

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

Школа новых производственных технологий

Направление подготовки оптотехника

Отделение школы (НОЦ) отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Оптический пробой кристаллов LiF и LiF(U) при инициировании первой гармоникой неодимового лазера

УДК 537.52:548.31:621.373.826.038.824

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ72	Круглов В.А		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Олешко В.И.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН	Жаворонок А.В.	-		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель.	Романова С.В.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Полисадова Е.Ф.	д.ф.-м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Способность формулировать цели, задачи научного исследования или разработки в области светотехники и фотонных технологий и материалов, способность выделять и обосновывать критерии, на основании которых формируются модели принятия решений, составлять план работ, способность строить физические и математические модели объектов исследования и выбирать алгоритм решения задачи
P2	Способность разрабатывать программы экспериментальных исследований, применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы, защищать приоритет и новизну полученных результатов исследований в области обработки, изучения и анализа фотонных материалов, корпускулярно-фотонных технологий, оптоволоконной техники и технологии, в области оптических и световых измерений, люминесцентной и абсорбционной спектроскопии, лазерной техники, лазерных технологий и оборудования, взаимодействия излучения с веществом, производства и применения светодиодов
P3	Способность к профессиональной оценке проблем проектирования в области светотехники, оплотехники, фотонных технологий и материалов на основе подбора и изучения литературных и патентных источников. Способностью к разработке структурных и функциональных схем оптических, оптико-электронных, светотехнических приборов, лазерных систем и комплексов с определением их физических принципов работы, структуры и технических требований на отдельные блоки и элементы
P4	Способность к конструированию и проектированию отдельных узлов и блоков для осветительной, облучательной, оптико-электронной, лазерных техники, оптоволоконных, оптических, оптико-электронных, лазерных систем и комплексов различного назначения, осветительных и облучательных установок для жилых помещений, сельского хозяйства, промышленности
P5	Способность к разработке и внедрению технологических процессов и режимов сборки оптических и светотехнических изделий, к разработке методов контроля качества изготовления деталей и узлов, составлению программ испытаний современных светотехнических и оптических приборов и устройств, фотонных материалов.
P6	Способность эксплуатировать и обслуживать современные светотехнические и оптические приборы и устройства, соблюдать

	правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Способность проявлять творческий, нестандартный подход, требующий абстрактного мышления, при решении конкретных научных, технологических и проектно-конструкторских задач в области фотонных технологий и материалов и светотехники, нести ответственность за принятые решения
P8	Способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала
P9	Способность к инновационной инженерной деятельности, менеджменту в области организации освоения новых видов перспективной и конкурентоспособной оптической, оптико-электронной и световой, лазерной техники с учетом социально-экономических последствий технических решений
P10	Способностью к координации и организации работы научно-производственного коллектива, принятию исполнительских решений для комплексного решения исследовательских, проектных, производственно-технологических, инновационных задач в области светотехники и фотонных технологий и материалов
P11	Способность к оценке современного состояния развития науки и техники, владение иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности
P12	Способность к сбору сведений, анализу и систематизации знаний об исследуемом объекте

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

Школа новых производственных технологий
 Направление подготовки оптотехника
 Отделение школы (НОЦ) отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4BM72	Круглову Виктору Андреевичу

Тема работы:

Оптический пробой кристаллов LiF и LiF(U) при инициировании первой гармоники неодимового лазера.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Образцы ЩГК LiF и LiF(U). Отечественная и зарубежная литература по закономерностям развития оптического пробоя в диэлектриках и полупроводниках. Спектральные и кинетические характеристики свечения оптических разрядов в кристаллах. Экспериментальная установка для исследования кинетики, спектров и пространственного распределения свечения кристаллов инициируемого лазерным излучением.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Аналитический обзор литературы по спектрам оптического пробоя диэлектрических и полупроводниковых кристаллов. Постановка задачи исследования. Освоение методики регистрации спектров свечения объемной и поверхностной лазерной плазмы оптического пробоя с высоким спектральным, временным и пространственным разрешением. Обсуждение результатов выполненной работы. Выводы по разделу. Разработка дополнительных разделов: «Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность», раздел ВКР на иностранном языке. Заключение по работе.</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Блок-схема импульсного спектрометра на базе неодимового лазера. Экспериментальные результаты (графики, таблицы, фотографии)</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Жаворонок А.В. Ассистент ОСГН</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Романова С.В. Старший преподаватель ОКД</p>
<p>Раздел ВКР на иностранном языке</p>	<p>Рыбушкина С.В. Старший преподаватель ОИД</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Методика эксперимента, экспериментальные результаты, обсуждение результатов, выводы</p>	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Олешко Владимир Иванович	д.ф-м.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ72	Круглов В.А.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 112 страниц, 24 рисунка и 26 таблиц, 52 источника, 1 приложение.

Ключевые слова: лазерное излучение, конденсированные среды, оптический пробой, объемный и поверхностная лазерная плазма, лазерно-искровая спектрометрия.

Объект исследования – явление поверхностного и объемного оптического пробоя кристаллов.

Цель работы - изучить спектральные и кинетические характеристики свечений, возникающих при поверхностном и объемном оптическом пробое исследуемых кристаллов при возбуждении первой гармоникой неодимового лазера ($\lambda = 1,06$ мкм, $t_{1/2} = 14$ нс).

Методы исследований – метод импульсной спектрометрии и метод оптической микроскопии.

Полученные результаты. В процессе исследования измерены пороговые, амплитудные и спектрально-кинетические характеристики объемной и приповерхностной лазерной плазмы, образующейся при возбуждении кристаллов импульсным лазерным излучением в атмосферном воздухе и в вакууме. Установлено, что характеристики свечения зависят от типа образца, давления окружающей среды и плотности энергии лазерного излучения.

Прогнозные предложения о развитии объекта исследования.

Результаты данной работы могут быть использованы для решения ряда прикладных проблем: определения оптической прочности материалов, используемых в мощных лазерных системах, для развития методов лазерной искровой спектроскопии и при разработке лазерных технологий.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ,
НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

НОП – низкопороговый оптический пробой

ПЛП – поверхностная лазерная плазма

ПН – поглощающие неоднородности

ЛИ – лазерное излучение

УВ – ударная волна

НТИ – научно-техническое исследование

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	13
1. Обзор литературы	16
1.1 Лазерно - индуцированный пробой в газах	16
1.1.2 Явления, сопровождающие пробой в газах	22
1.1.3 Пробой в твердом теле и на его поверхности, в аэрозолях и жидкостях.....	23
1.2 Явления, сопровождающие пробой на поверхности твердого тела	24
1.2.1 Оптические свойства реальных материалов (несобственный оптический пробой на поверхности)	26
1.3 Постановка цели и задачи исследований	30
2 Методика эксперимента и экспериментальные результаты.....	31
2.1 Лазерный стенд для исследования приповерхностной лазерной плазмы.....	31
2.1. Объекты исследования.....	33
3. Экспериментальные результаты и их обсуждение	34
3.1 Оптические характеристики кристаллов LiF и LiF (U)	34
3.2 Спектральные и кинетические характеристики приповерхностной лазерной плазмы кристаллов LiF и LiF (U) в атмосферном воздухе.....	38
3.3 Спектральные характеристики свечения приповерхностной лазерной плазмы кристаллов LiF и LiF (U), измеренные в вакууме	41
3.4 Спектральные и кинетические характеристики свечения объемной лазерной плазмы кристаллах LiF и LiF (U).....	42
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	47
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	48
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	48
4.1.2 Технология QuaD.....	48
4.1.3 SWOT-анализ	49
4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	51
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	53
4.2.1. Цели и результат НТИ.....	53
4.2.2 Структура работ в рамках научного исследования	54
4.2.3 Определение трудоемкости выполнения работ.....	55
4.2.4 Разработка графика проведения научного исследования.....	56
4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	58
4.3.1 Материальные расходы.....	58
4.3.2 Затраты на специальное оборудование	59
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	59

4.3.4	Дополнительная заработная плата исполнителей темы	60
4.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды.....	60
4.3.6	Накладные расходы	60
4.3.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	61
4.4	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	61
4.4.1	Оценка абсолютной эффективности исследования	61
4.4.2	Чистая текущая стоимость (NPV)	62
4.4.3	Оценка сравнительной эффективности исследования.....	67
4.5	Реестр рисков проекта.....	69
5.	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	73
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	74
5.2	Производственная безопасность	76
5.2.1	Анализ вредных и опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	77
5.3	Обоснование мероприятий по защите исследователя от опасных и вредных факторов.....	83
5.4	Экологическая безопасность	84
5.4.1	Анализ влияния процесса эксплуатации объекта на окружающую среду.....	84
5.4.2	Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	85
5.5	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	86
5.5.1	Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	86
5.5.2	Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий в случае возникновения ЧС	87
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	89
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	90
	Приложение А.....	95

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие мощных потоков лазерного излучения с веществом сопровождается различными нелинейными явлениями, одним из которых является оптический пробой твердых тел. В зависимости от условий облучения оптический пробой может развиваться как в объеме твердого тела, так и на его поверхности. Пороги приповерхностного оптического пробоя различных конденсированных сред, как правило, на два-три порядка меньше по сравнению с объемными и инициируется при интенсивности лазерного излучения $q \sim (10^6 - 10^7) \text{ Вт/см}^2$. Многочисленные исследования показали, что пороги оптического пробоя материалов зависят от различных типов собственных и примесных дефектов, образующихся в процессе выращивания кристаллов и при их механической обработке. В связи с этим различают собственный и примесный оптический пробой.

Развитие оптического пробоя во времени и в пространстве сопровождается интенсивным свечением различной физической природы – приповерхностная и объемная лазерная плазма, в спектре которой регистрируются линии атомов и ионов, входящих в состав твердого тела и окружающей атмосферы и люминесценция твердого тела. Соотношение интенсивностей различных видов свечений зависит от многочисленных факторов: параметров лазерного излучения и облучаемой мишени, от состава и давления окружающей образец атмосферы.

Актуальность.

Изучение физико-химических процессов, развивающихся в объеме и в приповерхностной области твердых тел различных классов соединений под действием интенсивного лазерного излучения, является актуальной задачей. Результаты таких исследований важны для изучения физики взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом и для развития прикладных исследований - лазерных технологий и оптических методов контроля материалов.

Цель работы – изучить спектральные и кинетические характеристики свечений, возникающих при объемном и поверхностном оптическом пробое кристаллов LiF и с примесью урана LiF(U) при возбуждении первой гармоникой неодимового лазера ($\lambda = 1,06$ мкм, $t_{1/2} = 14$ нс).

Задачи исследований.

1. Определить пороги поверхностного и объемного оптического пробоя кристаллов.
2. Измерить спектральные, кинетические и пространственные характеристики свечений, возникающих в объеме и в приповерхностной области в образцах LiF и LiF(U) при лазерном воздействии.
3. Выяснить роль воздуха атмосферного давления на спектральный состав приповерхностной лазерной плазмы.
4. Идентифицировать спектры и установить природу свечений, сопровождающих оптический пробой кристаллов LiF и LiF(U).

Научная новизна.

Впервые изучены спектральные и кинетические характеристики свечения оптического пробоя кристаллов LiF(U) – O при возбуждении 1 гармоникой Nd лазера. Установлено, что в объеме кристалла наблюдаются два вида свечений: излучение плотной низкотемпературной плазмы со сплошным спектром и фотолюминесценция кристалла, связанная со свечением комплекса UO_2 с максимумом при $\lambda = 510$ нм, возбуждаемая свечением объемной плазмы оптического пробоя.

В спектрах свечения приповерхностной лазерной плазмы кристаллов LiF-O и LiF(U)-O, возбуждаемых в атмосферном воздухе, регистрируются линии атомов и ионов азота и кислорода воздуха и атомы лития. При возбуждении кристаллов в вакууме в спектре свечения наблюдаются только линии лития.

Практическая значимость.

Экспериментальные результаты, полученные в работе, представляют интерес как для фундаментальной физики взаимодействия мощного лазерного излучения с кристаллами, так и для прикладной физики, в частности для развития метода искровой лазерной спектрометрии и оптических методов контроля объемных и поверхностных дефектов, образующихся в твердых телах в процессе их технологического приготовления.

1. Обзор литературы

1.1 Лазерно - индуцированный пробой в газах

Изучение лазерно-индуцированной плазмы началось с 1960 годов, когда был изобретен первый рубиновый лазер. Первые сообщения, посвященные плазме, были выделены в тезисы совещания Бренча и Кросса [1] в 1962 году. А уже в 1963 году Дебра–Гвидо и Лиоде [2] приводят первые аналитические результаты спектроскопического анализа поверхностей. В 1964 году наблюдается оптически индуцированный пробой в газе, о котором сообщил Мэйкер [3]. Для прямой генерации искры на металле, Рунге [4] в 1964 году, хотел использовать импульсный рубиновый лазер с модуляцией добротности. До 1967 года Евтушенко и Янг [5,6], оба они зафиксировали появление искры в воздухе с тем различием, что в работе Евтушенко было использовано излучение от двух лазеров, а Янг описал характеристики такой искры [5].

В 1967 году рядом компаний (Zeiss, Jarell-Ash, JEOL Ltd) были представлены первые приборы, главным принципом работы которых была лазерная абляция с дополнительным поперечным возбуждением лазерного факела искрой. Основным преимуществом по сравнению с классическим искровым анализом было то, что можно было проводить анализ непроводящих образцов. Развитие техники сделало доступным применение временного разрешения для контроля распада плазмы. Это позволило снизить непрерывное испускание и улучшить качество выделяемых спектральных линий.

Работы отечественных исследователей, представленные в 1970 году, в своем большинстве посвящены исследованию лазерной плазмы. В 1965 году Райзер [7] публикует работу, в которой сообщается о пробое и нагреве газов под действием лазерного излучения. Афанасьев и Крохин [8] в 1967 году представляют работу по испарению вещества под действием лазерного излучения. В том же году, Биберман и Норман [9], проводят точный анализ появления непрерывного спектра лазерной плазмы, в котором обнаруживаются дискретные спектральные линии. Свои замечания в

использование лазерного излучения в спектральном анализе вносит Буралев [10], в 1974 году. Основным итогом тех лет, считалась работа Райзера «Явления лазерно-индуцированного разряда» [11], опубликованная в 1977 году, которая включала в себя большую часть физических представлений по физике ударных волн, генерируемых лазерным излучением в веществе.

В процессе исследований было установлено, пробой в газах происходит благодаря двум главным явлениям: наличием свободных электронов в фокальной плоскости лазерного пучка, образованием большой электронной плотности. Теории начальной стадии электрического пробоя в световом луче разработаны достаточно подробно, особенно для газов.

В работе Райзера Ю.П. [12] было показано, что основные процессы в начальной стадии образования плазмы в прозрачных газах - это лавинная или многофотонная ионизация. Появление начальных электронов происходит из-за туннельного эффекта, который зависит от частоты. В работах Келдыша [13] было отмечено, что на высоких частотах туннельный механизм эквивалентен многофотонной ионизации.

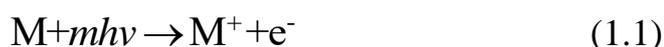
Свободные электроны могут появиться благодаря действию космических лучей или собственной радиоактивности Земли. Также электроны могут образовываться после первых фотонов лазерного излучения. Такие электроны появляются из частичек пыли, органических паров или из отрицательных ионов O_2^- или многофотонных процессов (ионизации атомов или молекул атмосферы). Также, свободные электроны могут ускоряться в переменном электрическом поле световой волны. На низких частотах этот процесс вместе с соударениями электронов приводит к джоулевому нагреву.

Большая плотность электронов и ионов достигается за счет лавинной или каскадной ионизации при плотности мощности лазерного излучения $10^8-10^{10} \text{ Вт/см}^2$. Процесс многофотонного поглощения, связанный с переходами из валентной зоны в зону проводимости, считается одним из важнейших нелинейных механизмов, ответственных за лазерное разрушение. В этом случае имеет место весьма резкая зависимость порога разрушения от частоты

в этой области спектра, где с увеличением частоты происходит изменение числа фотонов (от трех до двух, например), перекрывающих запрещенную зону.

Электронная лавинная ионизация, обусловленная лазерным излучением, так же является одним из механизмов, который определяет пробой в чистых кристаллических или аморфных веществах и жидкостях.

При высоких плотностях мощности многофотонная ионизация происходит согласно уравнению [14]:



где m - число фотонов, в общем случае свободные электроны приобретают ускорение электрическим полем оптического импульса в течение периода времени между столкновениями с нейтральными частицами. Из-за столкновений происходит быстрая термализация электронов. Достаточная энергия для ионизации присуща электронам, которые находятся в «хвосте» распределения Максвелла. Ионизация проходит по реакции [14]:



Благодаря этой реакции образуются другие свободные электроны, приобретающие энергию электрического поля и устанавливающие ионизацию. Электроны развиваются в течение лазерного импульса, что в конечном итоге инициирует ионизацию и пробой в газе.

Механизм пробоя представляет собой создание свободных электронов, быстрый локальный нагрев среды, развитие электронной лавины, повышении давления и разрушения среды. Поэтому, при электронной лавине (рисунок 1.1), большое значение имеет плотность свободных электронов в среде, частота столкновений электрона с третьим телом. Для развития электронной лавины достаточно одного начального свободного электрона.

Получение электронами энергии от фотонов, также может быть связано с трехчастичными столкновениями с атомами и молекулами. С увеличением

количества ионов, повышается число столкновений электрон – фотон – ион, что повышает вероятность последующего размножения электронов.

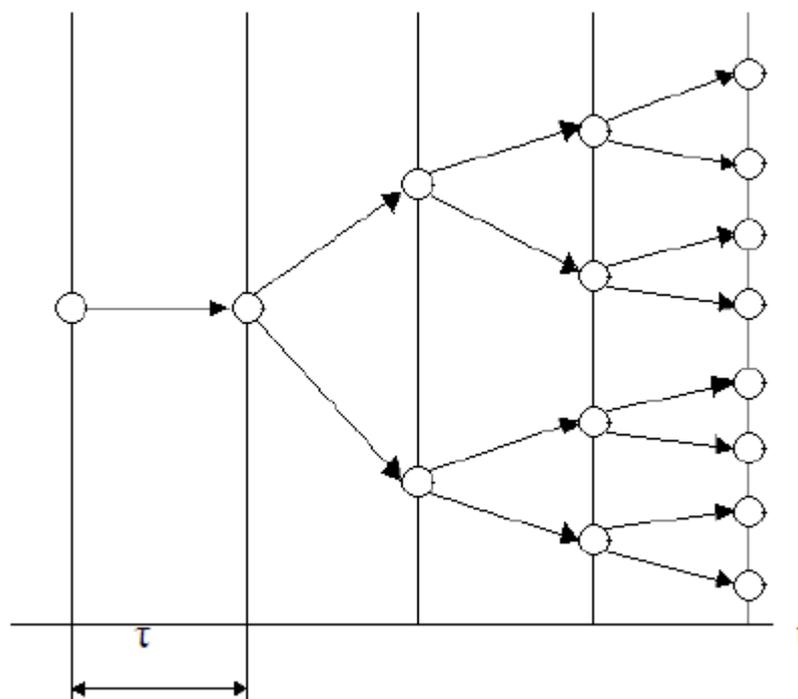


Рисунок 1.1 – Схема лавинного размножения электронов во времени [14].

Установление порога пробоя достаточно трудоёмкая задача, для установления порога следует учесть много параметров. Характеристики среды: пыль, пороги ионизации. Характеристики лазерного излучения: длительность, длина волны, плотность мощности излучения. Следует заметить, что доминирование многофотонной ионизации связывается с отсутствием зависимости порога пробоя от давления.

Сравнивая процессы протекания оптического пробоя в газе и твердом теле, обнаруживается, что концентрация электронов в зоне проводимости на много порядков превышает концентрацию свободных электронов в газе. Энергия, которую необходимо набрать электрону в зоне проводимости, равна ширине запрещенной зоны, которая меньше потенциала ионизации свободного атома. Пороговое же условие размножения свободных электронов достигается тогда, когда суммарный эффект за время действия лазерного импульса будет больше ширины запрещенной зоны.

Электронная ионизация, способствующая появлению плазмы, осуществляется соударением свободных электронов и нейтральных атомов.

Для упрощения сложной квантовой модели лавинной ионизации, Вейко В.П. [14] сделал допущение. Заключается оно в том, чтобы разделить процесс появления первичных электронов и само лавинное размножение.

Плотность первичных электронов, которые появились в процессе многофотонной ионизации, находится по формуле [14]:

$$n_{e0} = \Xi I_{\lambda}^{K_{\phi}} \quad (1.3)$$

где I_{λ} - интенсивность излучения лазера, Ξ - параметр, который пропорционален длительности лазерного импульса, n_{e0} - электронная плотность.

Скорость размножения электронов [14]:

$$\frac{dn_{\ominus}}{dt} = (U_i - U_p) n_{\ominus} \quad (1.4)$$

где U_i - скорость ионизации, U_p - скорость потерь. Из этого выражения [14] следует, что

$$n_e(t) = n_{\ominus 0} \exp[(U_i - U_p)t] \quad (1.5)$$

Для того чтобы произошёл оптический пробой, величина должна иметь критическое значение порядка 10^8 см^{-3} , которое соответствует начальной фазе появления плазмы под действием лазерного импульса. [14]

Детальное изучение порогов пробоя в молекулярном кислороде и азоте с применением Nd:YAG – лазера было проведено Стриккером и Паркером [15] в 1982 году. В эксперименте был рассмотрен диапазон давлений от 1 до 50 атм, в этом диапазоне основной процесс ионизации носил лавинный характер. При давлении в 1 атм, порог пробоя в лабораторном воздухе составил $8,2 \cdot 10^{10} \text{ Вт/см}^2$. Было отмечено, что при увеличении давления на порядок величины, увеличивается порог пробоя также на порядок величины.

Симеонссон и Мизиолек [16] в 1994 году измерили пороги пробоя Nd:YAG – лазера с длительностью импульса 7 – 8 нс в воздухе. В эксперименте применялись: основная, удвоенная, утроенная и учетверенная частоты с длинами волн 1064, 532, 355 и 266 нм. В 1983 году были опубликованы

результаты эксперимента Уильямса [17]. Изучение порога пробоя в лабораторном воздухе с применением Nd:YAG – лазера на удвоенной длине волны (536 нм) и длительностью импульса 30 – 140 пс. Обнаруженные значения порогов находятся в пределах от 1 до Вт/см². В таблице 1.1 представлены значения плотности мощности пробоя для различных условий и объектов наблюдения. Данные значения порога пробоя рекомендуется использовать как ориентир при проведении экспериментов.

Таблица 1.1 Измеренные пороги пробоя для некоторых лазеров и газов [18]

Лазер, длина волны, длительность импульса и др.	Газ и давление	Порог пробоя, плотность мощности (Вт/см ²)	Ссылка
Nd:YAG, 1064 нм, 10 нс	Лабораторный воздух, 1 атм.	$8,2 \cdot 10^{10}$	Stricker and Parker, 1982
Nd:YAG, 1064 нм, 8 нс	Лабораторный воздух, 1 атм.	$2,0 \cdot 10^{10}$	Simeonsson and Miziolek, 1994
Nd:YAG, 1064 нм, 8 нс, диаметр пятна $5 \cdot 10^{-3}$ см	Лабораторный воздух, 1 атм.	$5,0 \cdot 10^{11}$	Tambay and Thareja, 1991
Nd:YAG, 1064 нм, 7 нс	Азот, 760 тор	$8,0 \cdot 10^{14}$	Dewhurst, 1978
Nd:YAG, 532 нм, 7 нс	Лабораторный воздух, 1 атм.	$1,5 \cdot 10^{10}$	Simeonsson and Miziolek, 1994
Nd:YAG, 532 нм, 6 нс, диаметр пятна $5 \cdot 10^{-3}$ см	Лабораторный воздух, 1 атм.	$1,0 \cdot 10^{11}$	Tambay and Thareja, 1991
Nd:YAG, 532 нм, 8 нс	Лабораторный воздух, 1 атм.	$2,5 \cdot 10^{12}$	Bindhu <i>et al.</i> , 2004
Nd:YAG, 532 нм, 80 пс	Лабораторный воздух, 1 атм.	$1,8 \cdot 10^{13}$	Williams <i>et al.</i> , 1983
Nd:YAG, 532 нм, 25 пс	Азот, 760 тор	$4,0 \cdot 10^{13}$	Dewhurst, 1978
Nd:YAG, 335 нм, 7 нс	Лабораторный воздух, 1 атм.	$2,7 \cdot 10^{10}$	Simeonsson and Miziolek, 1994

Nd:YAG, 335 нм, 4 нс, диаметр пятна $5 \cdot 10^{-3}$ см	Лабораторный воздух, 1 атм.	$1,05 \cdot 10^{11}$	Tambay and Thareja, 1991
Nd:YAG, 266 нм, 7 нс	Лабораторный воздух, 1 атм.	$1,7 \cdot 10^{10}$	Simeonsson and Miziolek, 1994
Nd:YAG, 266 нм, 4 нс, диаметр пятна $5 \cdot 10^{-3}$ см	Лабораторный воздух, 1 атм.	$1,06 \cdot 10^{11}$	Tambay and Thareja, 1991
ArF, 193 нм, 10 нс	Лабораторный воздух, 1 атм.	$9,7 \cdot 10^9$	Simeonsson and Miziolek, 1994

1.1.2 Явления, сопровождающие пробой в газах

Излучающая плазма, после пробоя в газе распространяется по всем направлениям от места пробоя, при отсутствии препятствий. Лазерное излучение, при достаточно большом запасе плотности мощности, частично проходит через объём плазмы, частично рассеивается и какая-то часть поглощается. Из-за асимметричности поглощения фотонов в направлении лазерного луча, плазма распространяется вдоль него к источнику лазерного излучения в течение лазерного импульса. Таким образом, вид плазмы представляется собой конус, основание которого обращено к линзе. [18]

Появление мощных непрерывных CO₂-лазеров в 1960-х годах, способствовало созданию непрерывной лазерно-индуцированной плазмы. Такая плазма называется непрерывным оптическим разрядом (НОР). Впервые о таких разрядах сообщил Генералов с сотрудниками в 1970 году. В работе Генералова [19] НОР был получен при использовании излучения 10,6 мкм CO₂-лазера мощностью не менее 25 Вт. Давление газов изменялось от 1 до 200 атмосфер. Устройство, использованное в эксперименте, которое работает с прокачиваемым газом, называется оптический плазматрон. В плазматроне температура плазмы не превышает 15 000 К.

1.1.3 Пробой в твердом теле и на его поверхности, в аэрозолях и жидкостях

Основные задачи, в которых применяется ЛИЭС - это анализ твердых веществ, реже жидкости и аэрозоли. Также, возможно появление нежелательного пробоя на поверхности оптических элементов, что существенно сокращает их срок службы и приводит к рассеиванию падающего лазерного излучения. Все эти явления на поверхности или внутри прозрачных диэлектриков привлекают внимание исследователей. Отдельный интерес представляет изучение оптических разрушений. Эта область в значительной степени является эмпирической. Значение порога пробоя зависит от частоты материала, подготовки поверхности, шероховатости и частиц, которые находятся на поверхности. При многомодовом составе лазерного луча на поверхности могут появиться точки локального перегрева, которые способствуют образованию плазмы ниже средних пороговых значений. Обычно эти величины для плазмы ЛИЭС находятся в диапазоне $10^7 - 10^{10}$ Вт/см². Путем наблюдений за возникновением абляции можно оценить величины порога пробоя. [18]

Создание пико- и фемтосекундных лазеров сделало возможным изучение некоторых процессов абляции. Наблюдая за развитием абляции можно оценить величины порога пробоя. В работе Хашиды с сотрудниками [20], обсуждаются пороги и скорость абляции при использовании излучения Nd:АИГ-лазера ($\lambda = 532$ нм, $\tau = 6$ нс) и Ti:сапфирового лазера ($\lambda = 800$ нм, $\tau = 70$ фс, $\tau = 5$ пс) при облучении медных мишеней. Результаты представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Результаты измерения порогов пробоя для некоторых лазерных импульсов на поверхности твердых тел [18].

Лазер, длина волны, длительность импульса	Поверхность, газ и его давление	Порог пробоя, плотность мощности (Вт/см ²)	Ссылка
Nd:YAG, 532 нм, 6 нс	Cu, атм.воздух	$1,67 \cdot 10^9$	Semerok <i>et al.</i> , 2002

Ti:сапфировый, 800 нм, 5 пс	Cu, атм.воздух	$9 \cdot 10^{10}$	Hashida <i>et al.</i> , 2002
Ti:сапфировый, 800 нм, 70 ас	Cu, атм.воздух	$2,5 \cdot 10^{11}$	Hashida <i>et al.</i> , 2002
Лазер с перекрытием импульсов, 620 нм, 90 фс	BaTiO ₃ , вакуум	$5 \cdot 10^{11}$	Millon <i>et al.</i> , 2003
Лазер с перекрытием импульсов, 620 нм, 120 фс	Кварцевое стекло, атм.воздух	$1 \cdot 10^{13}$	vod der Linde and Schüler, 1996 (исследованы также стекло, сапфир и фторид магния)
Nd:YAG, 1064 нм, 6,4 нс	Кварцевое стекло, аргон	$5,5 \cdot 10^{10}$	Galt <i>et al.</i> , 2003

В работе Фон дер Линде и Шюлер [21] были измерены пороги пробоя для четырех прозрачных диэлектриков (стекло, фторид магния, сапфир и кварцевое стекло). Порог пробоя для кварцевого стекла составил $1 \cdot 10^{13}$ Вт/см². В общем, можно ожидать, что пороги для поверхностей будут ниже из-за поверхностных дефектов, таких, как царапины, впадины или частицы пыли.

1.2 Явления, сопровождающие пробой на поверхности твердого тела

При высокой плотности мощности лазера образовывается плазменный факел, передний фронт импульса взаимодействует с материалом: нагревает, плавит и испаряет. После всех взаимодействий образуется слой, который располагается над поверхностью.

На рисунке 1.2 представлено образование плазмы на плоской поверхности, расширение которой идёт навстречу распространения лазерного луча [18].

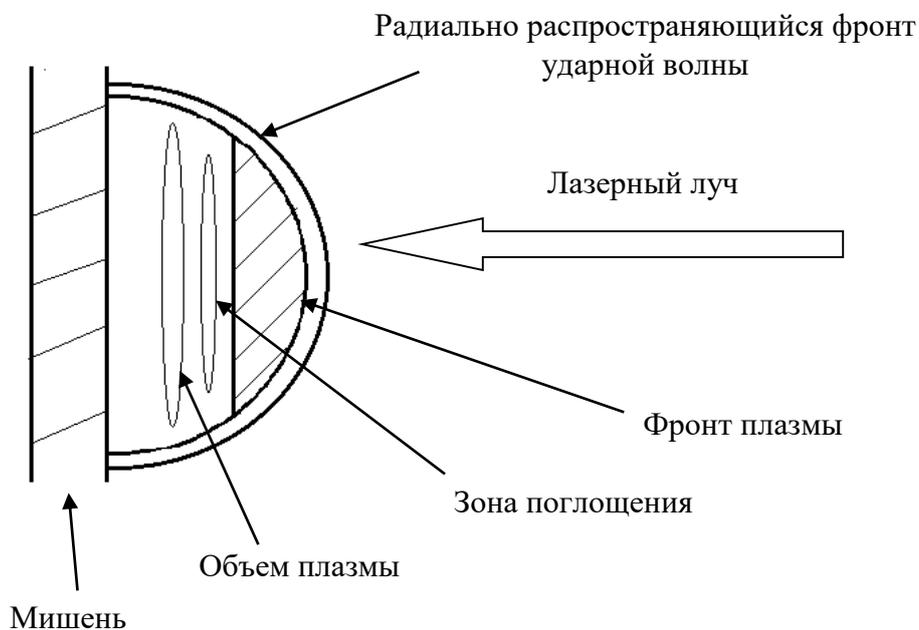


Рисунок 1.2 – Схема развития лазерной плазмы, индуцированной на твердой поверхности [18]

Следует выделить три основные зоны: фронт плазмы, фронт ударной волны и фронт поглощения. Взаимное расположение этих зон зависит от интенсивности лазерного излучения. При низкой интенсивности, фронт поглощения, связанный с фронтом плазмы, идёт за фронтом ударной волны. В такой конфигурации для того чтобы фронт поглощения двигался по направлению к лазерному лучу, нужна и энергия ударной волны, которая распространяется в атмосфере за её фронтом, и излучение плазмы. Такой процесс носит название волны горения, поддерживаемого лазером (ГПЛ) [18]. При более высоких интенсивностях фронт ударной волны может нагреть газ, приводя к поглощению лазерного излучения. Из этого следует, что перед фронтом ударной волны находится зона поглощения, вместе они располагаются перед фронтом плазмы. Этот процесс называют волной детонации, поддерживаемой лазером (ДПЛ), аналогично процессу химической детонации. При определенных условиях, когда интенсивность лазерного излучения достигает наибольших значений, плазма способна нагревать атмосферу, расположенную перед фронтом [18]. Нагретая таким образом атмосфера начинает поглощать излучение. Таким образом, устанавливается связь между зоной поглощения и фронтом плазмы. Это процесс, называемый волной излучения, поддерживаемой лазером (ИПЛ) [18].

В условиях, когда отличие порога пробоя от падающей мощности невелико, плазма, которая образовалась на воздухе при атмосферном давлении, находится в режиме ДПЛ. На рисунке 1.3 представлено примерное положение расширяющейся плазмы, зоны поглощения и фронта ударной волны относительно друг друга [18].

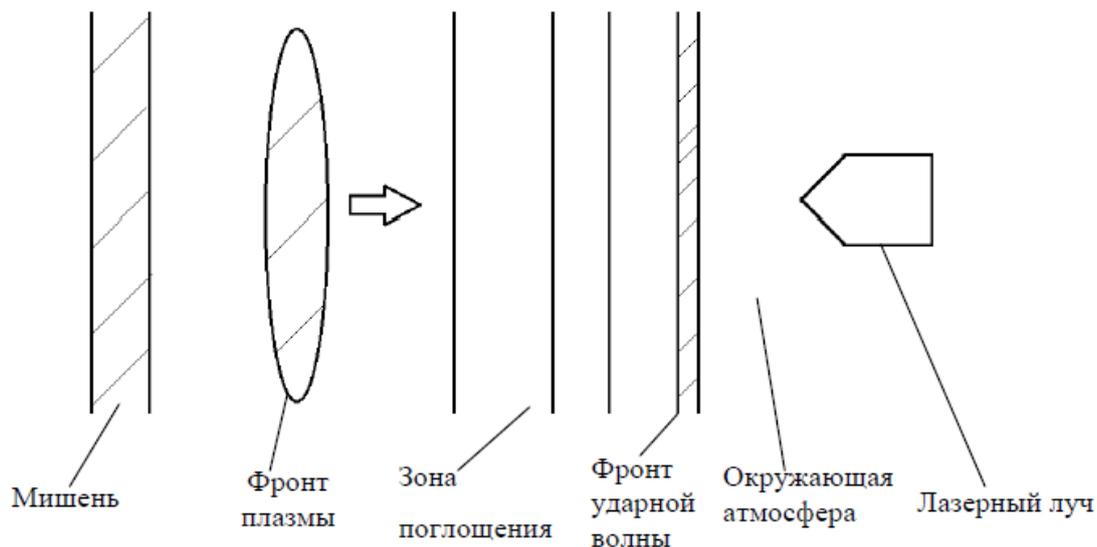


Рисунок 1.3 – Схематическое изображение элементов волны детонации, поддерживаемой лазером (ДПЛ), расширяющейся в окружающий газ атмосферного давления. [18]

При более высоких плотностях мощности лучше использовать описание с помощью волны ИПЛ, где эти три зоны эффективно соединяются. В своей работе, Рут [22] дал качественные характеристики вариации скорости, давления, температуры и плотности для всех трех типов плазмы (ГПЛ, ДПЛ и ИПЛ) в одномерном приближении. Успехи в моделировании режима плазмы, изучение механизмов и скорости абляции рассмотрены в работе Богартса [23]. После прекращения лазерного импульса плазма теряет энергию и затухает. Механизмы потери состоят из рекомбинации, излучения и теплообмена.

1.2.1 Оптические свойства реальных материалов (несобственный оптический пробой на поверхности)

По своей природе, все доступные материалы имеют неоднородности, как уже говорилось ранее, идеально чистых сред очень мало. Под действием лазерного излучения, образец претерпевает механические изменения. Эти изменения имеют тепловой характер, ведь, падающее излучение поглощается

поверхностью и в объеме вещества. Основную роль в развитии пробоя на поверхности твердых мишеней играют физические и химические неоднородности. Такие локальные области, имеющие отличные от общей массы коэффициенты поглощения, нагреваются быстрее и приводят к разрушению прозрачной среды под действием лазерного излучения.

Общеизвестно, что пробой на поверхности, как правило, имеет меньший порог, чем пробой в объеме материала. Результаты исследований свидетельствуют о том, что поверхностная лазерная плазма образуется с помощью тех же механизмов, что и при объемном пробое.

При поглощении излучения поверхностными неоднородностями (дефектами), происходит увеличение температуры и повышения давления в локальных областях, которое приводит к растрескиванию кристалла или стекла в области вокруг неоднородности.

Наличие химических неоднородностей, обуславливается, тем, что в процессе подготовки образца к облучению лазерным излучением, проводится механическая обработка. Такие посторонние соединения отличаются коэффициентом поглощения. Так, в работе [24] исследовались алюминиевые сплавы, прошедшие обработку инструментом. АЛ-9, АЛ-24, АЛ-23 были отполированы абразивом и проточены алмазом. Химический состав сплава АЛ-9 : Al - 89,6 ÷ 93,8 %, Si – 6 ÷ 8 %, Mg – 0,2 ÷ 0,4 %, Fe до 1,5 % . АЛ-23 : Al - 92,05 ÷ 93,88 %, Si – до 0,2 %, Mg – 6 ÷ 7 %, Fe до 0,2 %. АЛ-24 : Al – 91,9 ÷ 94,7 %, Si – до 0,3 %, Mg – 1,5 ÷ 2 %, Fe до 0,5% [25]. Сплавы применяются для изготовления фасонных отливок. Сплав АЛ-9 имеет очень высокую герметичность, сплавы АЛ-23 и АЛ-24 коррозионно-стойкие сплавы.

В сплаве АЛ-9 присутствуют включения второй фазы Mg_2Si и $CuAl_2$, в сплаве АЛ-23 Al_3Mg_2 , Al_2Ti , Al_3Zr . Различие частиц второй фазы в двух сплавов в том, что частицы АЛ-23 имеют больший размер и низкую плотность распределения по поверхности, чем в образцах АЛ-9. У образцов АЛ-24 наблюдается увеличение размеров частиц и ещё меньшая плотность распределения [24].

Оптическое поглощение излучения на поверхности мишени определяется размером, составом и плотностью распределения по поверхности частиц. Из-за того, что состав и размеры частиц отличаются, оптическое поглощение на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм будет неоднородным. По итогам исследования, стало ясно, что чем выше плотность распределения по поверхности частиц второй фазы, тем больше поглощение лазерного излучения и тем при более низких интенсивностях возникает плазма.

На поверхности материала также имеются неоднородности, дефекты и прочие механические искажения образца. Появление таких дефектов, обычно связано с обработкой инструментом материала, старением поверхности в процессе хранения. К таким собственным микрон неоднородностям относят: сферические поры, цилиндрические канавки, трещины, чешуйки, шероховатости, микроострия. Между собой они отличаются геометрическими размерами и формой, характером взаимодействия с падающим лазерным излучением.

Присутствие на специально обработанных оптических поверхностях канавок и прочих физических дефектов снижает порог пробоя в 4 раза по сравнению с пробоем в объеме [26]. Для подтверждения этого, нужно чтобы физические дефекты имели размеры меньше длины волны. Этого можно достигнуть, если использовать специально обработанную оптику. Такие неровности представляют собой затравку для развития пробоя, на них происходит концентрация силовых линий. Представив, трещину как полый дискообразный эллипсоид, с условием, что силовые линии перпендикулярны диску, получим, то, что электрическое поле на краях эллипсоида увеличивается в $\varepsilon = n^2$. Поэтому порог пробоя на поверхности достигается при меньшей плотности потока, чем в объеме.

При рассмотрении теплового взаимодействия падающего лазерного излучения и поверхности, нужно понимать, что не все дефекты нагреваются равномерно. Из-за частичной или полной теплоизоляции от материала нагрев неоднородностей идет быстрее, чем нагрев основного материала. Чешуйки

имеют слабый тепловой контакт с поверхностью. При взаимодействии падающего лазерного излучения, они первыми взаимодействуют с излучением, и соответственно, развитие пробоя будет наблюдаться вблизи неоднородностей. В ряде экспериментов, были получены результаты, по которым можно сказать, что чешуйки носят характер затравочных центров для развития поверхностной лазерной плазмы (ПЛП) [27].

Чешуйки – это тонкие слои металла, которые теплоизолированы от подложки. Их толщина всего лишь доли микрон, линейный размер до десятков микрон. Концентрация на поверхности колеблется от 10^3 до 10^5 см⁻².

В работе [28] были получены результаты, в которых наблюдалось неоднородное точечное свечение зеркал. Исследовался пробой воздуха вблизи металлических зеркал, под действие неодимового лазера со следующими параметрами: $\tau = 0,4$ мкс, диаметр пятна $d = 0,5$ см. В экспериментах наблюдалась точечная структура свечения. Установлено, что пространственное распределение микроплазм индивидуально для различных материалов. Алюминиевое зеркало имеет плотность локальных зон свечения $5 \cdot 10^4$ см⁻², стальное и медное зеркало на два порядка меньше. Можно сказать, что свечение и его структура определяется самими неоднородностями.

1.3 Постановка цели и задачи исследований

Цель настоящей работы – изучить спектральные и кинетические характеристики свечений, возникающих при объемном и поверхностном оптическом пробое кристаллов фторида лития с примесью кислорода LiF и урана LiF(U) при возбуждении первой гармоникой неодимового лазера ($\lambda = 1,06$ мкм, $t_{1/2} = 14$ нс).

Задачи исследований.

1. Определить пороги поверхностного и объемного оптического пробоя кристаллов.
2. Измерить спектральные, кинетические и пространственные характеристики свечений, возникающих в объеме и в приповерхностной области в образцах LiF и LiF(U) при лазерном воздействии.
3. Выяснить роль воздуха атмосферного давления на спектральный состав приповерхностной лазерной плазмы.
4. Идентифицировать спектры и установить природу свечений, сопровождающих оптический пробой кристаллов LiF и LiF(U).

2 Методика эксперимента и экспериментальные результаты

2.1 Лазерный стенд для исследования приповерхностной лазерной плазмы

Экспериментальная установка для исследования низкорогового оптического пробоя, инициируемого лазерным излучением на поверхности твердых тел, приведена на рисунке 2.1.

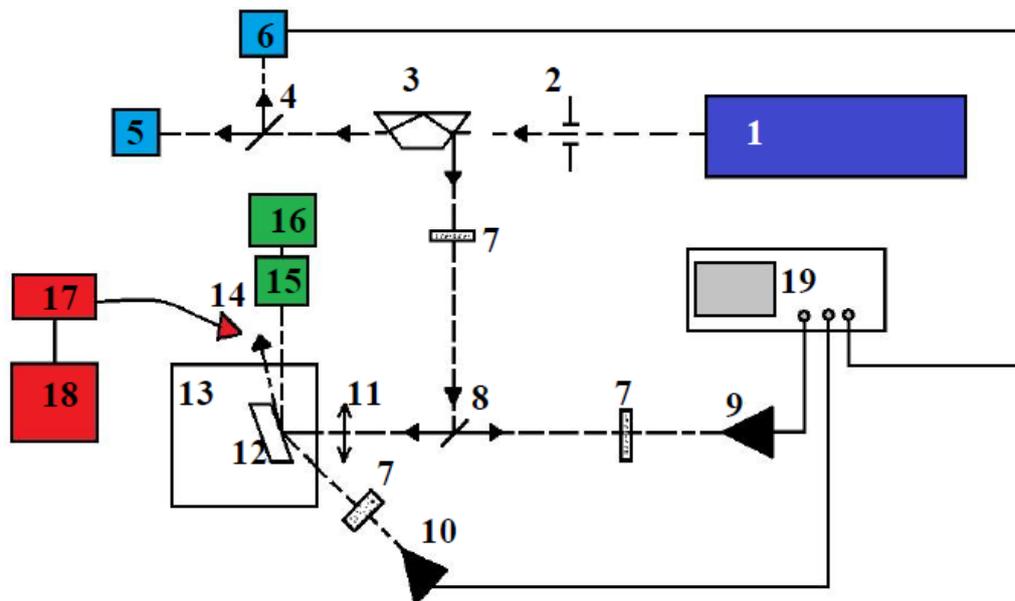


Рисунок 2.1 – Лазерный стенд для исследования приповерхностной лазерной плазмы

1 – неодимовый лазер ($\lambda = 1064$ нм); 2 – формирующая диафрагма; 3 – призма Дове; 4 – светоделительная пластинка; 5 – ИКТ-1Н; 6 – фотоэлемент коаксиальный ФК-19; 7 – светофильтры (НС); 8 – диэлектрическое зеркало; 9 – ФЭУ зонный; 10 – ФЭУ панорамный; 11 – кварцевый объектив, строящий изображение диафрагмы; 12 – образец; 13 – вакуумная камера; 14 – оптоволоконно; 15 – микроскоп МБС-10; 16 - матрица фотоаппарата Canon EOS 600D; 17 – спектрометр AvaSpec Dual; 18 – ПК; 19 – осциллограф Tektronix DPO 3034.

В качестве источника возбуждения в экспериментах использовался YAG:Nd лазер ($\lambda = 1064$ нм, 150 мДж) (1), максимальная плотность энергии (H) на поверхности исследуемых мишеней достигает ~ 20 Дж/см². В системе применена проекционная схема, благодаря которой на поверхности образца формируется пучок с однородным распределением плотности энергии.

Лазерное излучение делилось с помощью призмы Дове (3) на измеритель энергии лазерного импульса ИКТ-1Н (5) и интерференционным

зеркалом (4) на фотоприемник ФЭК-1 (6) для измерения длительности и формы лазерного импульса. Основной пучок направлялся в оптический тракт для облучения образца. Энергия импульса на поверхности образца измерялась пироэлектрическим измерителем энергии и изменялась с помощью набора нейтральных светофильтров разной оптической плотности (7).

Формирование однородного пучка происходило с помощью диафрагмы (2) и объектива (11) (фокусное расстояние 50 мм) в пятно диаметром 1 мм. Пучок перпендикулярно направлялся на образец (12), который находился в вакуумной камере (13) или в атмосферном воздухе.

Кинетика свечения лазерной плазмы регистрировалась зонным ФЭУ (9) и панорамным ФЭУ (10). Сигналы с ФЭУ измерялись осциллографом (19). Синхронизация двух каналов ФЭУ, регистрирующего кинетику свечения ПЛП и ФЭК, регистрирующего форму ЛИ, осуществлялась с помощью свечения прессованных образцов сахара (химическая формула $C_{12}H_{22}O_{11}$), являющегося преобразователем первой гармоники Nd-лазера во вторую (532 нм). Кинетика свечения сахара ($\lambda = 532$ нм) приведена на рис. 2.2 (верхняя осциллограмма). На нижней кривой приведена осциллограмма лазерного импульса. Цена большого деления на оси времени (см. рис. 2.2, а) составляет 40 нс. Таким образом, точность привязки кинетики свечения ПЛП к лазерному импульсу составляет $\sim 2-3$ нс.

Пространственная картина свечения ПЛП фотографировалась фотоаппаратом Canon Eos 600D (16) через микроскоп МПД-10 (15). С помощью спектрометра AvaSpec Dual (17) регистрировался спектр свечения лазерной плазмы за один импульс возбуждения (без временного разрешения). Временное разрешение измерительной системы составляло ~ 10 нс, пространственное ~ 50 мкм.

2.1. Объекты исследования

Объектом исследования являются выращенные в Государственном оптическом институте им. Вавилова методом Стокбаргера кристаллы LiF-O (с содержанием примеси кислорода от $6,5 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ вес. % по данным активационного анализа) и выращенные в Институте физике национальной академии наук Кыргызстана методом Киропулоса на воздухе в платиновом тигле кристаллы LiF(U)-O двух партий с одинаковым содержанием азотнокислого уранила ($UO_2(NO_3)_2$) по шихте, равным 0,01 мол.%. В одной из партий дополнительно в шихту при выращивании кристаллов вводится гидрат окиси лития (LiOH) в количестве от 0,5 до 4 мол.%. [29]

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Научно-техническое исследование посвящено изучению образованию приповерхностной плазмы под воздействием лазерного излучения. Объектом исследования настоящей работы является поверхностная плазма, образующаяся в приповерхностной области кристаллов LiF и LiF(U). Изучение процесса образования плазмы и проведение экспериментов по этому вопросу, позволит глубже понять физику процесса формирования плазмы. В процессе работы будут определены энергетические пороги приповерхностного оптического пробоя. Измерение временных и спектральных характеристик отразит полную картину формирования процесса образования плазмы. Наличие современных лазеров позволяет провести НТИ на высоком уровне ресурсоэффективности.

Полученные результаты исследования могут быть использованы для решения прикладных проблем – диагностики оптических материалов, пригодных для применения в мощных лазерных системах, для развития методов лазерной искровой спектроскопии и при разработке лазерных технологий.

Потенциальными потребителями результатов исследования являются – Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, и ФГУП ФНПЦ «Алтай», г. Бийск.

Целью данного раздела является оценка коммерческого и инновационного потенциала результатов научно-технического исследования низкопорогового оптического пробоя, планирование процесса проектирования, определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Регистрация спектрально-кинетических параметров приповерхностной лазерной плазмы, в первую очередь, представляет интерес для исследовательских лабораторий, деятельность которых направлена на изучение спектрального состава поверхностного слоя образца.

В настоящее время на рассматриваемом рынке существует не так много компаний, поставляющих оборудование, в основе которого лежит схема, способная регистрировать спектрально-кинетические параметры. Например, *Rigaku, Avantes*. Данные компании занимаются поставкой оборудования для измерительных лабораторий разного рода, цены на продукцию типичную разрабатываемой в данной работе схеме, начинаются от 400 тыс. руб. в минимальной комплектации. [1]

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка оборудования для анализа спектра излучения

Тип лаборатории	<i>Avantes</i>	<i>Rigaku</i>	Проектируемая схема
Анализ атомарных спектров	–	+	+
Анализ молекулярных спектров	+	+	+/-

Так как регистрации спектрально кинетических параметров приповерхностной лазерной плазмы представляет собой определенные трудности для стандартных спектрометров, а применение дорогостоящего оборудования Rigaku не всегда возможно, то создание собственной схемы регистрации является весьма актуальным. [1]

4.1.2 Технология QuaD

Технология QuaD позволяет оценить целесообразность проведения исследования в области регистрации спектрально-кинетических параметров плазмы. Для данной разработки подобраны веса критериев согласно основным

задачам проекта, связанным в первую очередь с использованием установки для конкретной узкой области исследований. Результаты анализа разработки представления в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для анализа целесообразности разработки

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,04	30	100	0,3	1,2
2. Помехоустойчивость	0,06	50	100	0,5	3
3. Надежность	0,1	70	100	0,7	7
4. Унифицированность	0,07	85	100	0,85	5,95
5. Уровень материалоемкости разработки	0,1	70	100	0,7	7
6. Уровень шума	0,04	60	100	0,6	2,4
7. Безопасность	0,1	85	100	0,85	8,5
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	80	100	0,8	1,6
9. Функциональная мощность	0,1	75	100	0,75	7,5
10. Простота эксплуатации	0,12	75	100	0,75	9
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,03	85	100	0,85	2,55
12. Ремонтопригодность	0,1	90	100	0,9	9
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13. Конкурентоспособность продукта	0,02	50	100	0,5	1
14. Цена	0,1	80	100	0,8	8
Итого	1				73,7

Полученное средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки составило **73,7** балла, что говорит о перспективности разработки выше среднего.

4.1.3 SWOT-анализ

Во время работы над проектом исследования необходимо проработать и учесть его слабые и сильные стороны, а также возможные варианты развития или деградации проекта. В таблице 4.3 представлены результаты анализа

схемы регистрации спектрально кинетических параметров приповерхностной лазерной плазмы.

Таблица 4.3 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Безопасность технологии 2) Стоимость конечной установки 3) Ремонтопригодность проектируемой установки 4) Неагрессирующий контроль образцов 	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Узкая направленность исследования 2) Высокое энергопотребление 3) Сложность расшифровки спектров 4) Низкая мобильность установки
<p>Возможности:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Модификация схемы для изучения другого спектрального диапазона 2) Создание новых материалов для лазерной техники 3) Востребованность спектрального анализа с высоким разрешением 4) Совершенствование методов контроля 	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта «Сильные стороны и возможности»:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) При низкой стоимости системы, достигается высокое разрешение анализа 2) Дополнительные модификации системы не сказываются на её ремонтопригодности 3) Неагрессирующий способ контроля позволяет улучшать методы контроля 4) Безопасность технологии позволит создать новые материалы с низким вредом для окружающей среды 	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта «Слабые стороны и возможности»:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Сложности модификации системы при сохранении энергопотребления на требуемом уровне 2) Ограниченность в материалах для исследования 3) Сложности в расшифровке спектров для новых материалов 4) Низкая мобильность установки не позволит усовершенствовать существующие методы контроля
<p>Угрозы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Создание новой альтернативной технологии 2) Снижение интереса к данному направлению исследований 3) Отсутствие квалификации обслуживающего персонала 	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта «Сильные стороны и угрозы»:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Необходимость в снижении стоимости установки 2) Повышение ремонтопригодности установки 	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта «Слабые стороны и угрозы»:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Появление менее энергозатратных технологий 2) Отсутствие интереса заказчика из-за узкой направленности направления исследования 3) Низкая мобильность системы не привлечет дополнительное финансирование

4) Прекращение финансирования исследования	3) Низкая квалификация персонала негативно скажется на безопасности технологии 4) Неразрушающий контроль поможет поддержать интерес у заказчиков	4) Отсутствие квалификации у персонала не позволит расшифровывать спектры.
--	---	--

Анализируя матрицу SWOT, можно сделать следующие выводы:

- Для конкурентоспособности данной технологии необходимо снизить энергопотребление при улучшенной схеме регистрации.

- Повысить мобильность установки за счет замены компонентов. Достигнув высокой мобильности, станет возможным проведение полевых работ.

- Для работы на проектируемой установке, обслуживающий персонал должен обладать высокой квалификацией, так как установка состоит из высокотехнологического оборудования. Обучение планируется проводить при введении установки в эксплуатацию.

- Разработать эталоны для анализа новых материалов.

- Неразрушающий контроль и ремонтпригодность установки существенно улучшат существующие методы контроля.

На данный момент проведение исследования оправдано, так как в данном направлении не существует аналогичных схем регистрации, а лаборатория заинтересована в проведении исследований спектрального состава приповерхностной плазмы.

4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Для проверки пригодности НТИ к коммерциализации заполним бланк оценки степени готовности научного проекта (таблица 4.4). Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

При значении $B_{\text{сум}}$ от 75 до 60 разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. От 59 до 45 – перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таблица 4.4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации.

п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	3
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	3
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	1
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	1
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	2
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	2
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	2

15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	2
Итого баллов		50	39

По результатам оценки, можно сказать, что перспективность готовности полученных результатов НТИ к коммерциализации выше среднего, а уровень собственных знаний – средний. Для повышения готовности к коммерциализации проекта необходимо: разработать бизнес-план и стратегию реализации, проработать вопросы международного сотрудничества и пути продвижения результатов НТИ на рынок. Для решения первых двух пунктов следует расширить штат сотрудников привлечением маркетологов. Вопросы с международным сотрудничеством решаются через посредников, например, международными партнерами ВУЗа. Решив первые две проблемы, известность продукта поднимется и выход на рынок станет проще.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1. Цели и результат НТИ

Информация о заинтересованных сторонах НТИ, иерархии целей проекта и критериях достижения целей приведена в таблице 4.5

Таблица 4.5 - Заинтересованные стороны проекта.

Заинтересованные стороны НТИ	Ожидания заинтересованных сторон
СО РАН, г. Новосибирск	Исследование рабочей группы развития приповерхностной лазерной плазмы с описанием всех процессов её развития и характеристик.
Рабочая группа НТИ	Исследовать закономерности развития приповерхностной плазмы, влияние качества поверхности на образование плазмы, изучить характеристики получаемой плазмы.

В таблице 4.6 представлена информация об иерархии целей исследования и критериях достижения целей. Цели НТИ включают цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 4.6 - Цели и результаты проекта

Цели НТИ:	Создание последовательной теории, описывающей все аспекты формирования лазерной искры на поверхности мишеней.
Ожидаемые результаты НТИ:	Разработка рекомендаций к получению лазерной искры с параметрами, пригодными для искровой спектрометрии.
Требования к результату НТИ:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Феноменологическое описание развития лазерной искры на поверхности мишени. 2. Закономерности энергетических процессов при воздействии лазерного излучения. 3. Закономерности волновой динамики при воздействии лазерного излучения. 4. Влияние качества обработки поверхности мишени на получение лазерной искры.

4.2.2 Структура работ в рамках научного исследования

Исследование закономерностей развития приповерхностной лазерной плазмы занимается рабочая группа. Роль и функции каждого участника представлены в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Рабочая группа НТИ

ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции
Олешко В.И. профессор отделения материаловедения, ИШНПТ НИ ТПУ	Научный руководитель	Координация деятельности исполнителя; проверка и анализ результатов научно-технического исследования
Круглов В.А. магистрант отделения материаловедения ИШНПТ НИ ТПУ	Исполнитель	Выполнение исследования, составление отчетов по результатам экспериментов

Выполнение и планирования работы по теме исследования было разделено на описанные в таблице 4.8 этапы

Таблица 4.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер, научный руководитель

	3	Выбор направления исследований	Инженер, научный руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Инженер, научный руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов	Инженер
	6	Анализ материальной базы проекта	Инженер, научный руководитель
	7	Разработка и изготовление комплектующих схемы	Инженер
	8	Сборка и юстировка схемы	Инженер, научный руководитель
	9	Проведение эксперимента	Инженер, научный руководитель
	10	Анализ полученных результатов	Инженер
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка целесообразности проведения исследований	Инженер, научный руководитель
Подготовка отчетной документации	12	Оформление полученных результатов и сделанных выводов	Инженер, научный руководитель

4.2.3 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты составляют значительную часть затрат на разработку проекта, поэтому необходимо определить трудоемкость каждого из этапов работы. Ожидаемая трудоемкость рассчитывается согласно следующей формуле [34]:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{мин}i} + 2t_{\text{макс}i}}{5} \quad (3.1)$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\text{мин}i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\text{макс}i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Учитывая ожидаемую трудоемкость, определяется продолжительность каждого этапа работы при возможности выполнения этапа несколькими исполнителями одновременно [34].

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \quad (3.2)$$

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

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

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу

на данном этапе, чел.

Таблица 4.9 – Продолжительность этапов работ

№ раб	Минимально возможная трудоемкость, чел.-дн	Максимально возможная трудоемкость, чел.-дн	Ожидаемая трудоемкость, чел.-дн	Продолжительность работы, дн
1	5	2	3,2	3,2
2	30	15	21	10,5
3	3	1	1,8	0,9
4	2	1	1,4	0,7
5	15	8	10,8	10,8
6	5	3	3,8	1,9
7	7	3	4,6	4,6
8	14	5	8,6	4,3
9	5	3	3,8	1,9
10	15	7	10,2	10,2
11	5	2	3,2	1,6
12	30	15	21	10,5

4.2.4 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения диаграммы Ганта необходимо перевести длительность исполнения работы из рабочих дней в календарные согласно следующей формуле [34]:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (3.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется [34]:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \quad (3.4)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Таблица 15 – Длительность исполнения работ

№ раб	Длительность работ в рабочих днях	Длительность работ в календарных днях
1	3,2	5
2	10,5	15
3	0,9	2
4	0,7	1
5	10,8	16
6	1,9	3
7	4,6	7
8	4,3	6
9	1,9	3
10	10,2	15
11	1,6	2
12	10,5	15

Вывод: из результатов планирования НТИ следует, что для проведения исследования необходимы два исполнителя – руководитель исследования и исполнитель. Руководитель занимается формированием базы, начального положения исследования, подготовкой образцов для исследования и проверкой выполнения работ. Исполнитель проекта выполняет эксперимент, производит анализ полученных данных и обобщает результаты исследования. Выполнение всего НТИ занимает 90 календарных дней.

Таблица 4.10 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ раб	Исполнители (НР – научный руководитель, И – инженер)	$T_{\text{кал}}$, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
			март			апрель			май					
			1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	НР	5	■											
2	НР, И	15		■	■									
3	НР, И	2			■									
4	НР, И	1			■									
5	И	16				■	■	■						
6	НР, И	3					■							
7	И	7						■						
8	НР, И	6							■					
9	НР, И	3								■				
10	И	15									■	■	■	
11	НР, И	2											■	
12	НР, И	15												■

- НР –
- И –
- НР, И –

4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

В процессе формирования бюджета НТИ были рассмотрены следующие статьи затрат:

1. материальные затраты;
2. затраты на специальное оборудование;
3. основная заработная плата;
4. дополнительная заработная плата;
5. отчисления во внебюджетные фонды;
6. затраты на научные и производственные командировки;
7. накладные расходы.

4.3.1 Материальные расходы

В данной статье учитываются затраты на все материалы, сырье и полуфабрикаты, используемые при разработке проекта. Расчет затрат осуществляется по формуле [34]:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi} \quad (3.5)$$

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

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

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб.)

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 4.11 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты, руб.
Образцы	шт	50	100	5000
Оптоволокно	м	2	2500	5000

Дополнительные конструкции из оргстекла	шт	2	150	300
Итого с учетом k_T , где k_T – коэффициент, учитывающий затраты на доставку и монтаж, равен 15%.				11845

4.3.2 Затраты на специальное оборудование

Для данного проекта затраты на приобретение специального оборудования составляют основную часть бюджета. Покупка оборудования необходима для выполнения исследования в полном объеме. В дальнейшем возможно использование данного оборудования в других исследовательских проектах.

Таблица 4.12 – Затраты на специальное оборудование

Наименование		Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты, руб.
Фотоаппараты	Sony a100	шт	1	30000	30000
	Canon EOS 600D		1	25000	25000
Nd:YAG лазер		шт	1	2000000	2000000
Осциллограф		шт	1	250000	250000
Фотоэлектронный умножитель		шт	2	20000	40000
Итого с учетом k_T , где k_T – коэффициент, учитывающий затраты на доставку и монтаж, равен 15%.					2685250

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе учитываются затраты на заработную плату научного руководителя, инженер-дипломник работает над проектом в своих интересах.

Основная заработная плата научного руководителя исследования определяется по следующей формуле [34]:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (3.6)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (**90 раб. дн.**);

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

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (3.7)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб. (**36800 руб**);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (**199 раб. дн.**)

Тогда

$$Z_{\text{осн}} = 173089 \text{ руб}$$

4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительные выплаты учитывают отклонение от нормальных условий труда, обеспечивают гарантии и компенсации. Величина выплат предусматривается Трудовым кодексом РФ. Для данного проекта коэффициент дополнительной заработной платы принят **0,15** [34].

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (3.8)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (**0,15**)

$$Z_{\text{доп}} = 25963 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{ЗП}} = 132698,8 \text{ руб}$$

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность размер страховых взносов составляет 30 %. Величина отчислений определяется по формуле [34]:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (3.9)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (**0,30**)

$$Z_{\text{внеб}} = 59715 \text{ руб}$$

4.3.6 Накладные расходы

В данном пункте учитываются затраты, не вошедшие в предыдущие статьи расходов: печать материалов исследования, оплата услуг связи,

электроэнергии. Так как стоимость оборудования довольно высока, необходимо снизить коэффициент, учитывающий накладные расходы 15 %.

$$Z_{накл} = 254902 \times 15\% = 38235 \text{ руб}$$

4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 4.12 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма затрат, руб.	Примечание
1. Материальные затраты	11845	Пункт 3.2.4.1
2. Затраты на специальное оборудование	2685250	Пункт 3.2.4.2.
3. Затраты на основную заработную плату	173089	Пункт 3.2.4.3
4. Затраты на дополнительную заработную плату	25963	Пункт 3.2.4.4.
5. Затраты на отчисления во внебюджетные фонды	59715	Пункт 3.2.4.5
6. Накладные расходы	38235	Пункт 3.2.4.6
7. Бюджет затрат НИИ	2938097	Сумма ст. 1-7

Затраты, заложенные в бюджет НИИ, связаны в основном с затратами на приобретение специального оборудования для инициирования взрывного процесса. Оборудование, рассмотренное в данном проекте, может использоваться для осуществления исследований в других направлениях. Что касается непосредственно схемы регистрации спектральных параметров приповерхностной лазерной плазмы, то затраты на ее реализацию составляют порядка 150 тыс. руб. В то время как стоимость предоставляемых рынком аналогов схемы начинается от 400 тыс. руб. [1]

4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

4.4.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (**NPV**);
- срок окупаемости (**ДРР**);
- внутренняя ставка доходности (**IRR**);
- индекс доходности (**PI**).

Все перечисленные показатели основываются на сопоставлении чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности, и их приведении к определенному моменту времени. Теоретически чистые денежные поступления можно приводить к любому моменту времени (к будущему либо текущему периоду). Но для практических целей оценку инвестиции удобнее осуществлять на момент принятия решений об инвестировании средств.

4.4.2 Чистая текущая стоимость (NPV)

Данный метод основан на сопоставлении дисконтированных чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности.

Если инвестиции носят разовый характер, то **NPV** определяется по формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0,$$

где $ЧДП_{опt}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета ($t=0, 1, 2 \dots n$);

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем. Условием экономичности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства: $NPV > 0$.

Чем больше **NPV**, тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

Таким образом, инвестиционный проект считается выгодным, если **NPV** является положительной.

Таблица 4.14 - Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Выручка от реализации, тыс.руб.	0	150,684	150,684	150,684	150,684
2.	Итого приток, тыс.руб.	0	150,684	150,684	150,684	150,684
3.	Инвестиционные издержки, тыс.руб.	-249,350	0	0	0	0
4.	Операционные затраты, тыс. руб. С+Ам+ФОТ	0	90,831	90,831	90,831	90,831
5.	Налогооблагаемая прибыль		121,320	121,320	121,320	121,320
6.	Налоги, тыс. руб Выр-опер=донал.приб*20%	0	33,100	33,100	33,100	33,100
7.	Итого отток, тыс.руб. Опер.затр.+налоги	-249,350	123,481	123,481	123,481	123,481
8.	Чистый денежный поток, тыс. руб. ЧДП=Пчист+Ам Пчист=Пдонал.-налог	-249,350	134,201	134,201	134,201	134,201
9.	Коэффициент дисконтирования (приведения при $i=20\%$)	1,0	0,833	0,694	0,578	0,482
10.	Дисконтированный чистый денежный поток, тыс.руб. (с8*с9)	-249,350	111,789	93,135	77,568	64,684
11.	То же нарастающим итогом, тыс.руб. (NPV =150,773 тыс.руб.)	-249,350	90,751	15,002	70,874	150,773

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 150,773 тыс. рублей, что позволяет его эффективности.

Дисконтированный срок окупаемости

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разности ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (см. табл. 4.15).

Таблица 4.15 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Дисконтированный чистый денежный поток ($i=0,20$)	-249,350	111,789	93,135	77,568	64,684
2.	То же нарастающим итогом	-249,350	90,751	15,002	70,874	150,773
3.	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{диск} = 1 + 90,751/93,135 = 0,975$ года				

Внутренняя ставка доходности (IRR)

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому, чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности

инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR).

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования(*i*) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 4.16 и графика, представленного на рисунке 4.1

Таблица 4.16 - Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	
1	Чистые денежные потоки	-249,350	150,684	150,684	150,684	150,684	
2	коэффициент дисконтирования						
	<i>i</i> =0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	<i>i</i> =0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	<i>i</i> =0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,35	
	<i>i</i> =0,4	1	0,714	0,51	0,364	0,26	
	<i>i</i> =0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	<i>i</i> =0,6	1	0,625	0,39	0,244	0,095	
	<i>i</i> =0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,07	
	<i>i</i> =0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	<i>i</i> =0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	<i>i</i> =1	1	0,5	0,25	3,00	0,006	
3	Дисконтированный денежный поток, тыс. руб						
	<i>i</i> =0,1	-249,350	220,641	205,245	194,621	189,667	260,654
	<i>i</i> =0,2	-249,350	197,145	176,547	160,452	150,499	200,214
	<i>i</i> =0,3	-249,350	150,478	130,245	119,546	104,125	140,254
	<i>i</i> =0,4	-249,350	105,246	100,155	85,147	74,214	85,145
	<i>i</i> =0,5	-249,350	53,483	35,602	23,654	15,876	50,145
	<i>i</i> =0,6	-249,350	31,002	30,124	25,147	20,357	32,273
	<i>i</i> =0,7	-249,350	47,148	26,862	16,277	5,613	22,156
	<i>i</i> =0,8	-249,350	44,582	24,777	13,711	7,617	12,451
	<i>i</i> =0,9	-249,350	42,177	22,211	11,707	6,174	3,214
	<i>i</i> =1	-249,350	40,092	20,046	10,023	0,481	-5,654

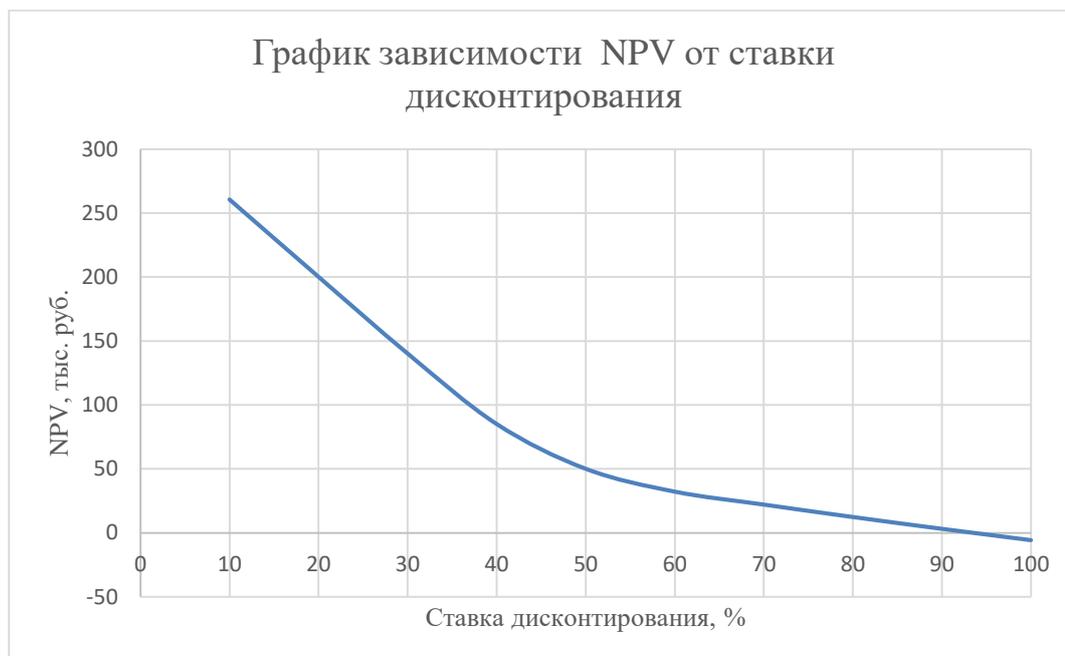


Рисунок 4.1 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования.

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,97.

Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI)

Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций.

Расчет этого показателя осуществляется по формуле

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧПД_t}{(1+i)^t} / I_0,$$

где I_0 – первоначальные инвестиции.

$$PI = \frac{111,789 + 93,135 + 77,568 + 64,684}{126,253} = 1,05$$

$PI=1,05 > 1$, следовательно, проект эффективен при $i=0,2$;

NPV=200,214 тыс. руб.

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты.

Таблица 4.17 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Данные полученные по кристаллу LiF (U) были получены более 10 лет назад	Более глубокое изучение люминесцентных свойств кристалла LiF(U)
Отсутствие статей и публикаций на тему УФ-области LiF(U)	Получение новых данных связанных с УФ-областью в LiF(U)
Отсутствие исследований и технологий по регистрированию УФ-излучения LiF(U)	Появление новых технологий с использованием этого кристалла

4.4.3 Оценка сравнительной эффективности исследования

Альтернативным вариантом исполнения может выступать установка с идентичной системой регистрации спектрально-кинетических параметров разлета плазмы, но в качестве спектрального анализатора, использующая монохроматор-спектрометр.

Для определения эффективности необходимо произвести расчет интегрального показателя эффективности НИ.

- **Интегральный показатель финансовой эффективности**

Таблица 4.18 – Бюджет НТИ для двух исполнений

Наименование статьи	Сумма, руб.		Примечание
	Исп.1	Исп.2	
1. Материальные затраты НТИ	13110	6700	Пункт 3.2.4.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	2461000	2834750	Пункт 3.2.4.2.

3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	115392	115392	Пункт 3.2.4.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	17308,8	17308,8	Пункт 3.2.4.4.
5. Отчисления во внебюджетные фонды	35961,37	35961,37	Пункт 3.2.4.5
6. Затраты на научные и производственные командировки	0	0	Пункт 3.2.4.6
7. Накладные расходы	38235	56700	Пункт 3.2.4.7
8. Бюджет затрат НТИ	2693742	3066811.8	Сумма ст. 1-7

Согласно данным, представленным в таблице 4.18, интегральный финансовый показатель рассматриваемой установки [34]:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (3.10)$$

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

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = 0,87$$

Полученная величина отражает удешевление разработки на 15% от общей суммы затрат.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = 1$$

• Интегральный показатель ресурсоэффективности

Таблица 4.19 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4	5
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,25	4	4
3. Помехоустойчивость	0,15	4	3
4. Энергосбережение	0,15	2	2
5. Надежность	0,25	4	3
6. Быстродействие	0,1	3	4
ИТОГО	1	3,6	3,55

Полученные результаты показывают, что с точки зрения ресурсоэффективности варианты исполнения проекта различаются незначительно.

- **Интегральный показатель эффективности**

$$I_{\text{исп1}} = \frac{I_{\text{р-исп1}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп1}}} = \frac{3,6}{0,87} = 4,14$$

$$I_{\text{исп2}} = \frac{I_{\text{р-исп2}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп2}}} = \frac{3,55}{1} = 3,55$$

- **Сравнительная эффективность**

Для сравнения вариантов исполнения проекта и определения наиболее эффективного используется показатель сравнительной эффективности проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}} \quad (3.11)$$

Результаты анализа исполнений схемы регистрации спектрально-кинетических параметров разлета плазмы представлены в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Исп.1	Исп.2
Интегральный финансовый показатель разработки	0,87	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,6	3,55
Интегральный показатель эффективности	4,14	3,55
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,17	0,86

С позиции финансовой и ресурсной эффективности исполнение 1, рассматриваемое в данной работе как основное, превосходит альтернативный вариант реализации (Исп.2).

4.5 Реестр рисков проекта

Любое НТИ сложный механизм, объединяющий различные ресурсы, исполнителей и сроки выполнения. Одной из главных черт НТИ является большой риск по сравнению с другими проектами. Это характеризуется тем, что исследование направленно на получение новых результатов и продуктов, следовательно, имеется неопределенность коммерциализации результатов исследования, отсюда и большие риски НТИ.

Высокая вероятность наступления риска, может отразиться на эффективности вложенных средств, так как средства могут быть использованы нерационально.

Для оценки всех возможных нежелательных событий в процессе реализации проекта составляется реестр рисков проекта (таблица 4.21).

Таблица 4.21 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1–5)	Влияние риска (1–5)	Уровень риска	Способы смягчения	Условия наступления
1	Преувеличение значимости результатов НТИ	Результаты исследования не найдут практического применения.	3	4	Средний	Тщательная проработка конечного потребителя результатов НТИ	Неверная оценка рынка
2	Недостаточное финансирование	Высокая стоимость специального оборудования не позволяет быть финансово независимым.	2	5	Низкий	Заключение длительных контрактов, договоров	Неправильный выбор источника финансирования
3	Неполучение запланированных доходов	Вложенные средства в НТИ не принесут дохода	4	4	Высокий	Поддержка государственных фондов	Отсутствие коммерциализации результатов НТИ
4	Нарушение авторских прав	Невозможность документального подтверждения	2	2	Низкий	Патентирование результатов	Поверхностный анализ полученных

		авторства результатов исследования					результатов, публикации результатов в открытом доступе
5	Выход из строя оборудования	Отсутствие специального обору- дования сделает невозможным реализацию исследования	3	5	Высокий	Своевременное обслуживание оборудования	Неправильная эксплуатация оборудования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет сделать выводы.

1. Воздействие первой гармоники Nd-лазера с плотностью мощности, варьируемой в диапазоне $H \sim 10^7 - 10^8$ Вт/см² приводит к инициированию поверхностного и объемного оптического пробоя кристаллов LiF и LiF(U).
2. Спектры приповерхностного оптического пробоя исследуемых кристаллов являются линейчатыми, и включают атомные линии атмосферного воздуха (азот и кислород) и атомы лития.
3. Спектр объемного оптического пробоя кристалла LiF является сплошным. В спектре объемного оптического пробоя кристалла LiF(U) наблюдается интенсивная зеленая полоса люминесценции с максимумом при 510 нм на фоне менее интенсивного сплошного спектра. Данное свечение возникает в результате фотовозбуждения уранилового комплекса UO_2^{2+} излучением плотной низкотемпературной плазмы объемного оптического пробоя.
4. Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Определены потенциальные потребители научного исследования. Проведен SWOT – анализ и были выявлены слабые и сильные стороны проекта.
5. В разделе «Социальная ответственность» был проведен анализ опасных и вредных факторов, разработаны мероприятия по обеспечению безопасных условий труда, рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности труда. Рассмотрена экологическая безопасность влияние процесса исследования на литосферу, а также утилизация компонентов. Также выявили наиболее типичную ЧС которая может произойти в лаборатории. Изложены возможные возникновения пожара и меры по его предотвращению, пути эвакуации из лаборатории, средства защиты и план действий по ликвидации ЧС.