальной концентрации электронов в разрядном промежутке перед вводом основной энергии в объемный разряд. По оценкам, приведенным в [59] концентрация начальных электронов должна составлять 10^5 - 10^7 см⁻³, а на практике необходимые значения концентраций лежат выше на 2 порядка 10^7 - 10^9 см⁻³. Такие высокие концентрации начальных электронов необходимы чтобы, электронные лавины, начавшиеся от каждого электрона, успевали перекрываться, до перехода разряда в квазистриммерный режим горения.

В электроразрядных схемах используют предыонизацию, как от отдельного источника, так и предыонизацию, которая осуществляется в автоматическом режиме.

Отдельный источник питания для предыонизации, как правило, используется в широкоапертурных лазерах, где разрядный промежуток имеет большие размеры, порядка 10x10 см [59,60]. При этом в качестве предыонизации используется рентгеновское излучение, так как оно обладает лучшей проникающей способностью по сравнению с УФ-излучением.

Автоматическая предыонизация наиболее часто используется в малоапертурных лазерах. В качестве предыонизации используется УФ-излучение, получаемое от дополнительного разряда - это может быть коронный разряд, искровой разряд, или разряд по поверхности диэлектрика.

Коронный разряд применяется для засветки разрядных промежутков порядка 1 см. В работе [58] такой вид разряда использовался для предыонизации разрядного промежутка 20x10 мм.

Искровая предыонизация представляет собой ряд сильноточечных искр, равномерно распределенных по длине электродов. Схема искровой предыонизации изображена на рисунке 1.7. Данные системы применяются на практике довольно часто для создания предварительной подсветки разрядного промежутка в лазерах с апертурой излучения до $5 \times 5 \text{ см}^2$ [48,54,60]. В работе [48] изменялось расстояние от края электрода до искровых промежутков (20-5 мм) и анализировалось ширина, однородность распределение энергии по сечению пучка, КПД. Было найдено оптимальное расстояние 10 мм для ArF -лазера.

В работе [56] исследовано влияние УФ подсветки разрядного промежутка на устойчивость и однородность объемного самостоятельного разряда в рабочих смесях нецепного HF -лазера в широком диапазоне изменения длительности тока разряда и величины энерговклада. Показано, что в лазерах с площадью катода $S \leq 300 \text{ см}^2$, а также в лазерах с длительностью токового импульса $T \leq 150 \text{ нс}$, роль подсветки сводится к стабилизации времени запаздывания и амплитуды напряжения электрического пробоя промежутка и выравниванию (за счет фотоэффекта) распределения плотности тока объемного самостоятельного разряда по поверхности катода.

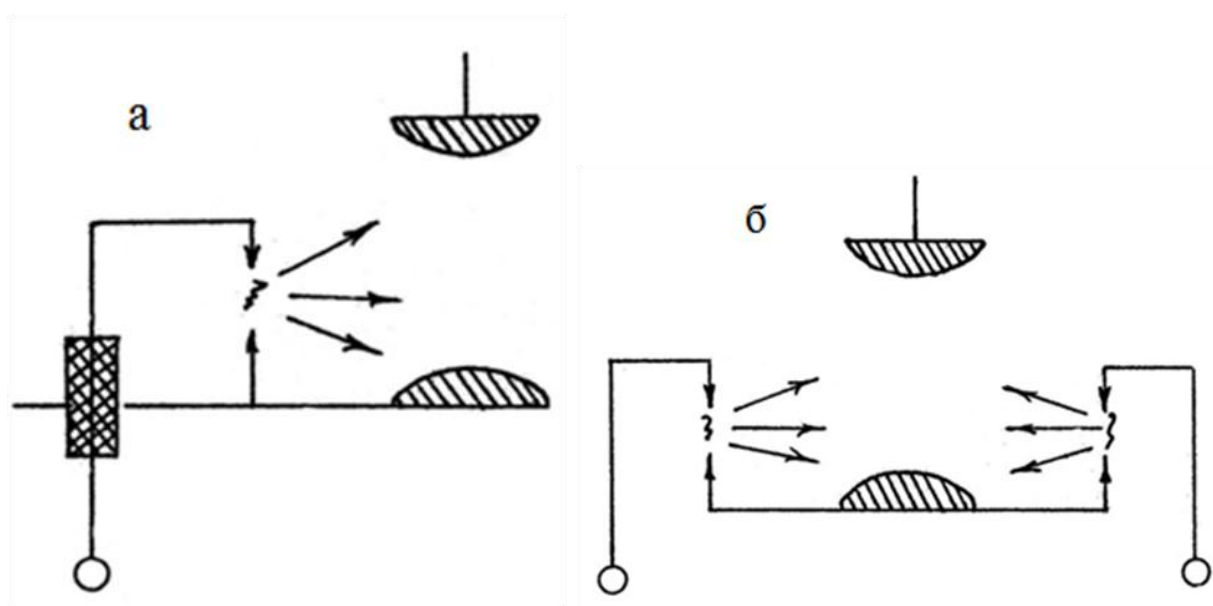


Рисунок 1.7 - Схема искровой предыонизации: а) односторонняя; б) двухсторонняя

Разряд по поверхности диэлектрика по сравнению с искровым, обеспечивает большую однородность засветки разрядного промежутка. Кроме того, его можно использовать в качестве плазменных электродов. Существенным его недостатком является то, что со временем диэлектрическая поверхность испаряется, что не только ухудшает условия горения объемного разряда, но уменьшает ресурс работы лазера на одной смеси. В работе [54] исследовалась система предыонизации с помощью скользящего разряда. Лазерная установка с 5-7 см межэлектродным промежутком давала энергию порядка 3 Дж при вкладе энергии в скользящий разряд порядка 25 мДж.

В работе [58] для ХеСl-лазеров с различными схемами накачки показано, что предыонизация наиболее эффективна вблизи момента ионизационно-прилипательного равновесия при изменении концентрации электронов на предпробойной стадии разряда.

1.4 Влияние системы предыонизации на работу ХеСl лазера

Влияние УФ-излучения искры на характер пробоя разрядного промежутка отметил еще Герц в 1887 г. В дальнейшем было показано [59], что предварительная подсветка газового объема уменьшает время развития пробоя, способствует формированию диффузного свечения на начальных этапах развития разряда. С увеличением интенсивности УФ-излучения уменьшается напряженность поля, при которой может возникнуть объемный разряд [51].

Важное практическое значение имеет вопрос о минимальной плотности электронов предыонизации, необходимой для однородного формирования разряда.

В предельном случае малого количества затравочных электронов происходит независимое развитие порождаемых ими лавин. Известно [50], что в окрестности отдельной лавины нарастает искажение внешнего поля полем пространственного заряда, который возникает в ходе ионизационного увеличения концентрации заряженных частиц в лавине. После того как лавина пройдет вдоль поля определенное расстояние и относительное искажение поля достигнет значения порядка единицы, дальнейшая ее эволюция будет носить так называемый стримерный характер, при котором она уже не будет конусообразно расширяться, а будет распространяться в виде канала.

Так же можно отметить, что необходимый для однородного пробоя уровень предыонизации можно снизить, если развитие разряда будет проходить при повышенном напряжении на промежутке, в частности, при более крутом фронте его нарастания. Другая закономерность состоит в том, что в заданных условиях по напряжению при увеличении уровня предыонизации выше значения, когда условие перекрытия лавин уже обеспечено, однородность пробоя продолжает повышаться.

Повышение как начального уровня предыонизации, так и подаваемого на электроды напряжения, или скорость его роста (что увеличивает частоту ионизации), также способствует улучшению однородности развития разряда, обычно нарушаемой объемным зарядом

В настоящее время для создания начальной концентрации электронов в газоразрядном объеме электроразрядных лазеров наиболее часто применяются источники УФ- и рентгеновского излучения.

1.4.1 Источники УФ-излучения

Подразделяется на две группы:

1) слаботочные - разряды типа коронного [61] или возникающего при зарядке распределенной емкости диэлектрика;

2) сильноточные - такие, как открытая искра [62] или завершённый разряд по поверхности диэлектрика [63].

Использование более сильноточных источников УФ-излучения в виде ряда сильноточных искр, равномерно распределённых по длине электродов, позволило увеличить энерговыход и удельную энергию лазерного излучения приблизительно на порядок по сравнению с системой, в которой предыонизация осуществлялась коронным разрядом [64]. Распределённость искровых источников (~ 20 шт.), создающих УФ-подсветку, достигалась [65] установкой сбоку вдоль каждой из сторон электродов с профилем Роговского ряда ёмкостей.

В настоящее время именно электроразрядные лазерные системы (ЭЛС) с искровой сильноточной предыонизацией нашли широкое применение при создании лазеров с апертурой $\sim 1\div 10$ см².

При увеличении межэлектродного расстояния источники УФ-излучения следует (во избежание каскадного пробоя) удалять на большое расстояние от основного промежутка. Это резко сказывается на уровне предыонизации при использовании газовых смесей с большим коэффициентом поглощения УФ-излучения. Расположение источников сбоку от электродов ограничивает возможность увеличения и ширины основного разряда, так как в этом случае пробой основного газового промежутка происходит в областях, расположенных наиболее близко к источнику УФ-излучения.

В литературе предложено несколько процессов, объясняющих появление фотоэлектронов в газовом объёме при УФ-облучении:

1. Фотоэмиссия электронов из катода. Работа выхода для многих материалов, из которых изготавливаются катоды, как правило, низка, поэтому фотоэмиссия может возникать при такой длине волны ультрафиолетового излучения, когда оно способно глубоко проникать в газ при высоком давлении.

2. Процесс двухступенчатой или многоступенчатой ионизации компонент газовой смеси, при котором на образование одного электрона затрачивается несколько фотонов.
3. Возбуждение атомов или молекул, способных при столкновении с другими тяжелыми частицами образовывать свободные электроны.
4. Фотоионизация примесей с достаточно низким потенциалом ионизации.

1.4.2 Рентгеновская предыонизация

К достоинствам предыонизации рентгеновским излучением можно отнести следующие:

- 1) увеличенная по сравнению с УФ-излучением глубина проникновения γ -квантов, что обеспечивает большую однородность распределения начальных электронов при увеличении межэлектродного расстояния, если рентгеновский предыонизатор расположен под одним из электронов;
- 2) рентгеновский источник может быть помещен достаточно далеко от газоразрядного объема, что при расположении его сбоку исключает развитие каскадного пробоя и расширяет возможности конструкторских решений;
- 3) исключается отрицательное влияние возмущений плотности газа, вызываемых искровым УФ-предыонизатором при импульсно-периодическом режиме работы лазеров.

К недостаткам следует отнести:

- 1) технологически более сложное устройство рентгеновского предыонизатора по сравнению с источниками УФ-излучения;
- 2) наличие ограничений на длительность импульса рентгеновского предыонизатора и на концентрацию создаваемых начальных электронов.

Исторически первый и наиболее распространенный способ получения рентгеновского излучения состоит в бомбардировке вещества мишени

заряженными частицами, ускоренными до достаточно большой энергии. При этом могут иметь место два механизма возникновения рентгеновского излучения.

При первом механизме рентгеновское излучение возникает как тормозное излучение заряженных частиц, взаимодействующих с полем атомов вещества. Спектр такого тормозного излучения имеет непрерывный характер, причем граничное значение длины волны не зависит от атомного номера вещества мишени и определяется только энергией заряженных частиц

$$h\nu_{gr} = E_{кин}.$$

Второй механизм состоит в возбуждении электронов внутренних электронных оболочек атомов вещества мишени и последующем излучении этих атомов. Спектр имеет линейчатый характер, однозначно определяемый атомным номером Z .

2 Экспериментальные приборы и методики измерений

Для измерения формы импульса и его временных параметров (в частности, длительность импульса τ_u , времен нарастания и спада и т.п.) используются быстродействующие фотоприемники с высокой линейностью световой характеристики. К ним, в первую очередь, относятся коаксиальные фотоэлементы серии ФЭК.

Регистрация вольт-амперных характеристик разряда осуществляется с помощью токового шунта, измеряющего ток одной из разрядных емкостей, а также омического делителя напряжения. При регистрации напряжения присутствовала индуктивная составляющая, которая учитывалась в расчетах характеристик разряда.

Шунт является измерительным преобразователем тока в напряжение. Шунт характеризуется номинальным значением входного тока $I_{ном}$ и выходного напряжения $U_{ном}$. Их отношение определяет номинальное сопротивление шунта $R_{ш} = U_{ном} / I_{ном}$. В нашем случае данное значение составляет 0,01 Ом.

Делитель напряжения – электротехническое устройство для деления напряжения постоянного или переменного тока на части. Любой делитель напряжения состоит из активных или реактивных электрических сопротивлений. В наших экспериментах для измерения напряжения использовался омический делитель напряжения. В данном случае это последовательное соединение резисторов. При переменном токе пользуются также ёмкостными делителями напряжения с конденсаторами постоянной или переменной ёмкости и индуктивными делителями напряжения.

Для исследования формы полученного электрического импульса используются цифровые осциллографы с полосой пропускания до 10^8 Гц. Дальнейший анализ осциллограммы проводится в программе Origin 8.

В работе для измерения временных характеристик и регистрации формы импульса лазерного излучения использовался фотоэлемент коаксиальный ФЭК-22СПУ. Измерение электрических импульсов в экспериментах осуществлялось

при помощи осциллографов Tektronix TDS3014 и TDS3032. Чтобы отсеять шумовую компоненту в сигнале, осциллографы размещались в экранированной комнате. Питание осциллографов осуществлялось через разделительный трансформатор и LC-фильтр.

Наиболее широкое распространение для измерения энергии и средней мощности, получили калориметры. Они имеют достаточно конструктивно развитый приемный элемент, не объединенный с чувствительным элементом. К достоинствам калориметров относятся широкий спектральный и динамический диапазон работы, высокая линейность, точность и стабильность характеристик, простота конструкции, возможность их использования с высокоточными, хотя и инерционными цифровыми приборами, возможность калибровки преобразователей по эквивалентному электрическому воздействию.

Любая калориметрическая система (рисунок 2.1) содержит внутреннее калориметрическое тело K (приемный элемент), в котором протекает процесс выделения (или поглощения) тепла, и внешнюю оболочку O , с которой происходит теплообмен калориметрического тела путем теплопроводности, конвекции и излучения.

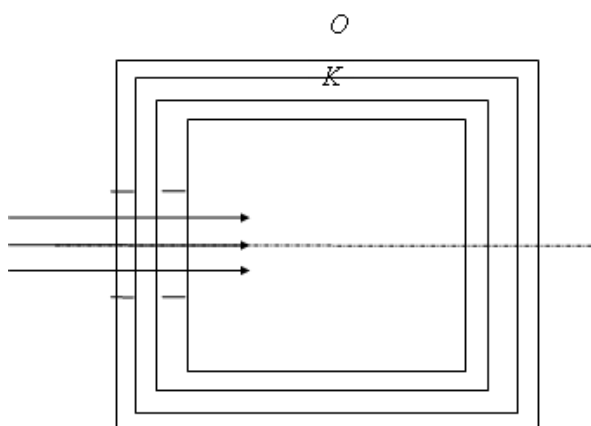


Рисунок 2.1 - Принципиальная схема калориметра

В данной работе, энергия и мощность излучения измерялась калориметром Gentec-E. Для более точного измерения малых значений энергии

использовался ФЭК-22СПУ (с предварительной калибровкой). Схема установки изображена на рисунке 2.2.

Длина волны лазерного излучения определялась с помощью спектрографа HR-4000 (Ocean Optics Inc.). Пространственная форма лазерного излучения регистрировалась на фотобумаге.

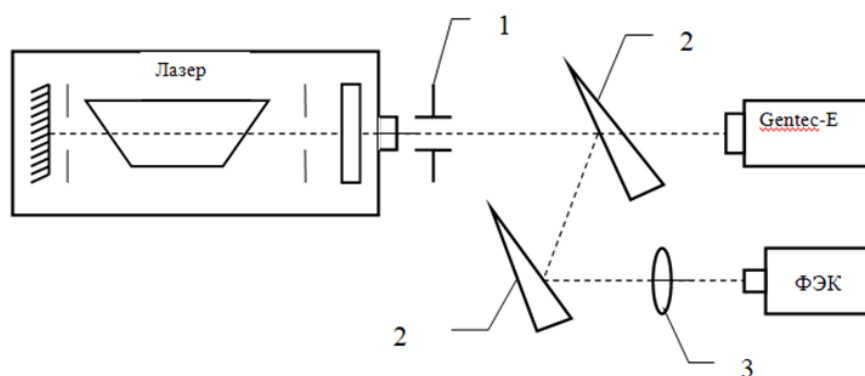


Рисунок 2.2 - Оптическая схема экспериментальной установки для измерения энергии и временной формы импульса. 1- выходная диафрагма; 2- кварцевый клин; 3- линза для расширения пучка на ФЭК

Для измерения скорости прокачки газа через разрядный промежуток в нашей работе использовался анемометр GEOS N11. Описательная схема прибора представлена на рисунке 2.3.

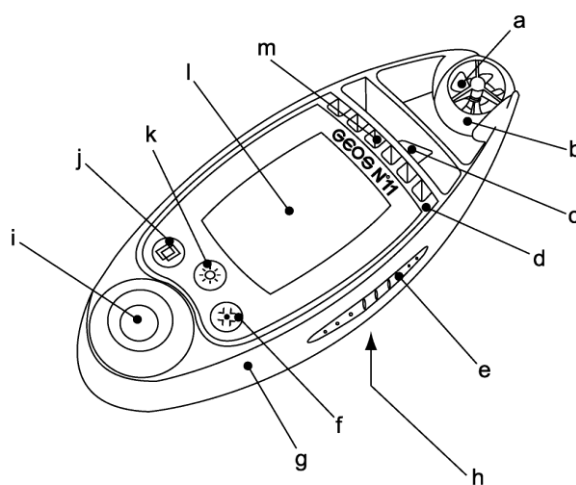


Рисунок 2.3 - Описание анемометра:

а – сенсор ветра(крыльчатка), b – защитная сфера вокруг крыльчатки, с – флюгер, d - черный металлический корпус, e – рифленая резиновая полоска, f - кнопка (*MOD*) изменения, j – кнопка (*SEL*) выбора, h – крышка отсека батарей, i – лампа светодиода(*LED*), k – кнопка (*LUM*) подсветки, l – экран из минерального стекла, m – защитные пазы сенсоров, g - пластиковый корпус

Для регистрации интегрального свечения объемного разряда использовалась фотокамера SONY.

Терморегулятор ОВЕН ТРМ10 предназначен для измерения температуры или другой физической величины (веса, давления, влажности и т. п.), импульсного или аналогового управления нагрузкой по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону, а также для формирования дополнительного сигнала, который может быть использован для сигнализации о выходе параметра за установленные границы или для двухпозиционного регулирования.



Рисунок 2.4 - ПИД-регулятор с интерфейсом RS-485 ТРМ210

Прибор ОВЕН ТРМ210 рекомендуется применять для управления объектами, обладающими повышенной инерционностью, где обычное двухпозиционное регулирование не обеспечивает необходимую точность. При использовании в качестве терморегулятора ОВЕН ТРМ10 может управлять как процессом нагрева, так и процессом охлаждения объекта.

3 Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1 Экспериментальная установка и ее характеристики

Внешний вид лазерной установки серии EL 1-100 представлен на рисунке 3.1.

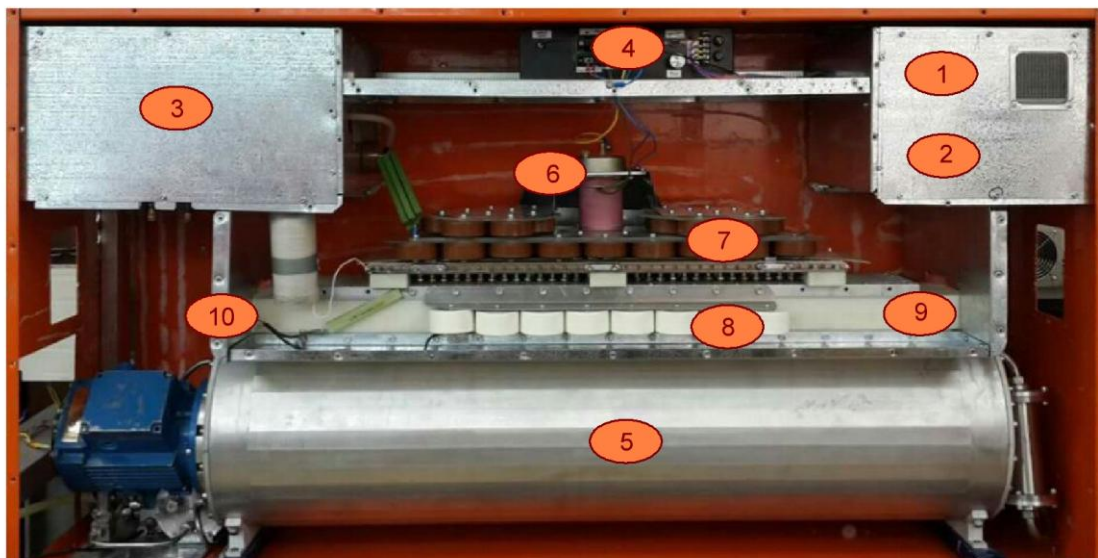


Рисунок 3.1 - Фотография лазерного макета без крышки:

- 1 - Блок задающего генератора, платы управления и связи с компьютером; 2 - Блок управления по сетевому питанию и автоматы защиты; 3 - Корпус высоковольтного источника питания; 4 - Источники питания тиратрона и генератор запуска; 5 - Газовый корпус лазера; 6 - Тиратрон ТПИ1-10к/20; 7 - Батарея накопительных конденсаторов; 8 - Батарея разрядных конденсаторов; 9 - Разрядная лазерная камера; 10 - Юстируемый фланец окна;

Технические характеристики эксимерного лазера EL-500-100

Наибольшая потребляемая мощность 5 кВт.

Зарядное напряжение на накопительной емкости составляет 22-24 кВ.

Лазер работает на смеси Ne:Xe:HCl - 900:15:1, находящейся под абсолютным давлением 3.5 атм.

Энергия генерируемого импульса излучения составляет 1 Дж

Длительность импульса на уровне половины

его мощности - 30 нс.

Размеры лазерного пучка в поперечном сечении 13x43 мм.

Длина волны излучения $\lambda \sim 308$ нм.

3.1.1 Система газонаполнения

Газовая система лазера относится к замкнутому типу. Рабочая смесь, заключенная в герметичную камеру объемом 100 литров, поперечно прокачивается через разрядный промежуток. Камера и электроды изготовлены из алюминия. После выработки ресурса газ из камеры откачивается, и лазер наполняется свежей смесью. Напуск трех компонентов рабочей смеси производится через пневматические клапаны непосредственно в камеру лазера; давление контролируется по встроенным манометрам.

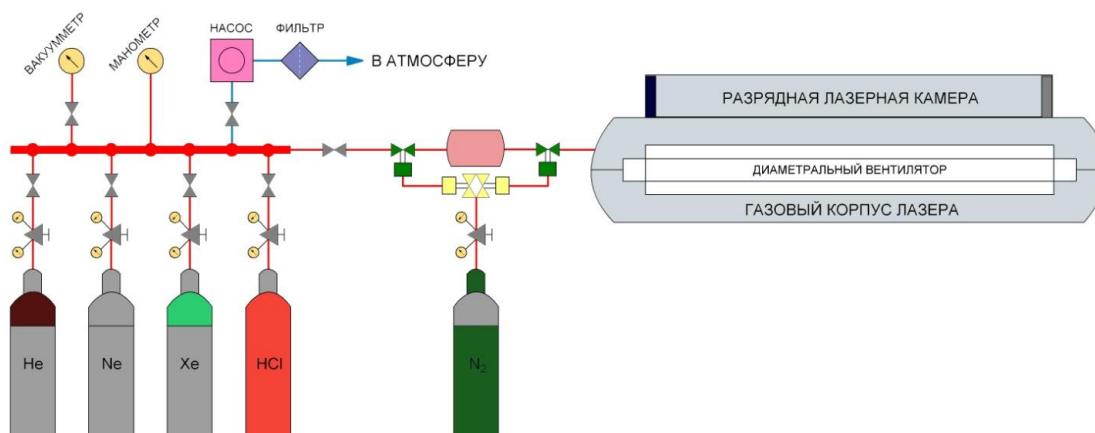


Рисунок 3.2 - Пневматическая схема системы газонаполнения.

Ресурс газовой смеси лазеров зависит в первую очередь от применяемого эксимера, а так же довольно сильно от примесей в рабочей смеси, материалов и от качества пассивации рабочих поверхностей разрядной камеры. Например, незначительное количество воздуха в рабочей смеси действует губительно на ресурс смеси. Также при длительной работе лазера,

где был применен в качестве изолирующего материала стеклотекстолит, в пылевидных продуктах работы измеряемые количества органических веществ, по структуре близких к пестицидам, возникающим, по всей вероятности, во время генерации из эпоксидных смол стеклотекстолита и HCl путем синтеза. Также имеют нежелательное влияние органические продукты разложения смазки, используемой в подшипниках циркуляционных вентиляторов.



Рисунок 3.3 - Фотография газового пульта лазера

В экспериментах, использовались газы следующей степени чистоты: Хе – 99,9987%, HCl – 99,4%, Ar – 99,98%, Ne – 99,99%, He – 99,99%.

3.1.2 Система термостабилизации газовой камеры

Одной из наиболее важных практических задач современной квантовой электроники является создание лазерных установок с высокими удельными характеристиками. Серьезным недостатком существующих лазеров является низкая эффективность преобразования электрической энергии в энергию когерентного излучения. Для повышения эффективности необходим правильный подбор и оптимизация всех систем и устройств, входящие в состав лазера, в частности системы охлаждения. За последние несколько десятилетий было поставлено большое количество экспериментов по совершенствованию схем охлаждения лазеров. Однако систематизации и анализа этих данных явно недостаточно, что не позволяет создать максимально эффективную систему охлаждения для реализации предельно достижимых величин мощности излучения и КПД лазера.

Система охлаждения проточной водой. Эта наиболее простая жидкостная система охлаждения относится к неавтономным разомкнутым одноконтурным системам и может быть применена там, где имеется вода соответствующего качества и необходимого напора.

При жидкостном охлаждении теплопровода удастся резко повысить эффективность системы охлаждения путем уменьшения теплового сопротивления «активное тело — хладагент» и реализации протока хладагента по каналам в теплопроводе.

В качестве хладагента (теплопроводящей жидкости) могут использоваться: вода, жидкости с низкой температурой замерзания (антифризы), жидкий и газообразный азот, фреон и др., — т. е. активное тело в предлагаемой конструкции может работать в широком диапазоне температур.

Из жидкостных систем охлаждения наибольшее распространение получили водяные системы. Это объясняется тем, что наряду с высокой стабильностью коэффициентов пропускания в области рабочих длин волн и

способностью отфильтровать инфракрасную часть спектра, вода обладает хорошими теплофизическими характеристиками и позволяет реализовать эффективные термостабилизирующие и теплоотводящие системы. Кроме того, вода доступна и абсолютно безопасна в работе. Однако при использовании воды в качестве охлаждающей жидкости элементов лазеров важное значение имеет ее жесткость, особенно в случае разомкнутых систем при питании их от водопроводной магистрали.

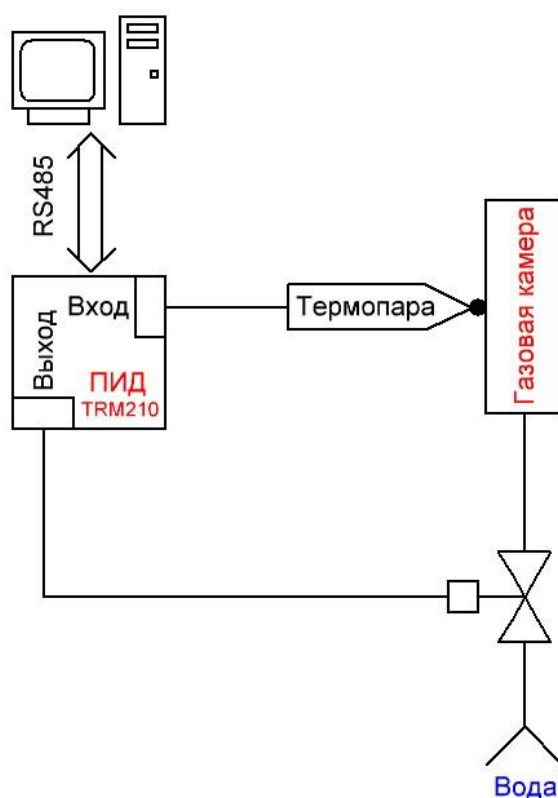
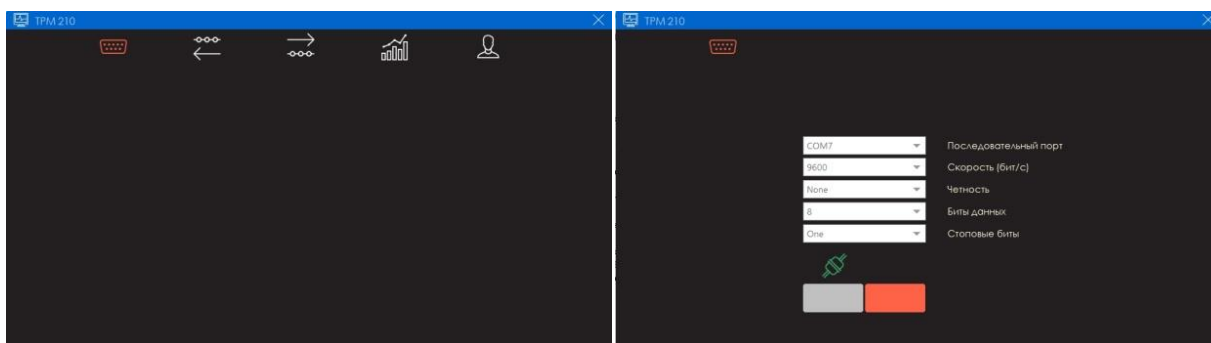


Рисунок 3.4 - Блок схема прокачки системы термостабилизации газовой камеры

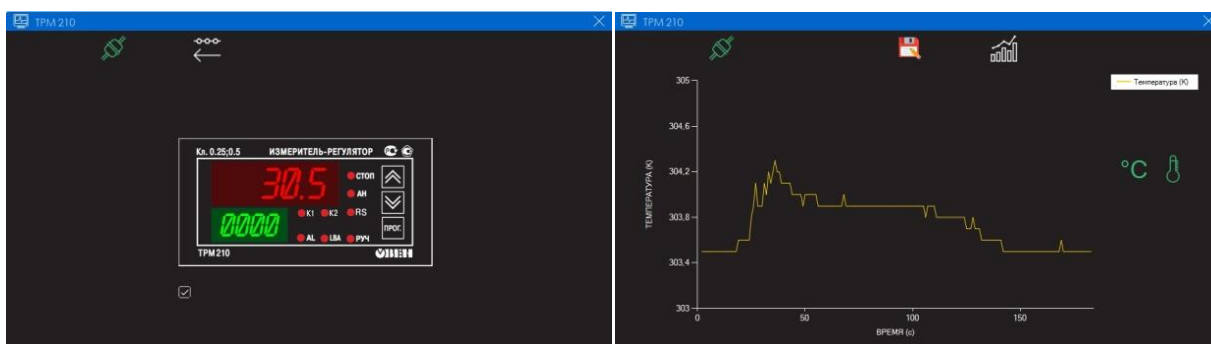
Поскольку температура активной среды непосредственно влияет на параметры излучения лазера, а ее нестабильность определяется системой охлаждения, то при разработке системы охлаждения необходимо предусматривать контроль температуры как активной среды, так и хладагента путем установки датчиков температуры - преобразователей значений температуры в электрический сигнал. Кроме того, датчики температуры служат

чувствительными элементами контуров автоматического регулирования или стабилизации температуры.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 3.5 - Скриншоты программы "TRM210"

Диапазон рабочих температур активной среды нашедших практическое применение лазеров составляет 200...600 К, а в большинстве случаев ее температура не существенно отличается от комнатной.

3.1.3 Программа управления работой лазерной системы

Для управления работой лазера используется персональный компьютер с разработанной и установленной на него программой. На монитор пользователя выводятся окна (Microsoft Windows) с необходимыми командами (рисунок 3.6).

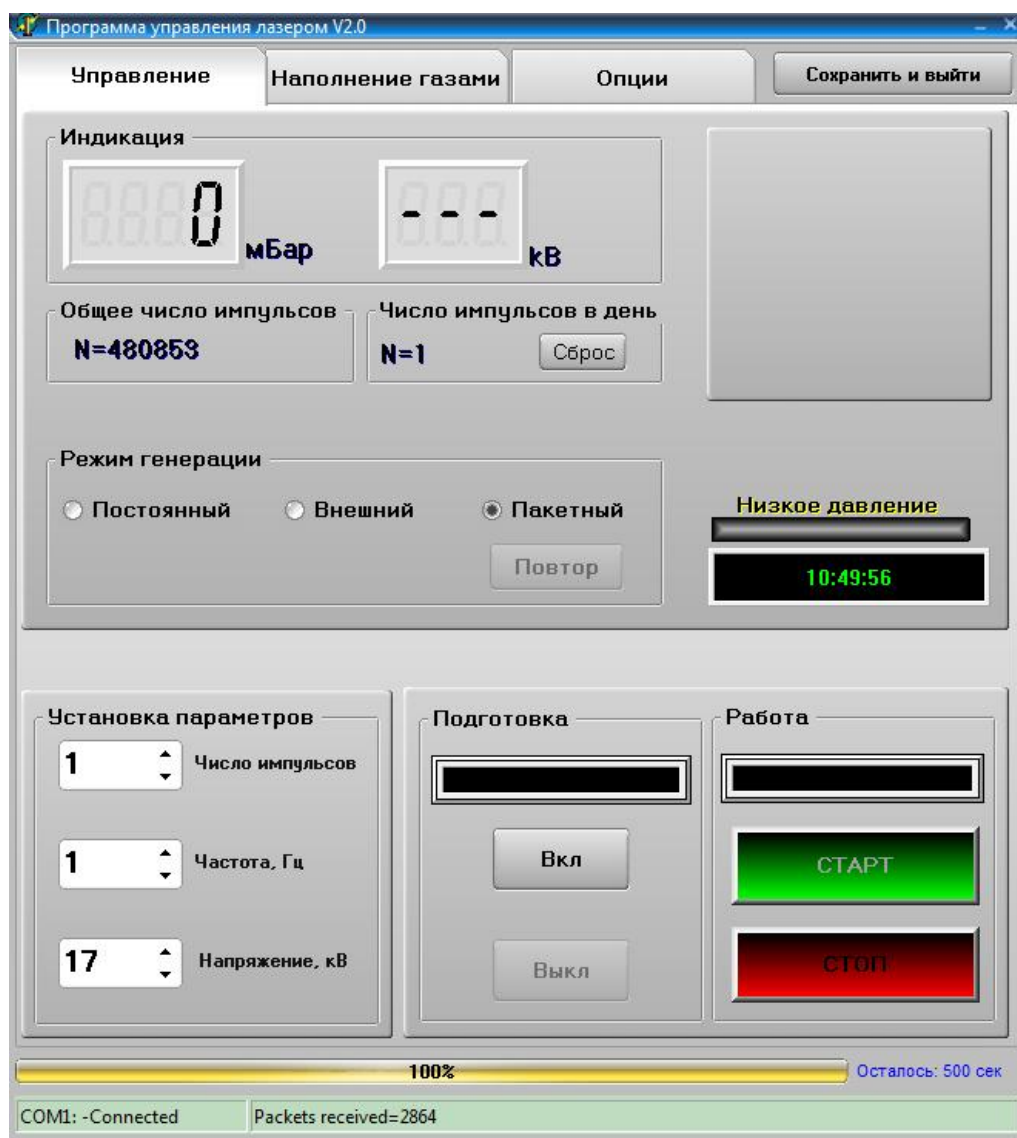


Рисунок 3.6 - Вид окна управления работой лазерной системы

На панель выводятся:

- напряжение зарядки накопительной батареи;
- давление в рабочей камере;
- счетчики импульсов;
- кнопки вкл/выкл питания системы;
- кнопки вкл/выкл питания генератора запуска;
- кнопки вкл/выкл запуска работы лазера;
- сигналы неисправностей и блокировок лазера;

- предупредительные сигналы работы лазера и срабатывания блокировок.

Наполнение газами происходит в автоматическом режиме. На рисунке 3.7 представлен вид окна управления газовой системой.

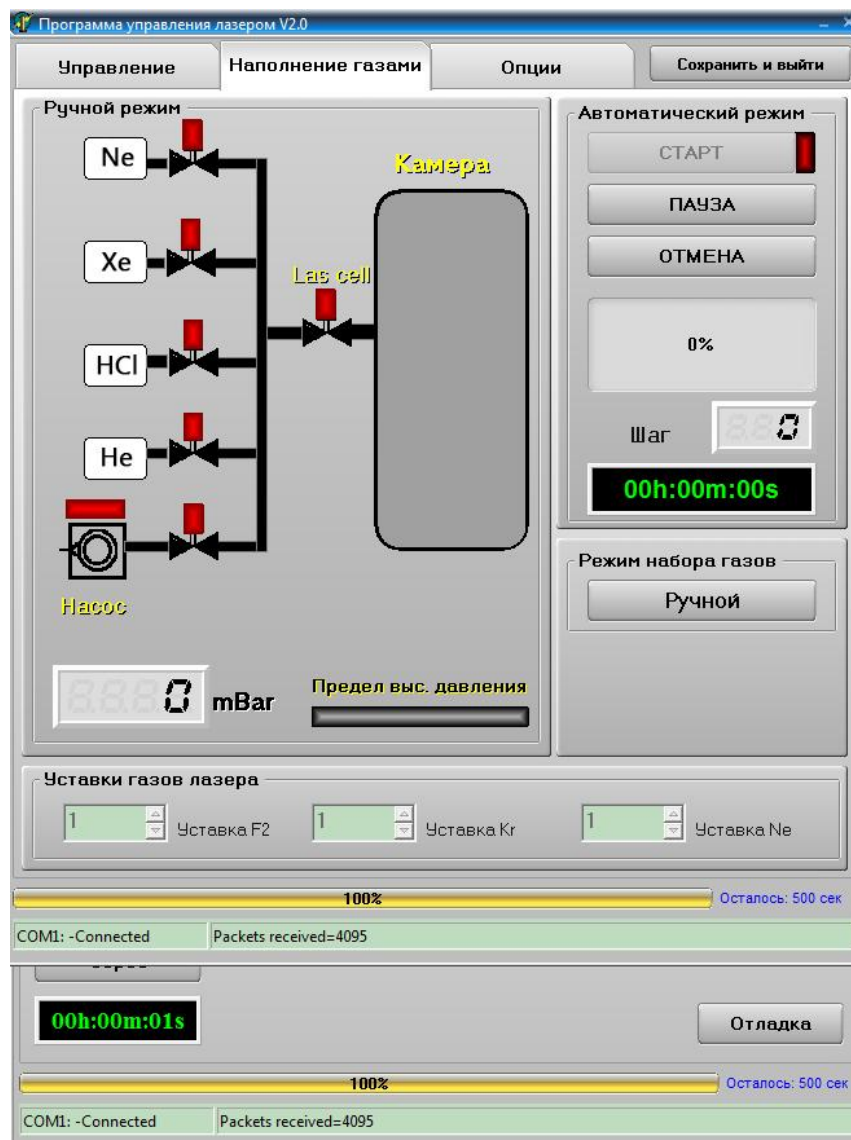


Рисунок 3.7 - Вид окна управления работой газовой системы

На панель выводятся:

- Давление в лазерной камере;
- Кнопка переключения режима ручной/автоматический;
- Кнопки управления клапанами для газовых трактов (Ne, He, Xe, Cl, насос, лазерная камера);

- Таблицы установок парциальных давлений в газовой смеси;
- Сигналы аварийных ситуаций.

3.1.4 Замена рабочей смеси в разряде

В отличие от режима одиночных импульсов, импульсно-периодический режим работы имеет свои особенности, обусловленные влиянием возмущений, вызванных предыдущими разрядными импульсами на последующие. Согласно работе [41] данное влияние вызывается следующими явлениями:

- 1) адиабатическим расширением пробки нагретого газа;
- 2) влиянием пограничных слоев на электродах;
- 3) ударными волнами;
- 4) акустическими колебаниями;
- 5) изменением состава рабочей смеси.

Наличие возмущений плотности газа при импульсно-периодическом режиме работы приводит к неоднородному распределению плотности газа в разрядном объеме, и как следствие, происходит контрагирование разряда, приводящее к неоднородности распределения выходного излучения по сечению пучка, уменьшению выходной мощности излучения, к механическим повреждениям электродов и т.д. Для избегания выше перечисленных последствий необходимо осуществлять смену газа в разрядном промежутке.

В работе [32] проводится теоретическая оценка необходимой скорости прокачки газа в разрядном промежутке. Расчет показывает, что скорость прокачки должна быть таковой, чтобы к моменту начала следующего импульса успевала происходить смена газа в промежутке в полтора раза больше, чем размер электродов в направлении прокачки. В этом случае влияние адиабатического расширения пробки нагретого газа от предыдущих разрядных импульсов на последующие будет незначительно. В работе [28] исследовались различные конструкции камер прокачки изображенных на рис. 6. Газовый

поток в обеих камерах создавался диаметрально противоположными вентиляторами, который приводился в движение электродвигателем через магнитную муфту. Скорость потока в камере, у заземленного электрода составляла 3 м/с, а у высоковольтного электрода 4-5 м/с (при 1500 об/мин). Рост мощности лазера при увеличении частоты прекращался при достижении частоты повторения импульсов 175 Гц. Авторы связывают это с тем, что нагретый газ не успевает выйти из разрядного промежутка. В камере, изображенной на рис. 6б, граничная частота составила порядка 400 Гц (скорость прокачки 24 м/с), а уменьшение мощности объяснялось влиянием акустических колебаний, для подавления которых необходимо устанавливать глушители.

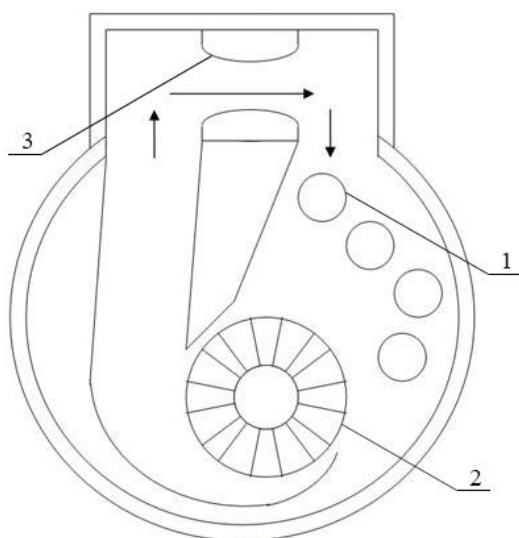


Рисунок 3.8 - Схемы прокачки рабочей смеси

1 - охлаждающий элемент; 2 - диаметральный вентилятор; 3 - электроды

В работе [33] частота повторения импульсов KrF лазера 4-5 кГц реализуется при скорости прокачки газа в межэлектродном промежутке $v = 55$ м/с. Дальнейшее увеличение скорости прокачки в 1.5-2 раза для достижения еще более высокой частоты повторения представляет собой достаточно сложную техническую задачу. В [34] частота повторения импульсов HeF лазера 4 кГц получена при $v < 20$ м/с. Этот результат был достигнут за счет использования многосекционного пластинчатого электродного узла [35],

который обеспечивал предельно малую ширину разряда и его индуктивно-емкостную стабилизацию.

Кроме скорости прокачки важным параметром является профиль скоростей газового потока в разрядном промежутке. В лазере, работающем в импульсно-периодическом режиме, скорость прокачки в центре разрядного промежутка составляла 30 м/с и плавно спадала к краям [32]. При этом мощность генерации, линейно возрастающая при увеличении частоты следования импульсов, спадала до нуля уже при частоте 20 Гц. При применении сглаживающей решетки (с прозрачностью 0.6) скорость потока составляла 6 м/с, а неоднородность не превышала 10%. При таких условиях частота следования импульсов без уменьшения мощности составляла 100 Гц.

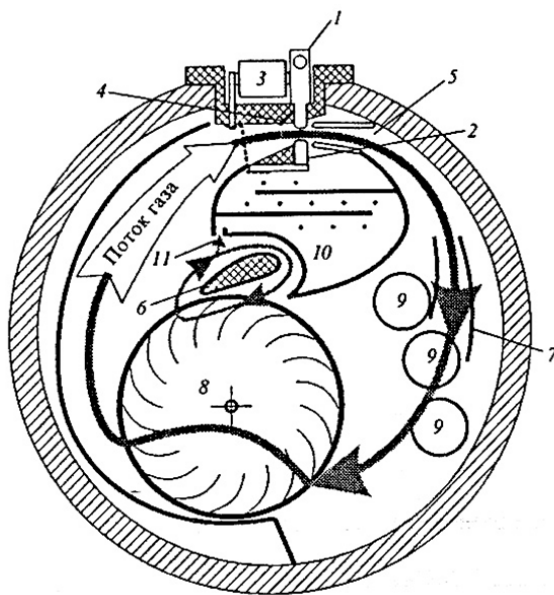


Рисунок 3.9 - Схема прокачки газа азотного лазера

1- катод, 2- анод, 3- обостряющая емкость, 4- ножевой преионизатор, 5- диффузор, 6- вихреобразователь, 7- направляющие потока, 8- диаметральный вентилятор, 9- радиаторы охлаждения, 10- электростатический фильтр, 11- вход газа в электростатический фильтр

Кроме наличия сглаживающей сетки на однородность газового потока влияет также форма конструкции камеры прокачки и плавность сопряжения электродов со стенками газового канала. В работе [36] была разработана камера

прокачки для азотного лазера и изображенная на рис. 7. В отличие от обычной системы прокачки, эта схема содержит вихреобразователь в выходном патрубке. Такой вентилятор развивает примерно в 3 раза большее относительное давление в области малых производительностей. Следует отметить, что при скорости прокачки газа 24 м/с (частота вращения вентилятора 5800 об/мин) и частоте повторения импульсов 6.1 кГц наблюдалось резкое падение мощности. Уменьшение мощности авторы связывают с образованием высокоионизированной плазмы (вследствие меньшей скорости прокачки у электродов) в приэлектродных слоях, которая искажает поле, формируемое электродами.

3.1.5 Расчет охлаждения газовой смеси теплообменника

При расчете аэродинамического сопротивления теплообменника скорость газового потока в нем оценена равной 4,8 м/с.

В течении импульса возбуждения в разрядном промежутке в газ вкладывается энергия.

При объеме активной области:

$$V = a_{pn} \cdot d \cdot l = 9 \cdot 10^{-3} \cdot 2,8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,65 = 163,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Температура газа увеличивается следующим образом:

$$\Delta T = Q/mc$$

где $Q = 20$ Дж,

$$m_{Ne} = \rho \cdot V = 0,9 \cdot 163,8 \cdot 10^{-6} = 147,42 \cdot 10^{-6} \text{ кг},$$

$$\Delta T = \frac{20}{1030 \cdot 3,7 \cdot 147,42 \cdot 10^{-6}} = 35,6 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

После прохода промежутка, до теплообменника, объем газа, в который была вложена энергия, разбавляется в 60 раз.

Следовательно, ΔT после разбавления:

$$\Delta T = 35,6/60 = 0,59 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температура смеси, подходящей к теплообменнику составляет:

$$T = 40 + 0,59 = 40,59 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{отводимая} = S \cdot Q = S \cdot \lambda_m^{Ne} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5)$$

$$S = S_{ребер} + S_{гладкой\ трубы} = [(\pi d^2 - \pi d_n^2) \cdot 130 \cdot 2 + \pi d (L_{pn} - 130 \delta_{pn})]$$

$$S_{ребер} = (\pi r^2 - \pi r_n^2) \cdot 130 \cdot 2, \quad (6)$$

где 130-количество ребер одной трубы,

2-количество сторон одного ребра,

$$S_{ребер} = 3,14 \cdot ((19 \cdot 10^{-3})^2 - (8 \cdot 10^{-3})^2) \cdot 2 \cdot 130 = 242 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S_{гладкой\ трубы} = 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \cdot (0,9 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 130) = 35 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S = 242 \cdot 10^{-3} + 35 \cdot 10^{-3} = 277 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S_{четырёх\ труб} = 4 \cdot 277 \cdot 10^{-3} = 1,108 \text{ м}^2$$

Для нахождения температуры газовой смеси в камере необходимо приравнять мощность, вводимую в смесь и мощность, отводимую с помощью теплообменника. Вводимая энергия поступает из двух каналов: энергия, вкладываемая в смесь объемным электрическим разрядом в разрядном промежутке (составляет 2000 Вт), и энергия нагрева смеси в результате работы вентилятора (составляет порядка 150 Вт).

Таким образом, для достижения баланса в камере должно соблюдаться равенство:

$$P_{отводимая} = P_{вводимая} = 2000 + 150 = 2150 \text{ Вт}$$

$$Q_{отводимая} = S \cdot Q = S_{четырёх\ труб} \cdot \lambda_m^{Ne} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (7)$$

$$\Delta x = S_p / 2 = 5,5 / 2 = 2,75 \text{ мм}$$

Из уравнения баланса мощностей найдем разницу температур между газовой смесью и водой в оребренных трубах теплообменника:

$$P = 1,108 \cdot 0,342 \cdot \frac{\Delta T}{2,75 \cdot 10^{-3}}$$

$$P = 137,82 \cdot \Delta T = 2150$$

$$\Delta T \approx 15,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Отсюда, при температуре воды 15°C, температура смеси будет составлять порядка 30,6°C, что достаточно для нормальной и устойчивой работы лазера.

Магнитная муфта.

Связь мощности вентилятора $P_{\text{вент}}$, скорости обращения $n_{\text{об}}$, и момента силы магнитной муфты M :

$$P = F \times l \cdot \omega, \quad (8)$$

где F - сила,

l - плечо силы,

$$\omega = 2\pi f, \quad (9)$$

где ω - круговая частота,

f - частота оборотов привода вентилятора,

$$F = m \cdot a, \quad (10)$$

где $a = g = 9,81 \text{ м/с}^2$,

m - масса груза, закрепленного на рычаге с плечом l .

Тогда:

$$P = m \cdot a \cdot l \cdot 2\pi f, \quad (11)$$

$$M = m \cdot l, \quad (12)$$

Отсюда:

$$P = M \cdot 2\pi \cdot n \cdot a = M \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot n \cdot 9,81 = M \cdot n \cdot 1,03 \approx M \cdot n$$

В таблице 3 представлена зависимость необходимого момента силы M магнитной муфты от оборотов и мощности вентилятора.

Таблица 2 – Зависимость необходимого момента силы M магнитной муфты от оборотов и мощности вентилятора, кг·м

п, об/мин												
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

$P_{\text{вент}}$												
50	0,10	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
100	0,20	0,13	0,10	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03
150	0,30	0,20	0,15	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
200	0,40	0,27	0,20	0,16	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07
250	0,50	0,33	0,25	0,20	0,19	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08
300	0,60	0,40	0,30	0,24	0,22	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10
350	0,70	0,47	0,35	0,28	0,26	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12
400	0,80	0,53	0,40	0,32	0,30	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,15	0,13
450	0,90	0,60	0,45	0,36	0,33	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18	0,16	0,15
500	1,00	0,67	0,50	0,40	0,37	0,33	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17

В муфте использовались магниты 50×20×10.

Состав: неодим-железо-бор.

В лазере установлена компактная магнитная муфта в коаксиальном исполнении, состоящая из четырех магнитов во внешней обойме и двух магнитов на вале, размешенном в разделительном стакане. По результатам проведенных измерений момент силы муфты равен 0,5 кг·м. При оборотах двигателя 2730 мин⁻¹ и мощности двигателя 250 Вт. Необходимый момент муфты составляет $\approx 0,09$ кг·м (таблица 2).

3.1.6 Погрешности измерений

Все экспериментальные графики, приведенные в работе, построены по среднему значению из 3–6 измерений. Ошибка измерений большинства регистрируемых параметров определялась погрешностью используемых приборов. Систематическая ошибка измерений, вносимая приборами, не превышала 10 %. При анализе спектральных линий или измерении расходимости, сначала определялась среднеквадратичная ошибка по формуле:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_i)^2}{n-1}} \quad (13)$$

где, $\bar{x}$ - среднее значение измеряемых величин, x_i - измеряемая величина, n - число измерений.

А затем, задавая доверительную вероятность по Стьюденту [30] ($\alpha = 0.95$), вычислялась величина доверительного интервала:

$$\Delta x = \frac{t_\alpha \cdot S_n}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

В нашем случае суммарный интервал погрешностей измерений не превышал величину 15–20 % , что позволяет говорить о достоверности полученных в работе результатов и выводов.

3.1.7 Описание схемы накачки электроразрядного эксимерного лазера

Известно, что для эксимерных лазеров требуется относительно высокий уровень интенсивности накачки. В электроразрядных эксимерных лазерах интенсивность накачки составляет от нескольких десятых до нескольких единиц МВт/см³, причем для различных типов эксимерных лазеров оптимальные значения этого параметра, определяемые с точки зрения максимальной эффективности накачки существенно различны.

При прочих равных условиях возбуждения эксимерных лазеров оптимальная мощность энерговклада может зависеть от типа используемой электрической схемы возбуждения (LC-инвертор, емкостная перезарядка, системы с высоковольтным предымпульсом и т. д.).

В настоящей работе рассмотрена типичная двухконтурная схема возбуждения электроразрядного эксимерного лазера, выполненная по типу LC-инвертор с автоматической искровой предыонизацией (ИП). Предыонизация

разрядного промежутка (РП) осуществляется УФ - излучением, которое возникает при срабатывании искровых промежутков (ИП), установленных в электрической цепи.

Данная схема достаточно технологична в изготовлении и надежна, на ней легко осуществить импульсно-периодический режим работы с высокой частотой повторения импульсов.

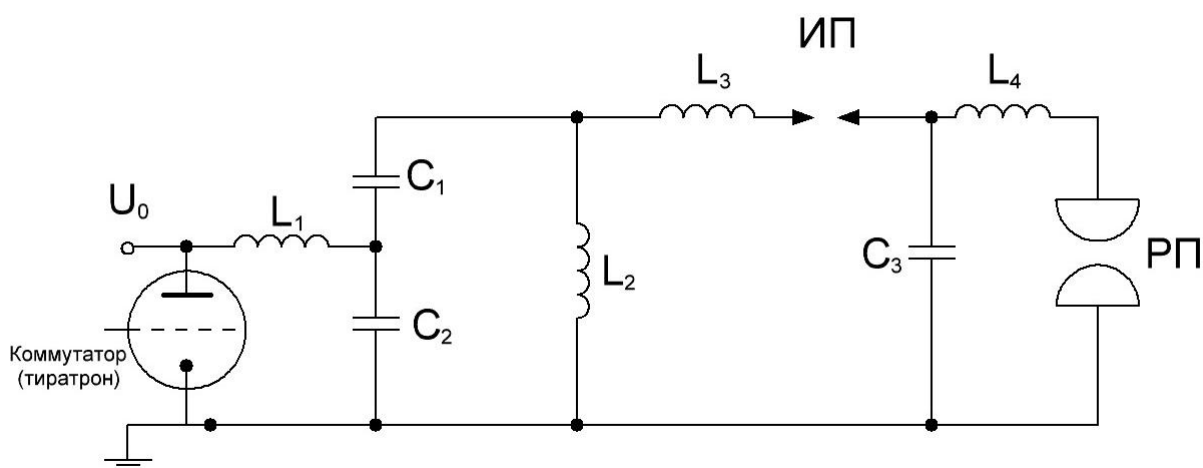


Рисунок 3.10 - Принципиальная электрическая схема накачки эксимерного лазера

На рисунке 3.10 приведена принципиальная электрическая схема, состоящая из зарядных емкостей C_1 и C_2 , коммутатора (тиратрон), зарядного сопротивления R_3 , разрядных емкости C_3 и индуктивности L_2 , металлических электродов, искровых промежутков (ИП) и разрядного промежутка (РП).

Электроразрядный эксимерный лазер включает в себя газонаполненный корпус (1), на котором установлена протяженная капролоновая разрядная камера (2) с газовой смесью и протяженным высоковольтным фланцем. В разрядной камере (2) расположены протяженные основные металлические электроды (3) для зажигания разряда накачки и дополнительные электроды (4) для предыонизации межэлектродного промежутка. На торцах разрядной камеры располагался резонатор лазера, который был образован плоским зеркалом с Al-покрытием и плоскопараллельной кварцевой пластиной.

Для обновления газа в зоне разряда между очередными разрядными импульсами лазер содержит систему циркуляции газа, включающую диаметральный вентилятор (6), охлаждаемые водой трубки (7) теплообменника и протяженные направляющие лопасти (8) для формирования газового потока. Газонаполненный корпус (1) также содержит фильтр (9), в частности электростатический, для чистки газовой смеси лазера от продуктов эрозии (рисунок 3.11).

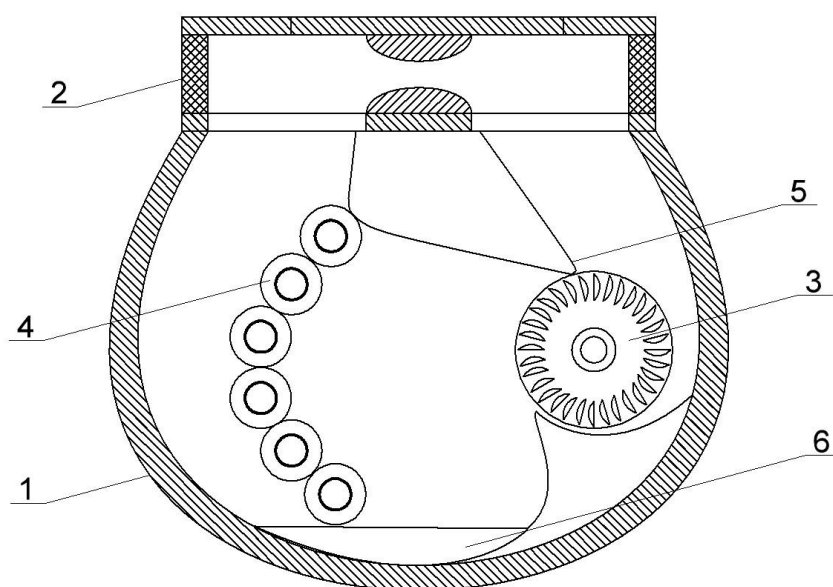


Рисунок 3.11 - Поперечное сечение лазера:

1 - газонаполненный корпус; 2 - разрядная камера; 3 - диаметральный вентилятор;
4 - трубки теплообменника; 5 - направляющие лопасти; 6 - электростатический фильтр

На рисунке 3.11 представлена поперечное сечение ХеСl лазера, разработанного в ИСЭ СО РАН (г.Томск). Лазер работает при частоте импульсов до 100 Гц.

Принцип работы лазера заключается в следующем. Зарядка накопительных конденсаторов ($C_1=120$ нФ и $C_2=63$ нФ набирались из конденсаторов TDK UNV-6A, 2700pF & 30kV) до напряжения 23 кВ, осуществлялась от высоковольтного источника питания. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТПИ-10к/25. Запуск тиратронов

осуществлялся с помощью генератора высоковольтных импульсов. Оптимальное значение индуктивности первого контура $L_1 = 120$ нГн позволяет обеспечить эффективную перезарядку первого конденсатора на второй (передается более 90% энергии) за сравнительно большое время ~ 150 нс. В максимуме напряжения на конденсаторе второго контура ($C_3 = 40$ нФ, набирались из конденсаторов TDK UHV-6A, 2700 pF & 30 kV) пробивается разрядный промежуток и создается активная среда лазера. Компонировка лазерной камеры и конденсаторов C_3 позволяет достигнуть малой индуктивности $L_2 = 4$ Гн в разрядном контуре, что обеспечивает малую длительность импульса накачки и большой ток в плазме (до 65 кА).

Электроды (3), длина которых составляет 65 см, выполнены с радиусом закругления 8 см. Расстояние между электродами было равно 4,3 см. Эффективная ширина разряда составляла 13 см. В XeCl - лазерах использовалась газовая смесь Ne/Xe/HCl = 900/15/1 при полном давлении 3,5 атм. Длина резонатора лазера составляла 100 см, зеркала имели коэффициенты отражения 0,95 и 0,07. Объем лазерного блока 10 л, что позволяло длительное время работать без замены рабочего газа. В экспериментах использовался внутренний резонатор, образованный плоским зеркалом с покрытием Al и плоскопараллельной кварцевой пластиной.

3.2 Результаты проведенного исследования

В работе производились исследования энергии излучения лазера, в зависимости от: давления смеси, зарядного напряжения, а также измерялась временные зависимости напряжений на конденсаторах, тока текущего через конденсаторы, зависимость КПД лазера и энергии излучения от зарядного напряжения.

В плазму поступает электрическая мощность от схемы питания, которая распределяется по частицам. Концентрации частиц увеличиваются, происходит

накопление энергии на возбужденных уровнях. Одновременно, частицы обмениваются энергией в процессах взаимодействия. За время нарастания мощности, поступающей из схемы питания, до максимального значения, в плазме можно выделить три характерные стадии ее развития.

На первой стадии происходит прямая ионизация и прямое возбуждение атомов ксенона. Большая часть мощности, поступающей в плазму, расходуется на рост концентрации возбужденных атомов. Происходит накопление энергии на возбужденных атомах ксенона. С ростом концентрации возбужденных атомов увеличиваются скорости их прямого тушения, с переходом в основное состояние, а также сильно увеличиваются частоты и скорости ступенчатых процессов возбуждения и тушения. В отдельном акте ступенчатых процессов передается сравнительно малая энергия, однако их скорости значительно больше, чем скорости прямых процессов. Ступенчатые процессы возбуждения и тушения устанавливаются, а также отслеживают определенное соотношение концентраций частиц на возбужденных уровнях.

На второй стадии происходит переход от прямой ионизации к ступенчатой. Возбужденный атом получает дополнительную порцию энергии от электрона и переходит в ионизованное состояние. Ионизация происходит под действием двух потоков мощности, а именно, мощности, поступающей на возбуждение и дополнительной мощности, поступающей от электронов. В этой стадии замедляется рост концентрации возбужденных атомов, а концентрация электронов увеличивается ускоренно.

Третья стадия развития разряда соответствует области максимальной мощности накачки. В этой стадии концентрации частиц выходят на максимальные значения. Мощность накачки не расходуется на рост концентрации частиц. Баланс мощности накачки включает: возбуждение, ступенчатую ионизацию, потери мощности в упругих столкновениях электронов и прочие потери, основную часть которых составляет возбуждение

молекул HCl . В конечном итоге, после рекомбинации мощность накачки расходуется на нагрев газа и сравнительно малая ее часть уходит на излучение.

Активный объем лазера составлял $V = d \times w \times l \approx 351 \text{ см}^3$ (где, $d = 4,3 \text{ см}$ - межэлектродное расстояние, $w = 1,3 \text{ см}$ - ширина разряда, $l = 65 \text{ см}$ - длина разрядной зоны). Эксперименты проводились при давлении газа в разрядной камере $p = 3,5 \text{ атм}$.

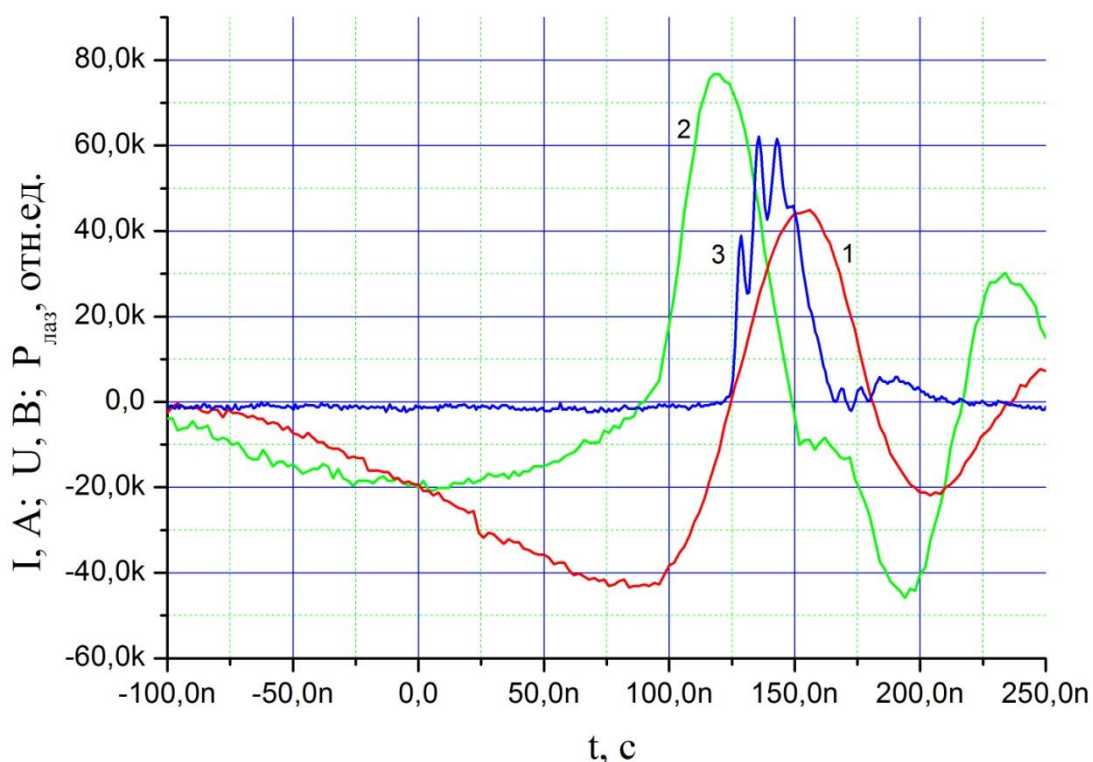


Рисунок 3.12 - Временное поведение напряжения (1) и тока (2) на емкости C_3 , длительность импульса (3) лазера EL-1-100.

На рисунке 3.12 представлено типичное временное поведение тока и напряжения на конденсаторе C_3 для газовой смеси $Ne:Xe:HCl - 900:15:1$ при давлении 3,5 атм и зарядном напряжении 23 кВ.

Энергия генерации зависит от энергии, запасаемой в обостряющей емкости $W_C = C_3 U_m^2 / 2$ где, U_m - величина максимального напряжения на разрядном промежутке в момент пробоя РП. Поэтому для анализа поведения W_g необходимо знать характер изменения U_m . Чтобы эффективно возбудить

HeCl-лазер необходимо энергию из накопительных конденсаторов $C_1 + C_2$ вложить с минимальными потерями в плазму разряда в режиме максимальной мощности накачки.

Основное внимание исследований было обращено на повышение эффективности генерации лазеров. На рис. 24. представлены экспериментальные зависимости полного КПД лазеров от зарядного напряжения U_0 . Полный КПД лазера определялся как отношение энергии лазерного излучения к энергии, запасенной в начальных емкостях C_1 и C_2 . Поведение кривых по выходной энергии, измеренные экспериментально и рассчитанные с помощью численной модели совпадают с удовлетворительной точностью.

На рисунке 3.13 приведены экспериментальные зависимости поведения энергии излучения и КПД лазера от зарядного напряжения.

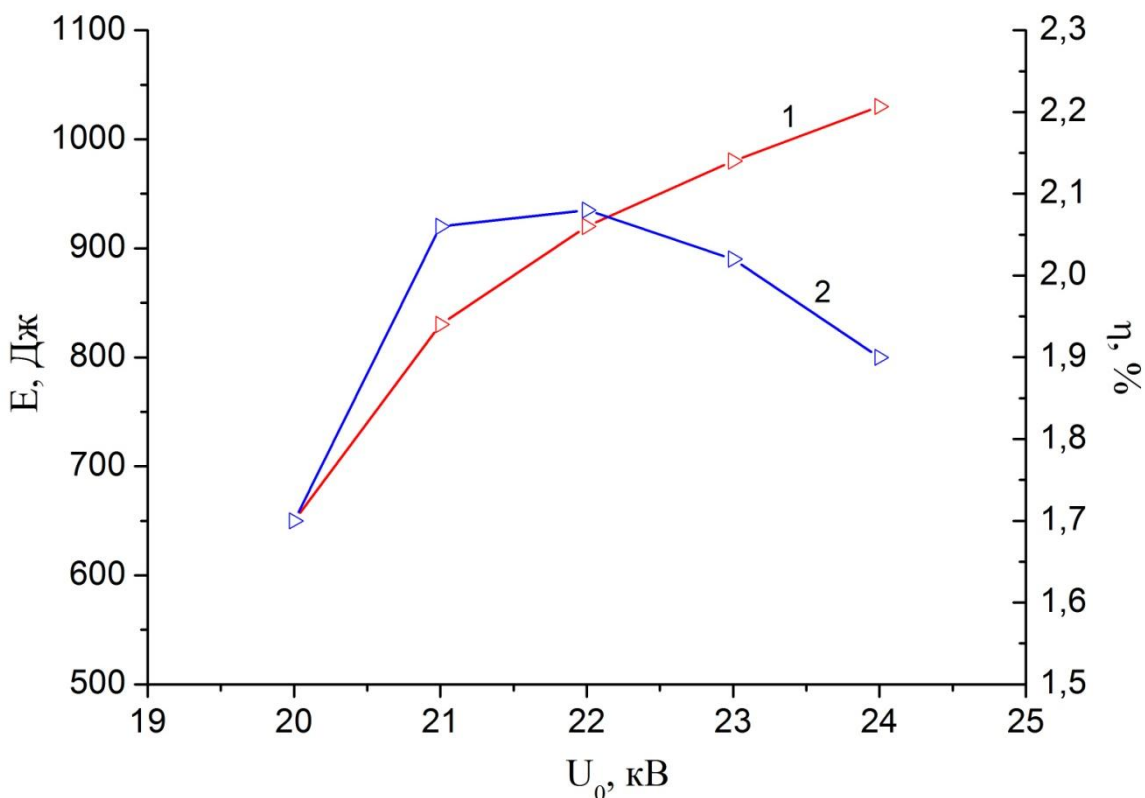


Рисунок 3.13 - Зависимость КПД лазера (2) и энергии излучения (1) от зарядного напряжения. Смесь Ne:He:HCl = 900:15:1 при общем давлении 3,5 атм.

Видно, что для лазера EL-1-100 максимальный КПД составляет 2,08%. Данное значение КПД реализовывалось при $U_0 = 22$ кВ. При повышении зарядного напряжения до 24 кВ эффективность лазера снижалась до 1.9%.

С целью определения причины такого снижения КПД лазера EL-1-100 был проведен анализ эффективности передачи запасенной энергии из емкостей C_1 и C_2 в C_3 и внутренней эффективности генерации от энергии, вложенной в разрядную плазму. Из приведенных зависимостей видно, что основной причиной снижения полного КПД лазера является уменьшение эффективности передачи энергии из емкости C_1 в C_2 . Для повышения этой эффективности был увеличен зазор разрядного промежутка с 29 до 43 мм. С большим зазором при зарядном напряжении 23 кВ в смеси $\text{Ne:Xe:HCl} = 900:15:1$ при давлении 3.5 атм эффективность передачи энергии из C_1 и C_2 в C_3 увеличилась, а полный КПД лазера вырос до 2,06% (был 1.76%). В наших экспериментах лучшая ситуация для совокупности этих критериев была реализована в лазере EL-1-100.

Фотография интегрального во времени свечения разряда показана на рисунке 3.14. Плотность тока объемного разряда составила 600 А/см^2 .



Рисунок 3.14 - Интегральное по времени свечение разряда для смеси $\text{Ne:Xe:HCl-900:15:1}$, при давлении $P = 3,5$ атм. $C_1 = 120$ нФ, $C_2 = 63$ нФ, $C_3 = 120$ нФ, $U_0 = 23$ кВ.

На сегодняшний момент проблема получения объемного разряда без неоднородностей еще не решена, так как, самостоятельный объемный разряд по своей природе неустойчив [45] и спустя определенное время в разряде возникает искровой канал. Процессу контракции разряда способствуют многие факторы это: неоднородное распределение начальных электронов в разрядном объеме, неравномерность распределения электрического поля в межэлектродном промежутке, влияние внешней цепи. Контракция разряда начинается с появления катодных пятен, к которым в последствии привязываются диффузионные каналы [45]. Катодные пятна, как правило, локализуются в областях с повышенной неоднородностью электрического поля, например возле микроострий, или других микровключений на электродах.

Пучок регистрировался на выходе из лазера на фотобумаге. Размеры лазерного пучка равны $13 \times 43 \text{ мм}^2$. Полученный лазерный пучок представлен на рисунке 3.15.

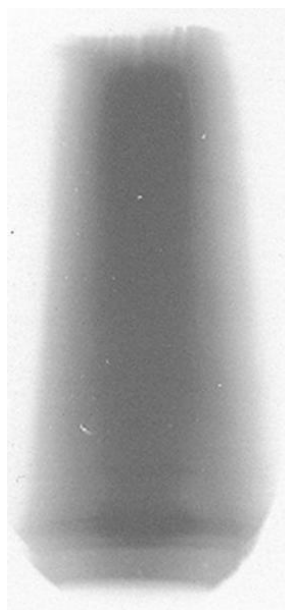


Рисунок 3.15 - Пучок, полученный для смеси Ne:Xe:HCl - 900:15:1, при давлении $P = 3,5 \text{ атм}$.

Состав смеси оптимизировался для получения максимальной энергии генерации в отдельном импульсе. При $p = 3,5 \text{ атм}$ и зарядном напряжении 23 кВ максимальная энергия, снимаемая с одного модуля, составляла 1 Дж.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить каковы будут дальнейшее усовершенствование и направленность для ее будущего повышения параметров и характеристик.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в таблице 3. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырёх конкурентных товаров и разработок.

Таблица 3 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Высокая частота	0,1	5	1	3	1	0,2	0,6
2. Однородность объемного разряда	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
3. Высокое выходное напряжение	0,05	5	4	4	0,5	0,4	0,4
4. Высокая скорость нарастания импульса	0,05	4	5	4	0,8	1	0,8
5. Короткое время импульса	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Оптимизация работы источника в импульсно периодическом режим	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
7. Качество импульса	0,05	5	4	5	0,5	0,4	0,5
8. Конструкция устройства	0,05	5	2	3	0,25	0,1	0,15
9. Поперечный разряд	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
10. Простота эксплуатации	0,05	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	2	2	0,5	0,2	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
3. Цена	0,05	4	3	3	0,4	0,3	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
5. Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Финансирование научной разработки	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3

Итого	1	76	58	60	6,85	5	5,4
--------------	----------	-----------	-----------	-----------	-------------	----------	------------

К1 – первый конкурент, это азотный лазер с поперечным разрядом и частотой следования импульсов 10кГц.

К2 – второй конкурент, это твердотельные лазеры .

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 3, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

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

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (15)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Основываясь на информации о конкурентах, следует объяснить:

- чем выражена слабость позиции и возможно найти свою нишу и увеличить определенную долю рынка;
- в чем конкурентное преимущество разработки.

В конце такого анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

4.1.2 SWOT - анализ

SWOT - анализ - метод стратегического планирования, используемый для оценки факторов и явлений, влияющих на проект или предприятие. SWOT - Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы). Все факторы делятся на четыре категории. Поскольку SWOT - анализ в общем виде не содержит экономических категорий, его можно применять к любым организациям, отдельным людям и странам для построения стратегий в самых различных областях деятельности.

Матрица SWOT - анализа представлена в таблице 4.

Таблица 4 - Матрица SWOT - анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Наличие опытного руководителя С2. Актуальность разработки С3. Высокая развитость технологии С4. Удобство эксплуатации С5. Наличие бюджетного финансирования	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Большой срок изготовление оборудования Сл2. Большие сроки выполнения заказов
Возможности: В1. Управление с помощью ПК; В2. Востребованность практически во всех сферах производства В3. Появление гос. программы по импортозамещению В4. Возможность создания партнерских отношений с рядом исследовательских институтов. В5. Возможность выхода на внешний рынок. В6. В случае принятия рынком выход на большие объемы	Актуальность разработки, опытный руководитель и принципиально новая методика дает возможность сотрудничать с рядом ведущих исследовательских институтов;	Возможность партнерских отношений с исследовательскими институтами в испытании методики в работе

Угрозы: У1. Противодействие со стороны конкурентов: снижение цен У2. Внешнеполитические факторы влияющие на экономику У3. Девальвация У4. Захват внутреннего рынка иностранными компаниями.	Повышение себестоимости научного проекта в связи с нестабильной ситуацией на рынке	Происходит сдача своих позиций конкурентам в связи с увеличением срока выполнения проекта
--	--	---

Что касается слабых сторон, то НИП имеет большие сроки выполнения заказов, но в случае принятия рынком выход на большие объемы, данная слабая сторона регулируется сама собой.

4.2 Инициация проекта

4.2.1 Цели и результаты проекта

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 5.

Таблица 5 - Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
1. ИСЭ СО РАН, лаборатория газовых лазеров (ЛГЛ)	Реализация нового технического продукта
2. РФФИ	Регулярная финансовая поддержка в виде гранта
3. Молодые сотрудники и студенты	Получение квалифицированного опыта
4. Поставщики комплектующих	Новые заказы на материалы и оборудование
5. НИ ТПУ, кафедра ВЭСЭ	Магистерская диссертация, отражающая теоретические и практические результаты работы по теме диссертации

Далее приводится информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей (таблица 6).

Таблица 6 - Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Создание электроразрядного эксимерного ХеСl лазера с мощностью излучения 100 Вт
Ожидаемые результаты проекта:	Разработать макет устройства и получение 100 Вт мощности излучения
Критерии приемки результата проекта:	Наличие проведенных экспериментов, показывающих работоспособность системы, а также экспериментальные данные, доказывающие или опровергающие эффективность возбуждения электроразрядных эксимерных лазеров
Требования к результату проекта:	Требования:
	- Соответствие законодательству РФ в области охраны окружающей среды
	- Соблюдение мер безопасности в работе с электромагнитным излучением
	Экономическая целесообразность оптимизации процесса
	Эффективность усовершенствованной технологии

4.2.2 Организационная структура проекта

На данном этапе работы определяется, кто будет входить в рабочую группу данного проекта, и роль каждого участника в данном проекте. Также прописываются функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Данная информация представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Панченко Ю.Н., ИСЭ СО РАН, к.ф.-м.н.	Научный руководитель	Постановка задачи, консультирование;	

			Промежуточная проверка достигнутых результатов	260
2	Аманжол А.Б., ИСЭ СО РАН, магистрант кафедры ВЭСЭ	Исполнитель проекта	Проведение экспериментов; Обработка экспериментальных данных	980
ИТОГО:				1240

4.2.3 Ограничения и допущения проекта

В таблице 8 приведены факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта.

Таблица 8 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
1. Бюджет проекта	1 000 000 руб.
1.1. Источник финансирования	Предоплата заказчика
2. Сроки проекта:	
2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2017
2.2. Дата завершения проекта	01.06.2017

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 представлена иерархическая структура работ по проекту.

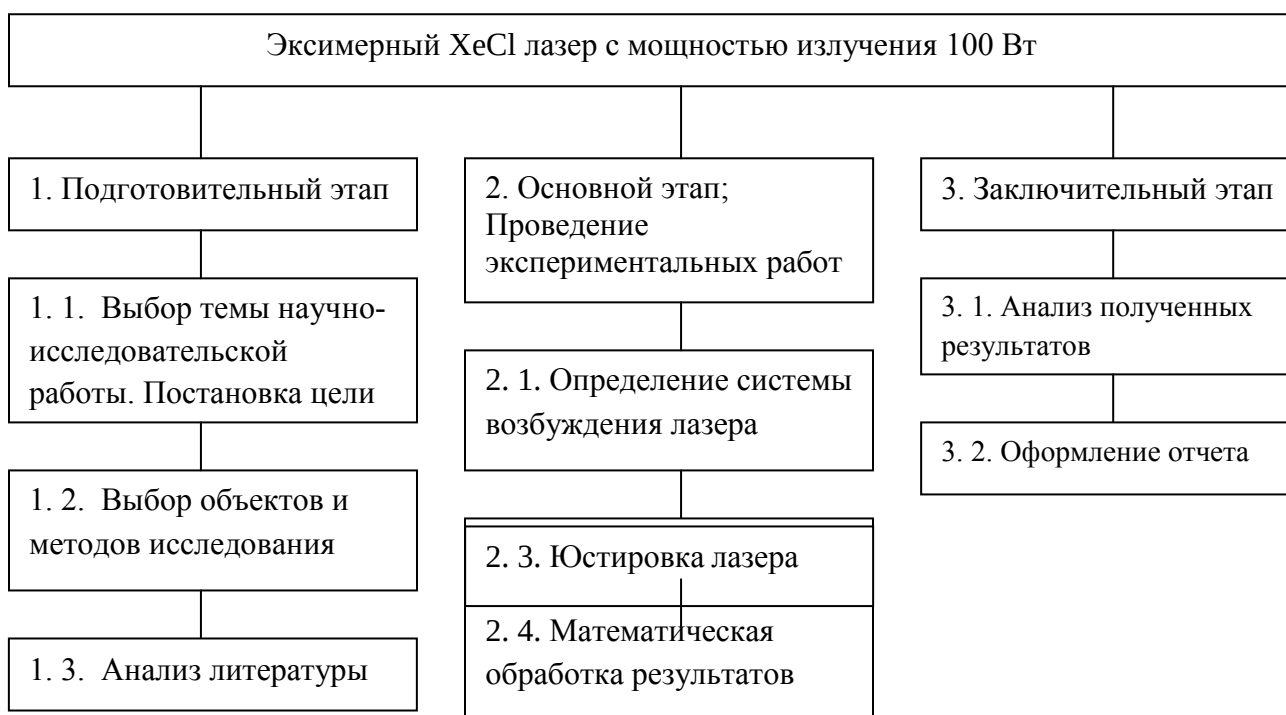


Рисунок 4.1 - Иерархическая структура проекта

4.3.2 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты (таблица 9).

Таблица 9 – Контрольные события проекта

№, п/п	Контрольное событие	Дата	Результаты (подтверждающий документ)
1	Выбор темы научно-исследовательской работы.	16.09 - 19.09.2015	Приказ

	Постановка цели и задач		
2	Анализ литературы	28.09 - 17.12.2015	Отчет по НИР
3	Исследование оптимальных условий возбуждения электроразрядных эксимерных лазеров	10.02 - 10.06.2016	Отчет по НИР
4	Анализ полученных результатов. Составление отчета	10.05 -07.05.2017	Предзащита

4.3.3 План проекта

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

Линейный график представляется в виде таблицы 10.

Таблица 10 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работы	Дата окончания работы	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1.1	Выбор темы научно-исследовательской работы. Постановка цели и задач	4	16.09.15	19.09.15	Ю.Н.Панченко А.Б.Аманжол
1.2	Выбор объектов и методов исследования	10	22.09.15	20.01.17	Ю.Н.Панченко А.Б.Аманжол
1.3	Анализ литературы	100	28.09.15	25.03.17	А.Б.Аманжол
2.1	Определение системы возбуждения лазера	10	20.02.15	29.04.16	Ю.Н.Панченко А.Б.Аманжол
2.2	Приготовление газовой смеси	30	15.10.15	24.12.16	Ю.Н.Панченко А.Б.Аманжол
2.3	Юстировка лазера	5	04.04.16	15.04.17	А.Б.Аманжол
2.4	Математическая обработка результатов	15	09.05.16	30.05.17	Ю.Н.Панченко А.Б.Аманжол
3.1	Анализ полученных результатов	15	10.05.16	03.06.17	Ю.Н.Панченко А.Б.Аманжол
3.2	Составление отчета по НИР	30	10.02.16	03.06.17	А.Б.Аманжол
Итого:		219			

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. График проведения работ представлен в таблице 11.

Таблица 11 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работы	Виды работы	Исполнители	Т _к , кал, дн.	Продолжительность выполнения работ																					
				Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь
1.1	Выбор темы научно-исследовательской работы. Постановка цели и задач	Руководитель	4																						
		Магистрант																							
1.2	Выбор объектов и методов исследования	Руководитель	10																						
		Магистрант																							
		Эксперт																							
1.3	Анализ литературы	Магистрант	100																						
2.1	Определение системы возбуждения лазера	Руководитель	10																						
		Магистрант																							
		Эксперт																							
2.2	Приготовление газовой смеси	Руководитель	30																						
		Магистрант																							
		Эксперт																							
2.3	Юстировка лазера	Магистрант	5																						
		Эксперт																							
2.4	Математическая обработка результатов	Руководитель	15																						
		Магистрант																							
		Эксперт																							
3.1	Анализ полученных результатов	Руководитель	15																						
		Магистрант																							
3.2	Составление отчета по НИР	Магистрант	30																						

Научный руководитель	Исполнитель (Магистрант)	Эксперт
----------------------	--------------------------	---------

4.3.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

4.3.4.1 Основная заработная плата

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

Для расчета заработной платы необходимо перевести календарные дни в рабочие по формуле:

$$T_p = \frac{T_k}{k}, \quad (16)$$

где T_k – продолжительность выполнения 1 работы в календарных днях;
 T_p – продолжительность одной работы в рабочих днях;
 k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{кз}}{T_{кз} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (17)$$

где $T_{кз}$ – количество календарных дней в году;
 $T_{вд}$ – количество выходных дней в году;
 $T_{пд}$ – количество праздничных дней в году.

$$k = \frac{366}{366-105-14} = 1,48$$

Расчетная величина продолжительности работ T_p округляется до целых чисел.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{\text{озп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (18)$$

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

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

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (19)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 11);

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

Для руководителя: $Z_{\text{осн}} = 1870,5 \times 60 = 112230$ рублей

Для инженера: $Z_{\text{осн}} = 441,33 \times 76 = 33541,08$ рублей

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (20)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 10).

Количество месяцев работы без отпуска в течение года при отпуске в 48 дней составляет $M = 10,7$ месяца. Тогда,

для руководителя: $Z_{\text{дн}} = \frac{34788 \cdot 10,7}{199} = 1870,5 \text{ рублей}$

для инженера: $Z_{\text{дн}} = \frac{8208 \cdot 10,7}{199} = 441,33 \text{ рублей}$

Таблица 12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	119	119
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	24	90
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	222	156

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (21)$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Заработная плата $Z_{\text{м}}$ по тарифной ставке (оклад) доцента, кандидата наук – 22300 руб.

$$Z_{\text{м}} = (22300 + 4460) \cdot 1,3 = 34788 \text{ руб.}$$

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 13.

Таблица 13 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{б,}$ руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м,}$ руб	$Z_{дн,}$ руб.	$T_{р,}$ раб. дн.	$Z_{осн,}$ руб.
Руководитель	22300	4460	-	1,3	34788	1870,5	60	112230
Инженер	6314	-	-	1,3	8208	441,33	76	33541,08

4.3.4.2. Дополнительная заработная плата научно - производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

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

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (22)$$

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

$k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

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

В таблице 14 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 14 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб	112230	33541,08
Дополнительная зарплата, руб	13467,6	4024,9
Итого по статье $C_{зп,}$ руб	125697,6	37566

4.3.4.3. Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (23)$$

$$C_{\text{внеб.рук}} = 27,2 \cdot 125697,6 = 34189,8 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{внеб.рук}} = 27,2 \cdot 37566 = 10218 \text{ руб.}$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). В ТПУ коэффициент отчислений равен 27,2%.

5 Социальная ответственность

Введение

Основным и одним из самых важных условий обеспечения социальной ответственности при осуществлении работы любого предприятия является выполнение основ безопасности.

В данной работе рассмотрен импульсно-периодический эксимерный ХеСl лазер, который включает в себя: 1 - Блок задающего генератора, платы управления и связи с компьютером; 2 - Блок управления по сетевому питанию и автоматы защиты; 3 - Корпус высоковольтного источника питания; 4 - Источники питания тиратрона и генератор запуска; 5 - Газовый корпус лазера; 6 - Тиратрон ТПИ1-10к/20; 7 - Батарея накопительных конденсаторов; 8 - Батарея разрядных конденсаторов; 9 - Разрядная лазерная камера; 10 - Юстируемый фланец окна.

Исследования осуществлялись на базе ИСЭ СО РАН, г Томск. Исследования проводятся подготовленным персоналом, как правило имеющим допуск для работы с высоким напряжением. В целях безопасности для работников, общества и окружающей среды разработаем комплекс мероприятий технического, организационного характера, которые минимизируют негативные последствия проектируемой деятельности.

5.1 Производственная безопасность

Идентификация опасных и вредных производственных факторов была проведена в соответствии с ГОСТ 12.0.003-74 [1], результаты сгруппированы в таблицу 15.

Таблица 15 - Основные элементы производственного процесса, формирующие
опасные и вредные факторы

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) Сборка эксимерного лазера 2) Запуск эксимерного лазера 3) Обработка экспериментальных данных	1. Повышенный уровень шума на рабочем месте 2. Повышенный уровень электромагнитных излучений 3. Отклонение показателей микроклимата в помещении 4. Отсутствие или недостаток естественного света. 5. Недостаточная освещенность рабочей зоны	1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека 2. Электрический ток	ГОСТ 12.0.003-74 [1] ГОСТ 12.1.038-82 [3] ГОСТ 12.1.006-84 [5] СанПиН 2.2.4.548-96 [7] ГОСТ 12.1.003-2014 [16] ГОСТ Р 12.1.019-2009 [17] СП 52.13330.2011 [18]

5.1.1 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды

5.1.1.1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Наиболее опасным источником электрического тока при выполнении данной работы является электроразрядный импульсно-периодический лазер на молекуле XeCl^* , имеющий напряжение 20 кВ. Поражение электрическим током возникает при соприкосновении с электрической цепью, в которой присутствуют источники напряжения и/или источники тока, способные вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела. Обычно чувствительным для человека является пропускание тока силой более 1 мА. Кроме того, на установках высокого напряжения возможен удар электрическим током без прикосновения к токоведущим элементам, в результате утечки тока или пробоя воздушного промежутка. Из-за высокого электрического сопротивления человеческих тканей происходит довольно быстрое их нагревание, что может вызывать ожоги.

Даже сравнительно малые напряжения, порядка 110—230 В, при кратковременном контакте с грудной клеткой могут вызывать сбой в работе сердечной мышцы (60 мА для переменного тока, 300—500 мА для постоянного). Удар током может вызвать сбой в работе нервной системы, например, беспорядочные сокращения мышц. Повторяющиеся удары могут вызвать невропатию. Острая электротравма может стать причиной нарастающей асистолии. При поражении головы электрическим током возможна потеря сознания. При достаточно высоких напряжениях и силе тока могут возникать так называемые электрические дуги, наносящие сильные термические ожоги.

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений (ГОСТ 12.1.038-82) [3], указанных в таблице 16.

Таблица 16 - Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

Род тока	U, В	I, мА
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3

Технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ в электроустановках, выполняют в следующем порядке:

1. Отключают напряжение и принимают меры, исключающие его ошибочную подачу к месту работы,
2. Вывешивают предупредительные плакаты на коммутационной аппаратуре, на постоянных и временных ограждениях,
3. Проверяют, есть ли напряжение на отключенной для работы части установки и накладывают на токоведущие части установки переносное заземление.

К основным электрозащитным средствам в электроустановках выше 1 кВ относятся: изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения, указатели напряжения для фазировки, изолирующие устройства и приспособления для работ на воздушных линиях под напряжением с непосредственным прикосновением электромонтера к токоведущим частям (изолирующие лестницы, площадки, канаты и т.п.).

5.1.2. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды

5.1.2.2. Повышенный уровень шума на рабочем месте

Источником повышенного шума при создании вакуума в рабочей камере являются LC – генератор с инвертированием напряжения. В результате гигиенических исследований установлено, что шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывая вредное воздействие на организм человека. При длительном воздействии шума на организм человека происходят нежелательные явления, такие как снижение остроты зрения, слуха; повышение кровяного давления; снижение внимания. Сильно продолжительный шум может быть причиной функциональных изменений сердечно сосудистой и нервной систем. Измерение шума проводят с целью оценки его на рабочих местах или рабочих зонах для сопоставления с требованиями санитарных норм, а также для оценки шумовых характеристик машин и оборудования, с целью разработки мероприятий по борьбе с шумом. Для оценки шума используют частотный спектр измеренного уровня звукового давления, выраженного в децибелах в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром.

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах (ГОСТ 12.1.003-83) [4] следует принимать:

для широкополосного постоянного и непостоянного (кроме импульсного) шума — по таблице;

для тонального и импульсного шума — на 5 дБ меньше значений, указанных в таблице 17.

Таблица 17 - Допустимые уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами (Гц)

Вид трудовой деятельности, рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в составных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Предприятия, учреждения и организации										
Рабочие места за пультами в кабинах наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону; в помещениях лабораторий с шумным оборудованием, в помещениях для размещения шумных агрегатов вычислительных машин	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75

Уровень звукового давления, создаваемое LC – генератором составляет 65 дБА, в то время, как допустимое составляет 75 дБА, что соответствует стандартам безопасности труда. При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средствами коллективной защиты (СКЗ) и средствам индивидуальной защиты (СИЗ).

Основными методами коллективной защиты (СКЗ) являются: устранение причин шума или существенное его ослабление (применять для перекрытия, стен, цельных и остекленных дверей и окон материалы и

конструкции, обеспечивающие надлежащую звукоизоляцию) в источниках образования (ими являются: электрические оборудования, блоки источников питания, насосы, подвижные краны, различные ремонтно-сварочные работы, вытяжное-вентиляционные системы); применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения посредством установки звукоизолирующих и звукопоглощающих преград в виде экранов, кожухов, кабин.

Средствам индивидуальной защиты (СИЗ) относятся защитные средства органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

Для уменьшения шума в помещении с расположенными в нем источниками шума предусматривается: кабины наблюдения, дистанционное управление и специальные боксы для наиболее шумного оборудования; звукоизолирующие кожухи, акустические экраны, вибродемпфирующие покрытия на вибрирующие тонкие металлические поверхности; звукопоглощающие облицовки стен и потолка или штучные звукопоглотители; звукоизолированные кабины и зоны отдыха обслуживающего персонала.

5.1.2.3. Повышенный уровень электромагнитных излучений

Источником электромагнитных излучений является эксимерный лазер. Наиболее чувствительные системы организма человека к электромагнитным излучениям: нервная, иммунная, эндокринная и половая. Биологический эффект электромагнитных полей в условиях длительного многолетнего воздействия накапливается, в результате возможно развитие отдаленных последствий, включая дегенеративные процессы центральной нервной системы, рак крови (лейкозы), опухоли мозга, гормональные заболевания (ГОСТ 12.1.006-84) [5].

При использовании в качестве активной среды различных веществ лазеры могут индуцировать излучение практически на всех длинах волн, начиная с ультрафиолетовых и заканчивая длинноволновыми инфракрасными.

ЛИ представляют опасность для органа зрения. Сетчатка глаза может быть поражена лазерами видимого (0,38-0,7 мкм) и ближнего инфракрасного (0,75-1,4 мкм) диапазонов. Лазерное ультрафиолетовое (0,18-0,38 мкм) и дальнее инфракрасное (более 1,4 мкм) излучения не достигают сетчатки, но могут повредить роговицу, радужку, хрусталик. Достигая сетчатки, ЛИ фокусируется преломляющей системой глаза, при этом плотность мощности на сетчатке увеличивается в 1000-10000 раз по сравнению с плотностью мощности на роговице. Короткие импульсы ($0,1 \text{ с} - 10^{-14} \text{ с}$), которые генерируют лазеры, способны вызвать повреждение органа зрения за значительно более короткий промежуток времени, чем тот, который необходим для срабатывания защитных физиологических механизмов (мигательный рефлекс 0,1 с).

Гигиеническое нормирование (ГОСТ Р 50723-94) [6] основывается на критериях биологического действия, обусловленного, в первую очередь, областью электромагнитного спектра. В соответствии с этим диапазон ЛИ разделен на ряд областей:

- от 0,18 до 0,38 мкм - ультрафиолетовая область;
- от 0,38 до 0,75 мкм - видимая область;
- от 0,75 до 1,4 мкм - ближняя инфракрасная область;
- свыше 1,4 мкм - дальняя инфракрасная область.

В основу установления величины ПДУ положен принцип определения минимальных «пороговых» повреждений в облучаемых тканях (сетчатка, роговица, глаза, кожа), определяемых современными методами исследования во время или после воздействия ЛИ. Нормируемыми параметрами являются энергетическая экспозиция H ($\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2}$) и облученность E ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$), а также энергия W (Дж) и мощность P (Вт).

Средства защиты от ЛИ должны обеспечивать предотвращение воздействия или снижение величины излучения до уровня, не превышающего допустимый. По характеру применения средства защиты подразделяются на средства коллективной защиты (СКЗ) и средства индивидуальной защиты (СИЗ). Надежные и эффективные средства защиты способствуют повышению безопасности труда, снижают производственный травматизм и профессиональную заболеваемость.

К СКЗ от ЛИ относятся: ограждения, защитные экраны, блокировки и автоматические затворы, кожухи и др.

СИЗ от лазерного излучения включают защитные очки, щитки, маски и др. Средства защиты применяются с учетом длины волны ЛИ, класса, типа, режима работы лазерной установки, характера выполняемой работы.

При работе с лазерами должны применяться только такие средства защиты, на которые имеется нормативно-техническая документация, утвержденная в установленном порядке.

5.1.2.4. Отклонение показателей микроклимата в помещении

Микроклимат в производственных условиях определяется следующими основными параметрами:

- 1) температура воздуха рабочей среды;
- 2) относительная влажность воздуха в рабочей среде;
- 3) скорость движения воздуха.

В лаборатории источникам тепла являются различные блоки источники питания тлеющего, дугового разряда и смещения, дополнительные электрические приборы и компьютерная периферия и т.п.

Соответственно при высокой температуре воздуха в замкнуто рабочей среде (помещение) кровеносные сосуды кожи расширяются, вследствие приводит к повышенному притоку крови к поверхности тела, и выделение

тепла в окружающую среду значительно увеличивается. При низкой температуре окружающего воздуха происходит другая реакция с организмом субъекта: кровеносные сосуды кожи сужаются, приток крови к поверхности тела постепенно замедляется, и соответственно уменьшается теплоотдача такими явлениями как конвекция и излучение. Для теплового самочувствия человека важно определенное равновесие баланса температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в помещении.

Повышенная влажность воздуха ($\phi > 85\%$) затрудняет процесс терморегуляций организма, так как происходит снижения испарения пота, а пониженная влажность ($\phi < 20\%$) вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей. Допустимые нормы показатели температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 18 (СанПиН 2.2.4.548-96) [7].

Таблица 18 - Метеорологические условия для рабочей зоны на участке сборки эксимерного лазера.

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более **
Холодный	Па (175-232)	17,0-18,9	21,1-23,0	16,0-24,0	15-75	0,1	0,3
Теплый	Па (175-232)	18,0-19,9	22,1-27,0	17,0-28,0	15-75*	0,1	0,4

На основе общих энергозатрат организма субъекта работы делятся на три категории тяжести. Работа, относящаяся к инженерам – разработчикам, относится к категории тяжести: Па.

Температура в рабочей зоне поддерживается отоплением в холодный период года и естественной вентиляцией в теплый период.

Для создания благоприятных условий микроклимата должны быть использованы такие меры как, естественная вентиляция, кондиционирование, а также системы центрального отопления, чаще всего его используют в зимний период времени.

5.1.2.5. Отсутствие или недостаток естественного света.

Недостаточная освещенность рабочей зоны

Назначение искусственного освещения – создать благоприятные условия видимости, сохранить хорошее самочувствие человека и уменьшить утомляемость глаз. При искусственном освещении все предметы выглядят иначе, чем при дневном свете. Это происходит потому, что изменяется положение, спектральный состав и интенсивность источников излучения. Недостаточное освещение рабочего места вызывает быструю усталость и болезни глаз, снижает внимательность и, следовательно, значительно уменьшает производительность труда, а также увеличивает вероятность несчастных случаев на производстве.

Оценка освещенности рабочей зоны проводится в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [8]. В связи с тем, что при исследованиях требуется высокое интеллектуальное и зрительное напряжение, в помещении должна быть реализована достаточная освещенность. Для нормальной работы, она должна составлять не менее 200 люкс исходя из СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [8], коэффициент естественной освещенности (КЕО) должен составлять 2,1%, а коэффициент пульсаций (K_p) не должен превышать 10%.

**Таблица 19 - Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения
основных помещений общественного здания, а также сопутствующих им производственных помещений**

Помещения	Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г - горизонтальная, В - вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение				
		КЕО e_n , %		КЕО e_n , %		освещенность, лк		показатель дискомфота M , не более	коэффициент пульсации освещенности, K_n , % не более	
		при верхнем или комбиниро- ванном освещении	при боковом освещении	при верхнем или комбиниро- ванном освещении	при боковом освещении	при комбиниро- ванном освещении	при общем освещении			
						всего	от общего			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Административные здания (министерства, ведомства, комитеты, префектуры, муниципальные управления, конструкторские и проектные организации, научно-исследовательские учреждения и т.п.)										
Лаборатории научно-технические (кроме медицинских учреждений): термические, физические, спектрографические, стилометрические, фотометрические, микроскопные, рентгеновские, рентгеноструктурного анализа, механические, радиоизмерительные, электронных устройств	Г-0,8	3,5	1,2	2,1	0,7	500	300	400	40	10

Для реализации достаточной освещенности в рабочем помещении должно присутствовать, как естественное освещение, так и искусственное. Чтобы увеличить освещенность на рабочем месте, следует так же использовать местное освещение, потому что работа связана с мелкими деталями. В рабочем помещении в качестве искусственного освещения должны использоваться люминесцентные лампы. Они имеют большую световую отдачу, высокий срок службы, отличную цветопередачу, относительно слабую яркость.

5.2 Экологическая безопасность

Размеры санитарно-защитных зон регламентируются СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [9]. В результате реализации в ВКР предполагаемые источники загрязнения окружающей среды это: использование газов: водород, аргон, азот; использование пожароопасных жидкостей: бензин, керосин; острых химических соединений: спирт, ацетилен; отходы бытового характера.

В лаборатории и в таких же схожих условиях работы нужно решить ряд комплексных проблем связанных с сокращением вредных выбросов в атмосферу и активными решениями к переходу безотходным или малоотходным технологиям производства. Необходимо осуществлять максимальный сбор остаточных газов (водород, аргон, азот) в камере после исследования с помощью откачек и сбором в специальные герметичные емкости. В настоящее время остаточная смесь выпускается в воздух (после откачки).

Люминесцентные лампы использовались для искусственного общего освещения аудитории. Отработанные ртутные лампы отнесены к I-му классу опасности для окружающей среды и подлежат обязательному обезвреживанию. Несмотря на то, что в ходе исследования был использован ряд загрязняющих веществ, осуществлялись мероприятия по их обезвреживанию и утилизации. В связи с этим, не возникает негативное воздействие на окружающую среду.

5.2.1. Защита литосферы

В лаборатории имеется мусорный контейнер. Лампы по окончании срока службы хранятся в контейнерах, далее транспортируются и сдаются в специальные предприятия, где они подлежат дальнейшей утилизации, суть которой состоит в сборе и нейтрализации веществ, содержащих ртуть. Использованную бумагу собирают и сдают в соответствующие инстанции, где они подлежат утилизации. Утилизация макулатуры проходит в нескольких этапах: сбор макулатуры, сортировка, получение макулатурной массы, удаление примесей/тонкая очистка, обесцвечивание и т.д.

5.2.2. Защита атмосферы

В лаборатории используются в основе для исследования хлористый водород, ксенон и азот, а в некоторых случаях и аргон. Также от неправильного использования этих газов может привести к их соединению в разных видах, что может привести еще более серьезным последствиям. По правилам работ различные газы и смеси должны храниться в специальных емкостях: баллоны; должны быть герметично закрытыми, оснащены редукторами и устроены в отдельном закрытом помещении: шкаф.

В качестве основных критериев опасности загрязнения воздуха и для целей нормирования загрязнения обычно используют предельно допустимые концентрации (ПДК) или соответствующие им стандарты качества воздуха, являющиеся санитарными нормами. Концентрация предельно допустимая (ПДК) – норматив – количество вредного вещества в окружающей среде, при постоянном контакте или при воздействии за определённый промежуток времени практически не влияющее на здоровье человека и не вызывающее неблагоприятных последствий у его потомства. Устанавливается в законодательном порядке или рекомендуется компетентными учреждениями

(комиссиями и др.). Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны приведены в таблице (ГН 2.2.5.686-98) [10].

Мероприятия по снижению воздействия. При обнаружении утечек газов нужно срочно сообщить выше стоящему руководству и предупредить рабочий персонал, а также произвести работы по предотвращению дальнейшего развития утечек, аварий, пожара и т.д.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При разработке устройства, самой вероятной ЧС может явиться пожар в помещении. В связи этим в помещении, где разрабатывается устройство согласно ФЗ №123 о «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», должны быть реализованы все меры предосторожности, касающиеся правил пожарной безопасности. По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории A_n , B_n , B_{n1} , G_n и D_n .

Согласно НПБ 105-03[11] лаборатория относится к категории Г - негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени; горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива. По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 21-01-97 [12] (выполнено из кирпича, которое относится к трудно сгораемым материалам). Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. П.

Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- а) использование только исправного оборудования;
- б) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- в) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- г) курение в строго отведенном месте;
- д) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

К простейшим средствам тушения огня относятся ручные огнетушители, песок, грунт и т.п. В данной лабораторий запрещено использовать воду в качестве источника тушения пожара, так как в помещении есть электрооборудование и источники питания.

Углекислотные (ОУ-2) огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов.

Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует

располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу (рисунок 1).



Рисунок 5.1 - План эвакуации при пожаре и других ЧС, 3 этаж

При возникновении ЧС, такого как пожар нужно:

- Сообщить о пожаре в пожарную охрану
- Если есть возможность отключить электроэнергию.
- Покинуть помещение, используя основные и запасные пути эвакуации

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.4.1. Правовые вопросы обеспечения безопасности

При приеме на работу новый сотрудник должен пройти вводный инструктаж по охране труда и пожарной безопасности, ознакомиться со своей должностной инструкцией, пройти первичный инструктаж по охране труда и пожарной безопасности на рабочем месте. Кроме того, проводятся повторные инструктажи с работниками с периодичностью 1 раз в 6 месяцев (п. 7.3. ГОСТ 12.0.004-2015) [19]; внеплановые инструктажи при изменении технологического процесса, замене или модернизации оборудования, приборов и инструментов, исходного сырья, материалов и других факторов; и целевые инструктажи при проведении работ, на которые оформляются наряд-допуск, приказ или распоряжения.

Работа в помещении осуществляется с девяти часов утра до шести часов вечера, в обед осуществляется отдых, продолжительностью в один час для снятия умственного и психологического напряжения. Проводимые исследования достаточно безопасны для человека, за исключением опасности воздействия лазерного излучения.

В лаборатории запрещено использование труда несовершеннолетних лиц. Привлечение трудящихся к работам в ночное время не производится. Практикуется применение спецодежды и СИЗ. Спецпитание и особое лечебно-профилактическое обслуживание отсутствует. Особенности обязательного социального страхования и пенсионного обслуживания стандартные.

5.4.2. Организационные вопросы обеспечения безопасности

Одним из факторов комфортности рабочей среды является организация рабочего места.

Рабочее место - это часть помещения предприятия (организации), имеющая площадь и объем, достаточный для размещения инженера и необходимого оборудования (рабочего стола, стула, контрольно-

измерительных приборов, станков, а также справочных и рабочих материалов, инструментов, вычислительной техники и т.д.).

Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78 [13]:

- а) рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество;
- б) рабочий стул должен иметь дизайн, исключаящий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте.
- в) рабочее место должно соответствовать техническим требованиям и санитарным нормам.

В соответствии с СП 60.13330.2012 [14] в помещении должен быть организован воздухообмен. Это осуществляется с помощью вентиляции.

Для улучшения воздухообмена в помещении необходимо выполнить следующие технические и санитарно-гигиенические требования:

общий объем притока воздуха в помещении должен соответствовать объему вытяжки;

правильное размещение приточной и вытяжной вентиляции.

Расчет необходимого воздухообмена ведется по следующим факторам: по количеству работающих, влаговыведению, теплоизбыткам, поступлению в воздух рабочей зоны вредных газов, паров и пыли.

В соответствии с указаниями по проектированию цветовой отделки помещений производственных зданий, согласно Указаниям по проектированию цветовой отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий (СН-181-70) [15], рекомендуются следующие цвета окраски помещений:

потолок - белый или светлый цветной;

стены - сплошные, светло-голубые;

пол - темно-серый, темно-красный или коричневый.

Применение указанной палитры цветов обусловлено ее успокаивающим воздействием на психику человека, способствующим уменьшением зрительного утомления.

При выполнении интерьера, обычно выбирают не более трех основных цветов небольшой насыщенности. Окраска оборудования и приборов, в основном, имеет светлые цвета с высококонтрастными органами управления и надписями к ним.

В процессе работы выполняются технологические перерывы, проветривание помещения. Также есть комната психологической разгрузки, оборудованная чайником и микроволновой печью.

Список использованных источников

1. ГОСТ 12.0.003–74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
2. ГОСТ 12.1.001–89 ССБТ. Ультразвук. Общие требования безопасности.
3. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
4. ГОСТ 12.1.003–83 (1999) ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
5. ГОСТ 12.1.006–84.ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля (до 01. 01. 96).
6. ГОСТ Р 50723-94. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий.
7. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
8. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.
9. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. М.: Госкомсанэпиднадзор России, 2003.
10. ГН 2.2.5.686-98. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
11. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
12. СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений.
13. ГОСТ 12.2.033-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

14. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.
15. СН 181-70. Указания по проектированию цветовой отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий.
16. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.
17. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
18. СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение.
19. ГОСТ 12.0.004-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда. Общие положения.

Заключение

В настоящей работе рассмотрен ряд вопросов, посвященных процессам происходящих в рабочей смеси, обзору кинетики возбуждения и способов ввода энергии, возбуждение эксимерного лазера импульсным разрядом, формированию качественного излучения в электроразрядном ХеСl лазере работающего в импульсно-периодическом режиме с частотой до 100 Гц.

Основные результаты и выводы работы можно сформулировать следующим образом:

1. В электроразрядном импульсно-периодическом ХеСl лазере с частотой повторения импульсов до 100 Гц, сформирован однородный объемный разряд. Показано что, при удельной мощности накачки $2,63 \text{ МВт/см}^3$ полный КПД лазера достигает 2%. Максимальная энергия генерации лазерного излучения составила 1 Дж.

2. Разработано ПУ для контроля и регулировки температуры разрядной камеры в диапазоне температур 20-40 °С. Система контроля включала в себя одноканальный измеритель ПИД-регулятор микропроцессорный ТРМ210 совместно с термопарой.

Список использованных источников

1. Houtermans F. G . / Helv. Phys. Acta, 1960, v. 33, p . 933.
2. Данилычев В. А. Оптические квантовые генераторы на конденсированных и сжатых газах: Автореферат докт. диссертации.— М.: ФИАН СССР, 1973.
3. Басов Н. Г., Данилычев В. А., Попов Ю. М., Ходкевич Д. Д .— Письма ЖЭТФ, 1970, т. 12, с. 473.
4. Басов Н. Г. В кн./ Данилычев В. А., Попов Ю. М. //Квантовая электроника.— М.: Сов. радио, 1971, вып. 1, с. 29.
5. Mitsuhiro Kusaba, Yoshiaki Tsunawaki. Raman spectroscopy of SWNTs produced by a XeCl excimer laser ablation at high temperatures.// Applied Surface Science. –2007.№253. –6330-6333
6. Klaus Fritz. 308 nm excimer laser phototherapy of psoriasis: Monotherapy versus combination with Calcipotriol therapy.// Medical Laser Application. – 2008. - №23.– 87-92
7. С.К. Вартапетов, Д.В. Худяков, К.Э. Лапшин, А.З. Обидин, И.А. Щербаков. Фемтосекундные лазеры для микрохирургии роговицы. // Квантовая Электроника, 2012, Т. 42, № 3, С. 262-268.
8. C. Gomez. Comparative study between IR and UV laser radiation applied to the removal of graffitis on urban buildings.// Applied Surface Science - 2006. - №252. – 2782-2793
9. V. Lazic. Analysis of explosive and other organic residues by laser induced breakdown spectroscopy.// Spectrochimica Acta Part B.–2009.№64.–1028-1039
10. Басов Н. Г., Данилычев В. А., Попов Ю. М., Ходкевич Д. Д. Письма в ЖТФ.- 1970, -Т. 12, в. 10, -С. 473-474
11. Ч. Роудз. Эксимерные лазеры.// М. Мир.-1981 .-С. 5
12. Velazco J., Setser D.W. Bound-free emission spectra of diatomic xenon halides // J. Chem. Phys.- 1975.- Vol. 62, pp. 1990-1991

13. Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А., Ельцов А.В., Иванов А.С.
Разработка мощных KгF лазеров с частотой повторения импульсов до 5 кГц
// Квантовая электроника. – 2000. - Т.30. - № 9. - С.783-786.
14. А.В. Андраманов, С.А. Кабаев, Б.В. Лажинцев, В.А. Нор-Аревян, В.Д. Селемир. Компактный ХеF-лазер с частотой следования импульсов 4 кГц и многосекционным разрядным промежутком // Квантовая электроника. – 2005. - Т.35. - № 4. - С.311-314.
15. Андраманов А.В., Кабаев С.А., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Селемир В.Д. Патент России № 2244990 от 10.04.03; БИ. – 2005. – №2, С. 610.
16. Азотный лазер с частотой повторения импульсов 11 кГц и расходимостью излучения 0.5 мрад / Аттежев В.В., Вартапетов С.К., Жигалкин А.К., Лапшин К.Э., Обидин А.З. // Квантовая электроника. – 2004.-Т.34., № 9.- С.790-794
17. Бычков А.Г., Коровкин А.Г. О диаметральных вентиляторах-промышленная аэродинамика. Выпуск 24, 1962. с.110-124
18. Коровкин А.Г. исследование аэродинамических схем корпусов диаметральных вентиляторов без внутреннего направляющего аппарата: Промышленная аэродинамика, Москва: Машиностроение; выпуск 33, 1986 71-80 с.
19. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечных труб.-Л.: Машиностроение, 1982г.-189 с.
20. В.В. Дударев, Н.Г. Иванов, И.Н. Коновалов, В.Ф. Лосев, А.В. Павлинский, Ю.Н. Панченко. Эффективные импульсно-периодические ХеCl-лазеры. // Квантовая электроника.– 2011. – Т.41, № 8. – С. 687–691.
21. Ralf Dreiskemper, Woldemar Botticher. Current filamentation of strongly preionized high pressure glow discharges in Ne/Xe/HCl mixtures // Transaction on plasma science.-1995.- Vol.23, No.6., pp 989-995
22. Басов Н. Г., Данилычев В. А., Попов Ю. М., Ходкевич Д. Д. — Письма ЖЭТФ, 1970, т. 12, с. 473.

23. Басов Н. Г., Данилычев В. А., Попов Ю. М.— В кн.: Квантовая электроника.— М.: Сов. радио, 1971, вып. 1, с. 29.
24. Эксимерные лазеры/Под ред. Ч . Р о у д з а .— М.: Мир, 1981.
25. Sagres A., W u C S.— Rev. Sci. Instrum., 1957, v. 28, p . 758.
26. Молчанов А. Г . , Полуэктов И. А., Попов Ю. М.— ФТТ, 1967, т. 9, с. 3363.
27. Basov N. G., Balashov E. M., Bogdankevitch O. V., Danilychev V. A . , Kashnikov G. N . , Lantzov N. P . , Khodkevitch D . D .— In: Intern. Conference on Luminescence. New Ark., Delaware, USA, August 25—29, 1969.— J . Luminescence, 1970, v. 1, p. 834.
28. Богданкевич О. В., Данилычев В. А., Кашников Г. Н., Керимов О. М., Ланцов Н. П. Катодо люминесценция конденсированного ксенона: Препринт ФИАН СССР № 9.— Москва, 1970.
29. Данилычев В. А., Кашников Г. Н., Попов Ю. М. Фотолюминесценция конденсированного ксенона в области фазового перехода жидкость — кристалл: Препринт ФИАН СССР № 136.—Москва, 1970.
30. Данилычев В. А., Керимов О. М., К о в ш И. Б. Оптические квантовые генераторы на сжатых газах.— Тр. ФИАН СССР, 1976, т. 85, с. 49.
31. Смирнов Б. М.—УФН, 1983, т. 139, с. 53.
32. Кузнецова Л. А. и др.— Вестник МГУ. Сер. II <<Химия>>, 1964, № 19.
33. Go1de M. F., Trush B. A.— Chem. Phys. Lett., 1974, v. 29, p. 486.
34. Ve1azco G. E., Setser D. W.— J. Chem. Phys., 1975, v. 62, p. 1990.
35. Ewing G. G., Браи Ch. A.— Phys. Rev. Ser. A, 1975, v. 12, p. 129.
36. Golde M. F . — J . Mol. Spectr., 1975, v. 58, p. 261.
37. Браи Ch. A., Ewing G. G.—J. Chem. Phys., 1975, v. 63, p. 4640.
38. Sear1es S. K., Hart G. A.— Appl. Phys. Lett., 1975, v. 27, p. 243.
39. Tisone G. C , Hays A. K., Hoffman G. M.— Opt. Commun., 1975, v. 15, p. 188.
40. Аи If E. R., Jr., Bradford R. C, Bhaumik M. L.—Appl. Phys. Lett. 1975, v. 27, p. 413.
41. Ewing G. G., Браи Ch. A.— Ibidem, p. 350.

42. Brau Ch. A., Ewing G. G.—Ibidem, p. 435.
43. Rokni M., Mangano J. G., Jacob G. H., Hsia G. G.— IEEE J.Quantum Electron., 1978, v. QE-14, p. 464.
44. Тельминов Е.Н. Физика лазерных систем: эксимерный лазер на хлориде ксенона – лазер на красителе: дисс. на соискание уч. степ. канд. физ.- мат. наук/СФТИ.- Томск: 1998.- 184 с.
45. Королев Ю.Д. Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов.- М.: Наука, 1991.- 224 с.
46. Агеев В.П., Атежев В.В., Букреев В.С. и др. Импульсно-периодический эксимерный лазер с магнитным звеном сжатия // ЖТФ.- 1986.-Т.56., в.7.- С.1387-1389
47. Жупиков А.А., Ражев А.М. Эксимерный ArF-лазер с энергией 0.5 Дж на основе буферного газа He // Квантовая электроника – 1997.-Т.24.,№8. - С.683-687
48. А.М.Ражев, А.И.Щедрин, А.Г.Калюжная, А.В.Рябцев, А.А.Жупиков. Влияние интенсивности накачки на эффективность эксимерного электроразрядного KrF-лазера на смеси He-Kr-F₂. // Квантовая электроника – 2004.-Т.34.,№10. -С.901-906.
49. А.М.Ражев, А.А.Жупиков, Е.С.Каргапольцев. Эксимерный KrCl-лазер ($\lambda = 223$ нм) на смеси He-Kr-HCl. // Квантовая электроника – 2004.-Т.34.,№2. - С.95-98.
50. Кропанев А.Ю., Орлов А.Н., Осипов В.В. Характеристики импульсно-периодического XeCl- лазера с системой регенерации газовой смеси // Квантовая электроника – 1996.-Т.23.,№3. -С.340-342.
51. Неймет Ю.Ю., Шуаибов А.К., Шевера В.С. и др. Малогабаритный электроразрядный лазер на хлоридах ксенона и криптона // ЖПС.-1990.- Т.53, №2.-С.337-339.

52. Shigeyuki Takagi, Saburo Sato, Tatsumi Goto Electron density measurements in UF-preionized XeCl and CO₂ laser gas mixtures // Japan. J. of Appl. Phys.-1989.-Vol.28, No.11., PP.2219-2222.
53. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю. и др., Об интенсивности накачки электроразрядных эксимерных лазеров // Квантовая электроника – 1995.-Т.22., № 6.- С.533-536.
54. Агеев В.П., Атежев В.В., Букреев В.С. и др. Импульсно-периодический эксимерный лазер с магнитным звеном сжатия // ЖТФ.- 1986.-Т.56., в.7.- С.1387-1389
55. Жупиков А.А., Ражев А.М. Эксимерный KrF-лазер на основе буферного газа He с энергией 0.8 Дж и КПД 2% // Квантовая электроника. – 1998.- Т.25.,№8. -С. 687-689.
56. А.В.Андраманов, С.А.Кабаев, Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян, А.В.Писецкая. Многосекционный KrF-лазер с частотой повторения 4 кГц и индуктивно-емкостной стабилизацией разряда. // Квантовая электроника – 2006.-Т.36., № 2.- С.101-105.
57. И.Н.Коновалов, В.Ф.Лосев, Ю.Н.Панченко, Н.Г.Иванов, М.Ю.Сухов. Электроразрядный XeCl-лазер с энергией генерации 10 Дж и длительностью импульса излучения 300 нс. // Квантовая электроника – 2006.-Т.36., № 2.- С.237-240.
58. Levater J.I. and Lin Shao-Chi. Necessary condition for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharge at high gas pressure // J. Appl. Phys.-1980.-Vol.51, No.1., PP.210-222.
59. Boticher W. The Time-Dependent Development of the Macroscopic Instability of a XeCl* Laser Discharge // Trans. on plasma science.- 1991.-Vol.19, No.2., - P369-377
60. Hasama T., Miyazaki K., Yamada K. and Sato T. 50-J discharge pumped XeCl laser //IEEE J. Quant. Elect.- 1989.-Vol.25, No.1, -P.113-120

61. Аттежев В.В., Вартапетов С.К., Жуков А.Н., Курзанов М.А., Обидин А.З. Эксимерный лазер с высокой когерентностью // Квантовая электроника. – 2003.-Т.33., № 8.- С.689-692
62. Борисов В.М., Борисов А.В., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю. Эффекты ограничения мощности в компактных импульсно-периодических KrF-лазерах // Квантовая электроника – 1995.-Т.22. № 5.- С.446-450
63. Эффективная предыонизация в ХеСl-лазерах /Борисов В.М., Демин А.И., Ельцов А.В., Новиков В.П., Христофоров О.Б. // Квантовая электроника – 1999.-Т.26., № 3.- С.204-208
64. В.М. Борисов, А.И. Демин, А.В. Ельцов, В.П. Новиков, О.Б. Христофоров. Эффективная предыонизация в ХеСl-лазерах. //Квантовая электроника. – 1999. – Т.26, №3, С.204–208.
65. Fisher C.H., Kushner M.J., Terrence E.D. High efficiency XeCl laser with spiker and magnetic isolation // Appl. Phys. Lett.-1986.-Vol.48. -P1574-1576