

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

Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки: 12.04.02. Оптехника

Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Морфология разрушений твердых тел при облучении сильноточным электронным пучком в режиме филаментации и самофокусировки.

УДК _ 539.4.01:533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Нгуен Ван Ву		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
проф. Отд. материаловедения	Олешко В.И.	Д. ф.-м. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доц. Отд. соц. - гум. наук	Старикова Е.В.	К. филос. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Проф. Отд. контр. и диагн.	Назаренко О.Б.	Д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2018 г.

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

Инженерная школа новых
производственных технологий

УТВЕРЖДАЮ:

Руководителю направления "Оптотехника"

_____ Полисадова Е.Ф.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме

магистерской диссертации

Студенту

Группа	ФИО
4ВМ6Б	Нгуен Ван Ву

Тема работы

Морфология разрушений твердых тел при облучении сильноточным электронным пучком в режиме филаментации и самофокусировки.

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

06.2018

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none">• Литература по механизмам разрушения твердых тел (диэлектриков и металлов) сильноточными электронными пучками (СЭП). Литература по филаментации и самофокусировке релятивистских электронных пучков (РЭП).• Образцы металлов и полимеров для исследований;• Импульсный сильноточный ускоритель электронов на базе генератора импульсных напряжений ГИН-600.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1. Аналитический обзор литературных источников по самофокусировке РЭП в вакуумном диоде со взрывной эмиссией электронов.2. Настройка импульсного ускорителя электронов для исследования явления филаментации и самофокусировки СЭП.

	<p>3. Исследование морфологии разрушений металлов и полимеров при облучении СЭП в режиме филаментации и самофокусировки. Измерение кинетики и спектров свечения электрических разрядов в полимерах (ПММА и винипроз), индуцированных СЭП. Определение параметров (объемной плотности энергии в пятне фокусировки, и средней энергии электронов) филаментированного СЭП.</p> <p>4. Анализ результатов эксперимента и выводы.</p> <p>5. Выполнение раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»;</p> <p>6. Выполнение раздела «Социальная ответственность»;</p> <p>7. Выполнение раздела на иностранном языке;</p> <p>8. Заключение (выводы) по ВКР.</p>
Перечень графического материала	Схема экспериментальной установки; спектрально-кинетические параметры свечения электрических разрядов в полимерах. Фотографии разрушений, формируемых СЭП в металлах и полимерах.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старикова Е.В., к.филос.н.
Социальная ответственность	Назаренко О.Б., д.т.н
Раздел ВКР на иностранном языке	Парнюгин А.С., к. пед.н.

Название разделов, которые должны быть выполнены на русском и иностранном языках

Методика эксперимента и экспериментальные результаты

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

01.11.2016

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
проф. Отд. материаловедения	Олешко В. И.	Д. ф.-м. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Нгуен Ван Ву		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа изложена на 121 с., 39 рис., 20 табл., 52 источника, 1 приложение.

Ключевые слова: электрический пробой, вакуумный диод, сильноточный электронный пучок, самофокусировка, филаментация

Объекты исследования: конденсированные среды (металлы и полимеры).

Цель работы:

1. Изучить морфологию разрушений, формируемых в металлах и полимерах сильноточным электронным пучком (СЭП) в режиме его филаментации и самофокусировки в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600 ($E_{cp} = 0,2$ МэВ, $I = 2$ кА, $t = 12$ нс).

2. По результатам исследований оценить параметры филаментированного электронного пучка:

- объемную плотность энергии в фокальном пятне ω [Дж/м³];
- среднюю (эффективную) энергию электронов в филаменте E_{cp} [кэВ].

В процессе исследования были изучены автографы электронного пучка на поверхности меди и алюминия, образующиеся при облучении мишеней самософокусированным СЭП. Исследовано пространственное распределение каналов электрического пробоя, образующихся в полимерах при воздействии самософокусированным СЭП.

Результаты исследований позволяют сделать заключение о том, что в режиме филаментации и самофокусировки СЭП в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600 генерируются электронные пучки со средней энергией (50 ÷ 100) кэВ и объемной плотностью энергии в пятне самофокусировки ($10^9 \div 10^{10}$) Дж/м³. Воздействие СЭП таких параметров на твердые тела приводит к формированию интенсивных ударных волн с амплитудой ($10^9 \div 10^{10}$) Па, приводящих к отколу свободных поверхностей твердых тел (металлов и диэлектриков) в результате интерференции волн растяжения.

СОКРАЩЕНИЯ

РЭП - Релятивистский электронный пучок

СЭП - Сильноточный электронный пучок

ООЗ – Отрицательный объемный заряд

ИКЛ - Импульсная катодолюминесценция

КЛ - Катодолюминесценция

КЭП - Канал электрического пробоя

СР - Стримерный разряд

ПММА - Полиметилметакрилат

ИСЭУ - Импульсный сильноточный электронный ускоритель

ПСР - Периодические структуры разрушений

ТЭН - Тетранитропентаэритрит

АТМ - Азиды тяжелых металлов

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	12
1.1 Физико-химические процессы, инициируемые СЭП в конденсированных средах.	12
1.1.1 Особенности диссипации энергии СЭП в конденсированных средах.....	12
1.1.2 Электрический пробой и разрушение диэлектриков и полупроводников при облучении СЭП.....	12
1.1.2.1 Закономерности развития электрических разрядов в диэлектриках вне зоны торможения СЭП.....	13
1.1.2.2 Закономерности развития электрических разрядов в диэлектриках в зоне торможения СЭП.....	17
1.1.2.3 Периодические структуры разрушения	20
1.2 Генерация и самофокусировка мощных электронных пучков в вакуумном диоде со взрывоэмиссионным катодом	21
1.2.1 Получение и самофокусировка РЭП.....	22
1.2.1.1 Сильноточные диоды с плоскими электродами без внешнего магнитного поля	22
1.2.1.2 Фокусировка в диодах с большим $R_{\kappa}/d_{\text{ка}}$	25
1.2.2 Генерация ударных волн и разрушение твердых тел при облучении РЭП.....	26
1.3 Основные выводы из литературного обзора и постановка задач исследования	35
2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	37
2.1 Экспериментальная установка для исследования свечения и разрушения конденсированных сред	37
2.2 Объекты исследований.....	40
2.3 Экспериментальные результаты и их обсуждение.....	41
2.3.1 Пространственное распределение свечения и разрушений в зоне торможения электронного пучка в ПММА при облучении СЭП низкой плотности	41
2.3.2 Филаментация и самофокусировка СЭП в опытах на ускорителе (0,2 МэВ; 2 кА; 12 нс).....	46
2.3.2.1 Морфология разрушений, формируемых в металлах филаментированным и самософокусированным СЭП	46
2.3.2.2 Морфология разрушений, формируемых филаментированным СЭП в полимерах.....	49
Выводы	56
3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	58
3.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	59
3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	59
3.1.2 Технология QuaD	60
3.1.3 SWOT-анализ.....	61
3.2 Планирование научно-исследовательских работ	63
3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	63
3.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	64
3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	65

3.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	66
3.3 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	70
3.4 Вывод к разделу	73
4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	77
4.1 Производственная безопасность	78
4.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	78
4.1.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от опасных и вредных факторов	82
4.2 Экологическая безопасность	84
4.2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.....	84
4.2.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	84
4.2.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.....	85
4.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	86
4.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	86
4.3.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий в случае возникновения ЧС	87
4.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	89
4.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	89
4.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А	99

ВВЕДЕНИЕ

Изучение физических процессов, ответственных за самофокусировку высокоэнергетических релятивистских электронных пучков (РЭП) в вакуумных диодах высокоэнергетических ускорителей электронов, стимулировалось развитием техники сверхвысоких импульсных источников энергии, появлением новых задач и областей применения РЭП. Так, появление генераторов РЭП с длительностью менее 1 пс открыло новые возможности в осуществлении импульсных эксимерных и химических лазеров. В свою очередь, исследования по управляемому термоядерному синтезу (УТС) определили замечательный прогресс в 70 – 80-х годах в технике генерации сверхвысоких мощностей и высокоэнергетических РЭП [1, 2].

В последнее десятилетие, исследование физико-химических процессов, развивающихся в конденсированных средах при облучении высокоэнергетическими электронными пучками (СЭП), представляет интерес для различных научных и прикладных направлений:

- космическое материаловедение (исследования радиационно-стойких материалов);
- разработка электронно-зондовых методов контроля твердых тел различных классов (оптических, электрических, акустических);
- физика взрыва (электронно-пучковое инициирование энергетических материалов);
- электронно-пучковые технологии (модификация поверхности твердых тел).

Среди многочисленных процессов, развивающихся в твердых телах различных классов, наименее изученными являются нелинейные процессы, инициируемые в конденсированных средах самософокусированным высокоэнергетическим электронным пучком сверхвысокой плотности. Исследования в этом направлении позволили впервые инициировать детонацию бризантного взрывчатого вещества – ТЭНа, а также реализовать методы атомно-спектрального анализа материалов с испарением пробы СЭП.

Тем не менее, физические процессы, ответственные за явление филаментации и самофокусировки СЭП в вакуумных диодах, ток которых не превышает 3 кА, практически не изучены. Отсутствует информация и о параметрах самосфокусированных СЭП – средней энергии электронов и объемной плотности энергии в пятне самофокусировки. В связи с этим были поставлены задачи, решение которых позволило бы ответить на поставленные выше вопросы.

Целью работы является изучение морфологии разрушения твердых тел при облучении сильноточным электронным пучком в режиме филаментации и самофокусировки. По результатам исследований оценить параметры филаментированных электронных пучков (объемную плотность энерговыделения и среднюю энергию электронов).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучить процесс филаментации и самофокусировки СЭП с помощью автографов, образующихся на поверхности металлов и определить геометрические параметры вакуумного диода ускорителя ГИН-600 (диаметр и форму взрывоэмиссионного катода, величину межэлектродного зазора $d_{ка}$) при которых реализуется режим самофокусировки СЭП.

2. Выявить отличительные особенности морфологии разрушения полимеров при их облучении в обычном режиме работы вакуумного диода и в режиме филаментации и самофокусировки.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Физико-химические процессы, инициируемые СЭП в конденсированных средах.

1.1.1 Особенности диссипации энергии СЭП в конденсированных средах

Взаимодействие высокоэнергетических сильнофокусированных электронных пучков (СЭП) с веществом приводит к каскаду процессов преобразования (диссипации) энергии, включающих возбуждение и релаксацию электронной подсистемы, электрон-фононную и фонон-фононную релаксацию. Энергия электронного пучка теряется в процессах упругого и неупругого взаимодействия, часть энергии преобразуется в энергию эмитированных с поверхности твердого тела электронов и фотонов, а основная часть (~ 90 %) преобразуется в тепло. Неоднородное температурное поле приводит к возбуждению акустических волн, взаимодействие которых со свободными поверхностями облучаемых образцов сопровождается их разрушением.

В диэлектриках и полупроводниках, в результате поглощения инжектированных электронов накапливается отрицательный объемный заряд (ООЗ). Напряженность электрического поля объемного заряда определяется величиной радиационной импульсной проводимости (РИП) образца. В материалах с низкой РИП в зоне торможения СЭП наблюдаются электрические разряды, приводящие к разрушению облучаемых мишеней.

1.1.2 Электрический пробой и разрушение диэлектриков и полупроводников при облучении СЭП

Пространственное распределение электрических зарядов в облучаемом образце определяется расположением заземленного (нулевого) электрода относительно инжектированного в образец ООЗ. В экспериментах в основном используются две схемы облучения: схема с заземленной облучаемой поверхностью (рис. 1.1, а) и схема со свободной облучаемой поверхностью, в которой "заземленный" электрод находится на тыльной (не облучаемой) поверхности образца (рис. 1.1, б).

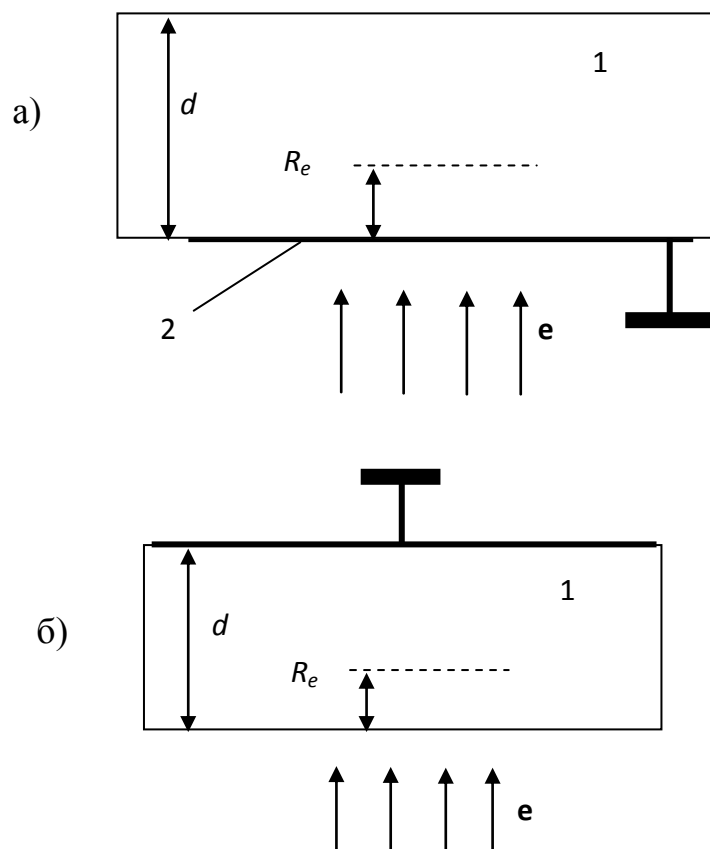


Рисунок 1.1 – Схемы инициирования объемных электрических разрядов в диэлектриках в области ионизационных потерь энергии электронного пучка (а) и за зоной торможения (б): 1 – образец, 2 – электрод "нулевой", d – толщина образца, R_e – эффективный пробег СЭП в твердом теле (глубина залегания отрицательного объемного заряда электронного пучка), e – электронный пучок [3]

В схеме с заземленной облучаемой поверхностью энерговыделение СЭП по ионизационному и электроразрядному механизму происходит в одном и том же геометрическом пространстве (в области торможения электронного пучка), что затрудняет оценивать роль каждого из процессов в инициировании таких явлений, как разрушение, свечение, электронная эмиссия и др.

1.1.2.1 Закономерности развития электрических разрядов в диэлектриках вне зоны торможения СЭП

Для изучения характеристик электрических разрядов, индуцированных в диэлектриках СЭП, в условиях отсутствия ионизационных потерь энергии, применяется схема, приведенная на рис. 1.1, б. Общие закономерности развития электрических разрядов за зоной торможения электронного пучка (рис. 1.1, б) изучены авторами работ [4-6]. Установлено, что облучение щелочно-галогидных кристаллов (ЩГК) серией последовательных импульсов СЭП с плотностью

энергии $H \sim (0,1 - 0,3) \text{ Дж/см}^2$ приводит к формированию анодного стримера возникающего вблизи контакта заземленного электрода с кристаллом и его распространением в область локализации ООЗ (рис. 1.2 - 1.3), где происходит его разветвление и движение в направлении перпендикулярном направлению распространения СЭП.

Из приведенных результатов видно, что электрические разряды развиваются в кристаллах по определенным кристаллографическим направлениям. Так, например, в кристаллах NaCl и LiF стримерные разряды развиваются по направлениям [110], а в кристаллах KCl и KBr, вдоль направления [100]. После облучения, в кристаллах наблюдаются остаточные каналы электрического пробоя (КЭП) (рис. 1.3). Видно, что зоны свечения совпадают с зонами разрушений. В аморфных диэлектриках (например, в полиметилметакрилате ПММА) формируются не ориентированные (древовидные) каналы разрядов (рис. 1.3, д). Исследование морфологии разрушений с высоким пространственным разрешением позволило авторам установить, что КЭП представляют собой полые каналы, диаметр которых варьируется от 3 до 100 мкм. По мере продвижения в область ООЗ происходит разветвление основного КЭП на несколько, при этом диаметры КЭП уменьшаются.

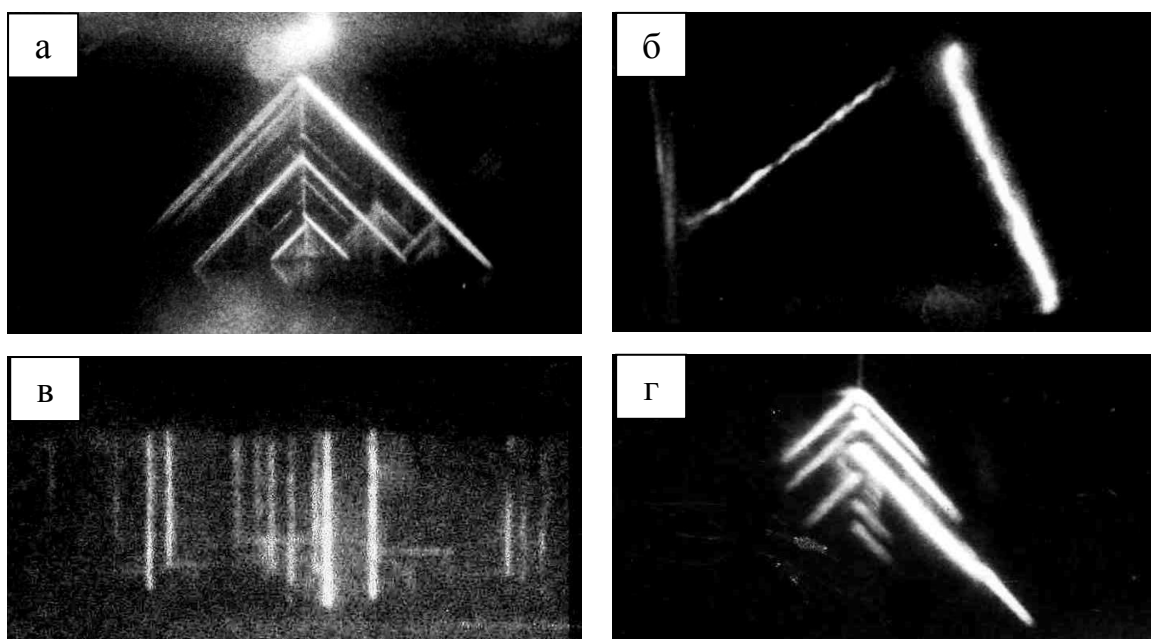


Рисунок 1.2 – Фотографии свечения анодных разрядов, индуцированных СЭП в ЩГК: а – NaCl, б – CsI, в – KCl, г – NaBr [3]

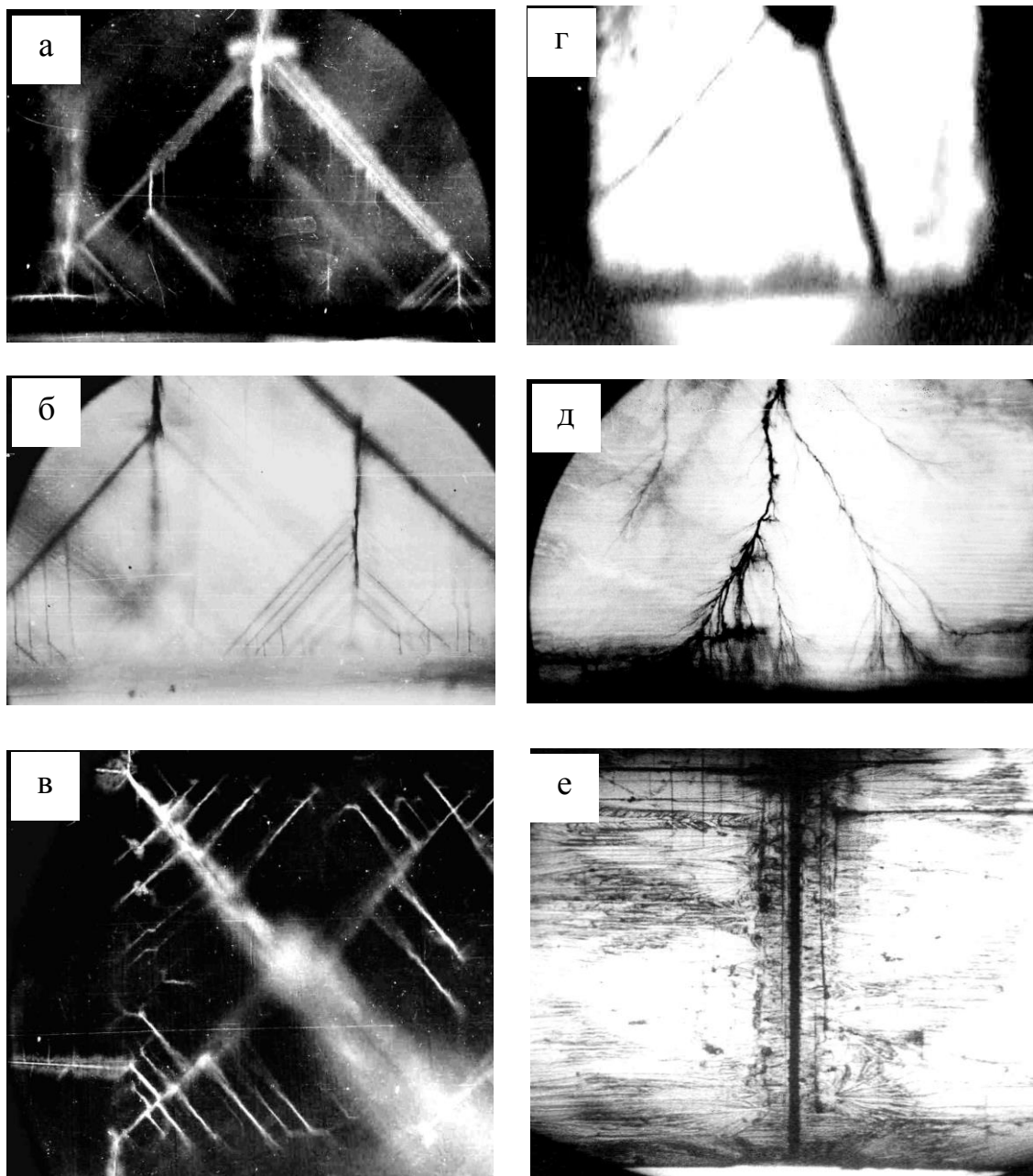


Рисунок 1.3 – Фотографии каналов электрического пробоя, индуцированного СЭП в диэлектриках вне зоны торможения быстрых электронов:
а, б, г, д, е – пространственное распределение КЭП по толщине образцов NaCl (а - в), CsI (г), ПММА (д), KCl (е);
в – вид со стороны иглового ("нулевого") электрода [3]

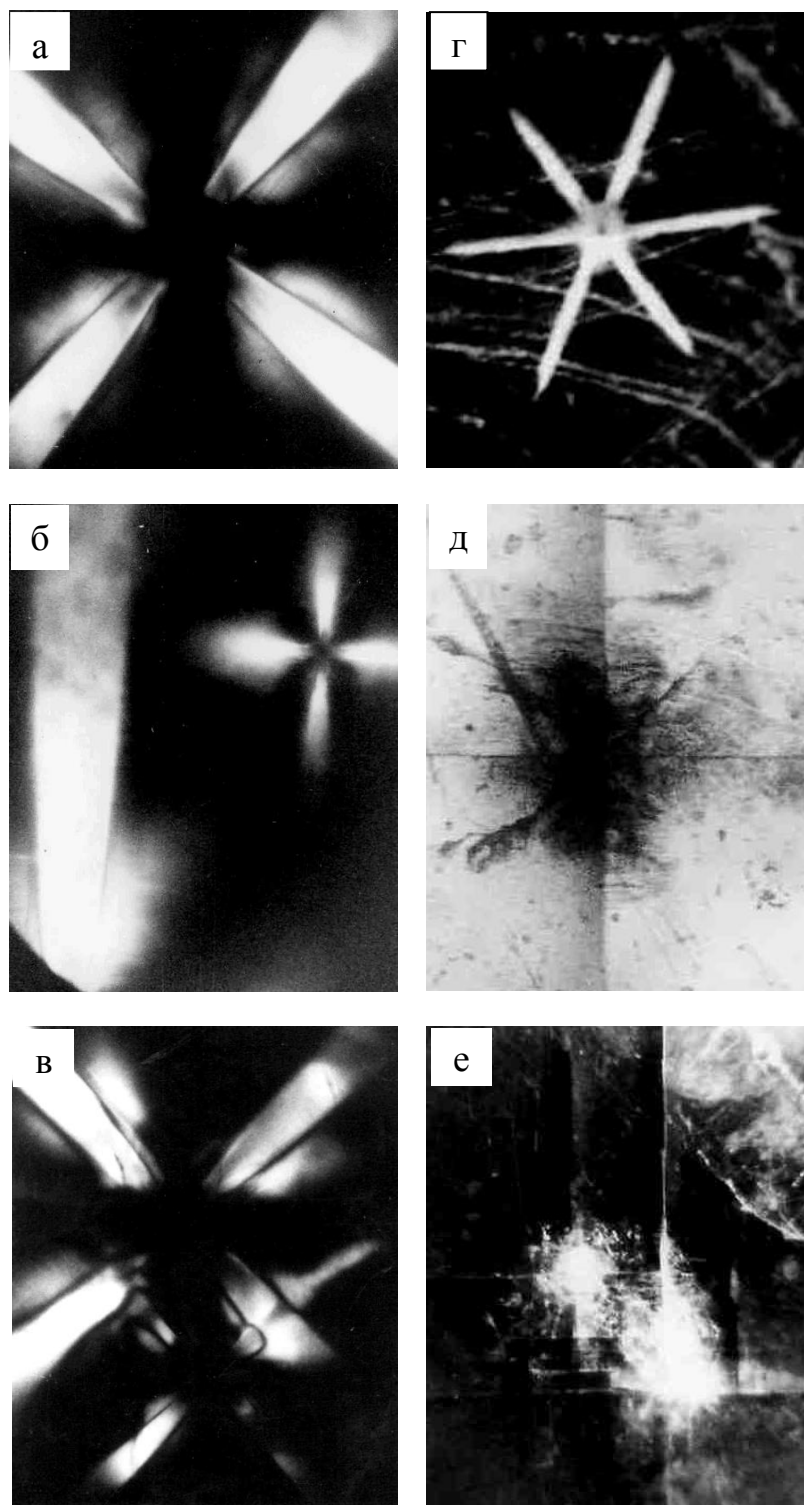


Рисунок 1.4 – Зоны пластической деформации (а - в) и разрушения (г - е), формируемые анодными разрядами, развивающимися вне области торможения СЭП в кристаллах:
а, б, в, е – КСl; г – CaF₂; д – NaBr [3]

Образование КЭП большого диаметра ($50 \div 100$) мкм в ЩГК сопровождалось появлением кристаллографически ориентированных трещин и зон пластической деформации (рис. 1.4, а - е). Размеры зон пластической

деформации достигали размеров $(1 \div 3)$ мм при диаметрах КЭП $(50 \div 100)$ мкм. Многократное инициирование электрических разрядов в серии последовательных импульсов облучения, приводило к дроблению зон, прилегающих к КЭП и отколу отдельных частей кристалла.

1.1.2.2 Закономерности развития электрических разрядов в диэлектриках в зоне торможения СЭП

Авторами работ [7-16] были обнаружены и исследованы электрические разряды, генерируемые СЭП в зоне пробега электронного пучка. В качестве объектов исследования использовались диэлектрические и полупроводниковые кристаллы (LiF, KCl, CaF₂, SiO₂, LiNbO₃, MgAl₂O₃, ZnSe, Zn_xCd_{1-x}Se, ПММА, ТЭНе, светодиодных гетероструктурах InGaN/GaN и др.). Было установлено, что электрические разряды, регистрируемые по свечению и специфическому разрушению (КЭП) формируются не во всех исследованных образцах. Так, например, КЭП не были зарегистрированы в зоне торможения СЭП в кристаллах KCl, NaCl, KBr. Одно из объяснений этого факта – более высокая радиационная проводимость этих кристаллов.

Установлено, что электрические разряды развиваются при облучении СЭП низкой плотности $0,1 \leq H \leq 0,5$ Дж/см² в режиме многоимпульсного облучения. Пространственное распределение КЭП в зоне облучения индивидуально для каждого из исследованных образцов и как предполагают авторы, зависит от технологии выращивания кристаллов. Изучение эволюции морфологии разрушения образцов в процессе их облучения позволило авторам сделать заключение о том, что КЭП зарождаются на облучаемой поверхности и распространяются в область локализации ООЗ, приводя к его нейтрализации. Пространственное распределение свечения КЭП и морфология остаточных разрушений, формируемых СЭП в различных образцах в зоне торможения электронного пучка, приведены на рис. (1.5 – 1.8.).

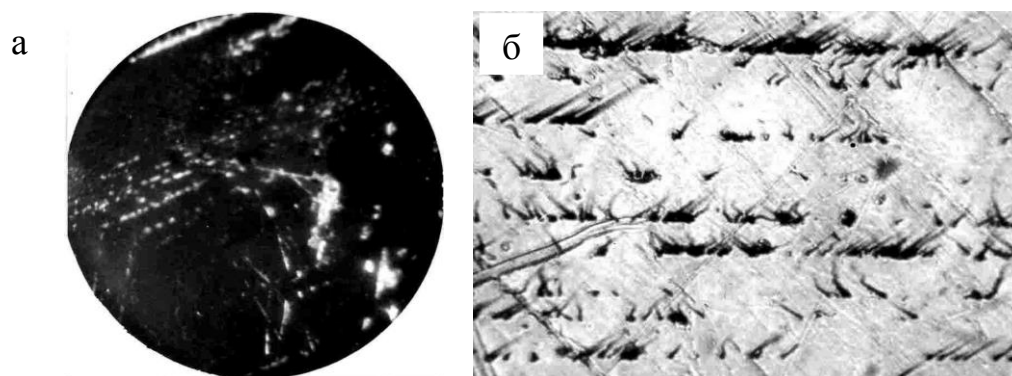


Рисунок 1.5 – Свечение (а) объемных стримерных разрядов (а) и морфология разрушений (б), формируемых СЭП в зоне торможения пучка в кристалле $Zn_{0,98}Cd_{0,02}Se$ [3]

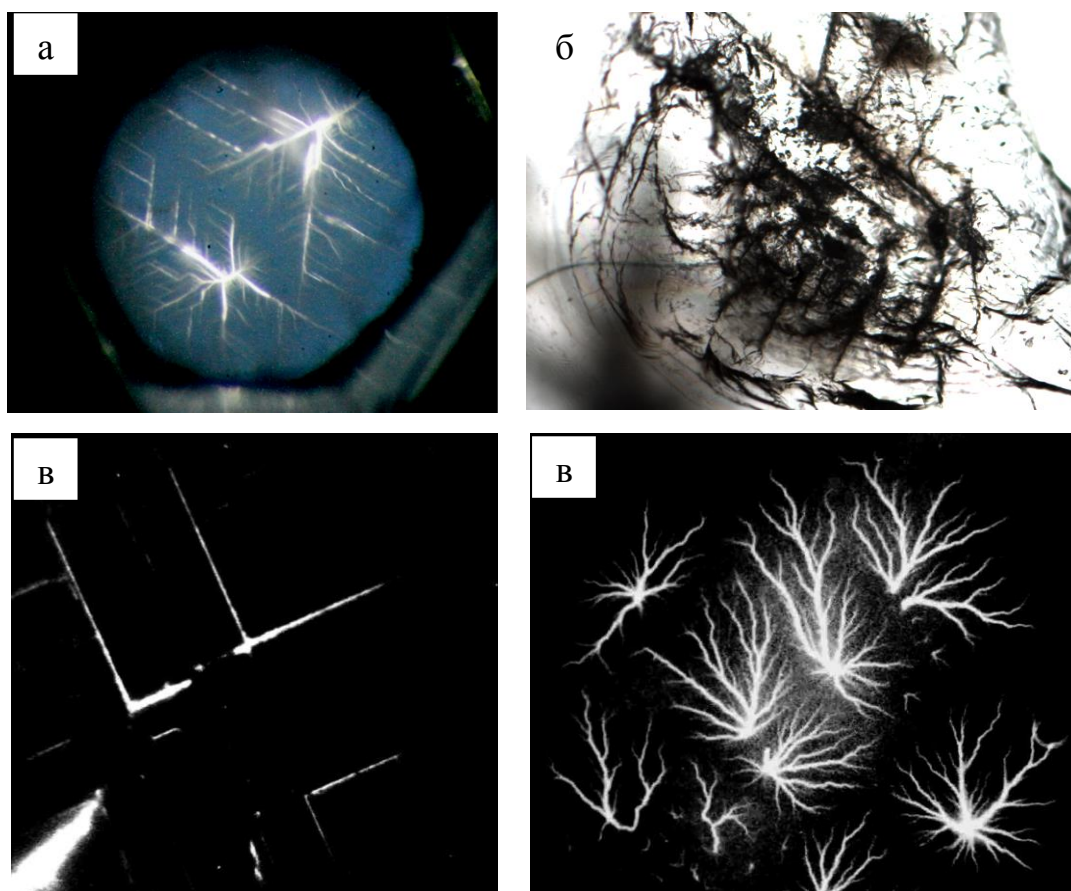


Рисунок 1.6 – Свечение (а, в, г) объемных стримерных разрядов и морфология разрушений (б), формируемых СЭП в зоне торможения пучка в кристаллах ТЭНа (а, б), LiF (в) и ПММА (г). [3]

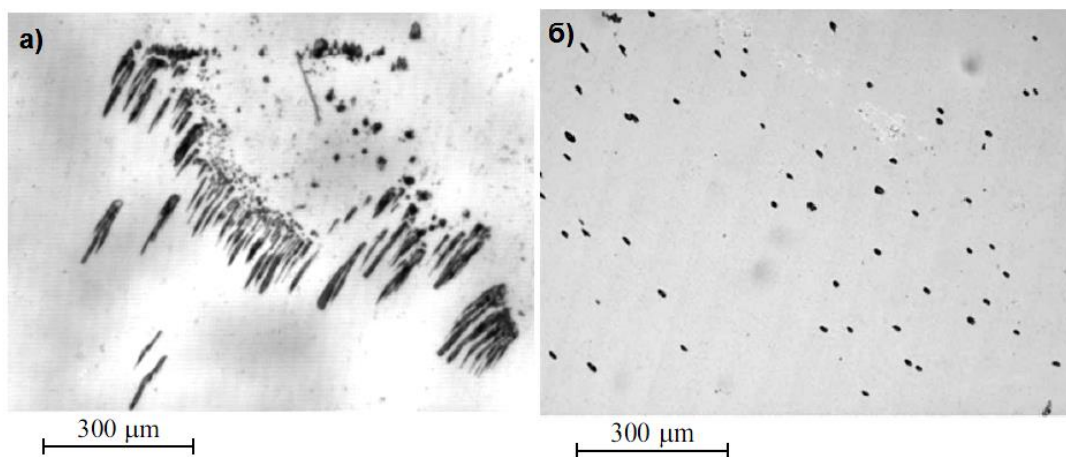


Рисунок 1.7– Морфология разрушений в ГС1 (а) и ГС2 (б) под действием СЭП.
 $H = 0.25 \text{ Дж/см}^2$, $N = 30$ [11]

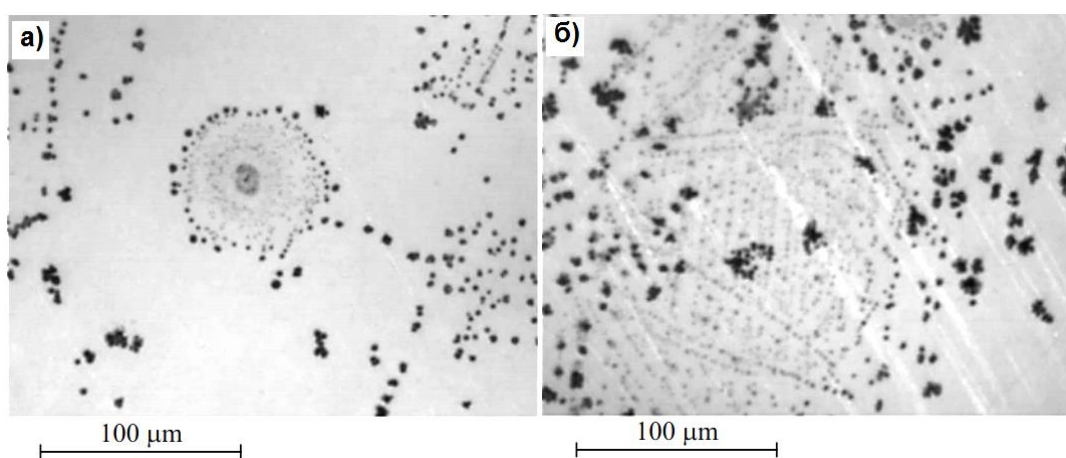


Рисунок 1.8 – Морфология разрушений в ГС3 под действием СЭП в различных областях (а, б) полупроводниковой пластины. $H = 0,25 \text{ Дж/см}^2$, $N = 40$ [11]

Из приведенных фотографий видно, что распределение КЭП в зоне пробега электронного пучка в исследованных образцах сильно неоднородно. Некоторые КЭП в кристаллах LiF имели тонкую структуру – периодическое чередование разрушенных и не разрушенных участков. Образование множественных близкорасположенных КЭП авторы наблюдали в кристаллах LiF, $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Se}$ и LiNbO_3 . В зоне облучения в этом случае формировались трещины, соединяющие КЭП. При низкой плотности энергии СЭП кристаллографическая ориентация КЭП сохранялась, а при высокой плотности электронного пучка в кристаллах LiF и LiNbO_3 наблюдались не ориентированные КЭП.

1.1.2.3 Периодические структуры разрушения

Необычный вид разрушений, так называемые «периодические структуры разрушений» (ПСР) инициируемых СЭП в NaCl, был обнаружен в работе авторов [17]. Было установлено, что ПСР образуются в приповерхностных областях кристалла на глубине $(80 \div 100)$ мкм как в области ионизационных потерь энергии СЭП, так и вблизи тыльной поверхности кристалла. Область разрушений представляет набор периодических центрально-симметричных зон, лежащих в плоскости [001], перпендикулярной направлению распространения электронного пучка. Разрушения имеют форму колец (рис. 1.9). Диаметр внешней зоны изменяется в диапазоне $\sim (300 \div 500)$ мкм, а толщина зон разрушения составляет ~ 10 мкм. Дальнейшими исследованиями было установлено, что ПСР во всех исследованных ЩГК образуются в результате интерференции волн растяжения, в приповерхностных областях кристалла. Об этом свидетельствует кинетика формирования ПСР. Это явление в литературе называется «отколом».

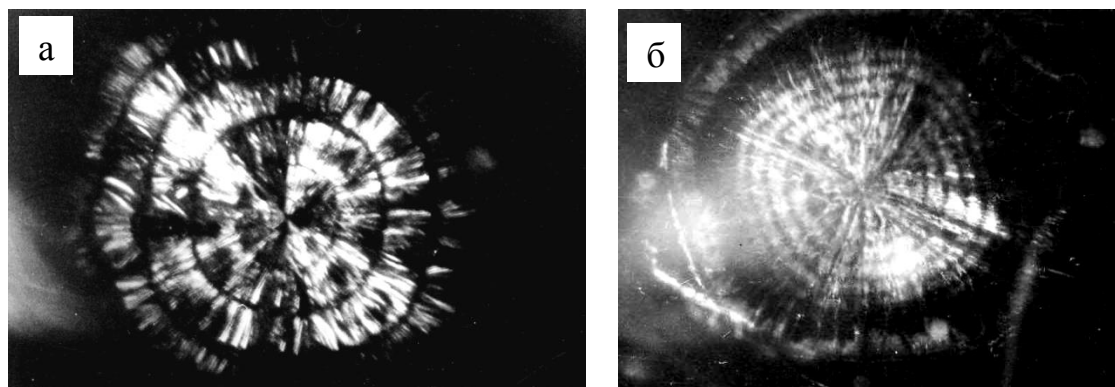


Рисунок 1.9 – Периодические структуры разрушений, образующиеся вблизи тыльной поверхности в кристаллах NaCl (а) и KCl (б) после облучения импульсом СЭП ($H = 0,6$ Дж/см²) [3]

В кристаллах LiF и CaF₂ наблюдался еще один вид ПСР [18]. Особенность этих структур заключалась в том, что они формировались одновременно со стримерными разрядами и располагались в центре ПСР (рис. 1.10).

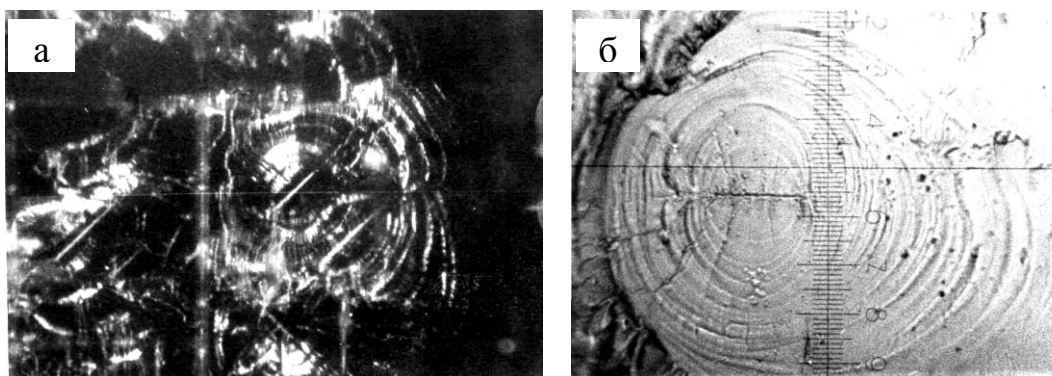


Рисунок 1.10 – Периодические структуры разрушений в области торможения СЭП:
а – LiF, б – CaF₂ [3]

Таким образом, первый вид ПСР формируется в результате «откола», второй – в результате интерференции акустических волн, генерируемых стримерными разрядами.

1.2 Генерация и самофокусировка мощных электронных пучков в вакуумном диоде со взрывоэмиссионным катодом

Основные результаты, в области физики мощных радиационных воздействий, получены при использовании импульсных сильноточечных электронных ускорителей (ИСЭУ), генерирующих импульсные электронные пучки с плотностью энергии $0,1 < H < 3$ Дж/см² и длительностью импульса ($2 \div 20$) нс. Для решения задач в области физики высоких плотностей энергии используются более мощные релятивистские электронные пучки (РЭП) с параметрами (1 МэВ, 200 кА, 60 нс) и энергией в пучке на уровне ($10 \div 20$) кДж [19-23]. Плотность мощности при этом может достигать ($10^{10} \div 10^{13}$) Вт/см². Для увеличения энерговыклада в облучаемую мишень использовали явление самофокусировки РЭП в вакуумном диоде ИСЭУ.

Работа сильноточечных диодов основана на автоэлектронной и взрывной эмиссии. Электрическое поле диода вытягивает электроны из катодной плазмы и ускоряет их. Слой анодной плазмы движется к катоду со скоростью около 10^4 м/с. При этом уменьшается эффективный диодный зазор и возрастает ток пучка. В момент перекрытия приэлектродных плазменных слоев диод закорачивается, возникает дуговой разряд, электронный пучок прерывается. Закорачивание диодного зазора шириной несколько

миллиметров происходит за время порядка десятков наносекунд, что и определяет длительность импульса сильноточного электронного пучка.

В результате уменьшения эффективного ускоряющего зазора увеличивается ток пучка. Анодная плазма порождает ионные токи. Ионы компенсируют заряд электронов, что приводит к увеличению электронной эмиссии, возрастанию тока и пинчеванию пучка.

Заряженные частицы можно ускорять не только потенциальными электрическими, но и высокочастотными полями.

1.2.1 Получение и самофокусировка РЭП

Под сильноточными РЭП понимаются электронные пучки, ток которых ограничивается их собственным магнитным полем в диоде. В то же время магнитное поле пучка используется для фокусировки сильноточных РЭП непосредственно в самом диоде. Длительностью импульса сильноточных релятивистских электронных пучков в высоковольтных вакуумных диодах менее 10^{-7} с.

Важной особенностью работы высоковольтного вакуумного диода является способ получения электронного потока с помощью холодного катода, эмиссионная способность которого создается в результате взрывов микроострий, приводящих к образованию слоя плотной плазмы, с поверхности которой происходит отбор электронного пучка. Вместе с тем под действием электронной бомбардировки и других физических факторов, возможно также образование слоя плотной анодной плазмы. Образовавшиеся слои плазмы (катодный и анодный), их свойства и движение оказывают сильное влияние на работу диода: на характеристики РЭП и их фокусировку.

1.2.1.1 Сильноточные диоды с плоскими электродами без внешнего магнитного поля

Для генерации сильноточных электронных пучков часто применяются диоды с плоскими круглыми электродами, характерная особенность которых состоит в том, что начальный межэлектродный зазор d_0 мал по сравнению с радиусом электродов. При достаточной напряженности электрического поля

на катоде такого диода, как отмечалось ранее, за счет взрывной эмиссии образуется слой плотной плазмы и эмитирующей поверхностью оказывается не сам катод, а граница как правило, можно считать «бесконечной», так что за ограничение тока в диоде ответственны только собственные электрические и магнитные поля пучка.

Если ток диода целиком обусловлен действием электрического поля пучка, то в этом случае справедлив закон 3/2, который имеет следующий вид:

$$I = \frac{\sqrt{2}}{9} \frac{mc^3}{e} \left(\frac{eU}{mc^2} \right)^{3/2} \left(\frac{R}{d} \right) \quad (1.1)$$

Этот закон предполагает, что электроны в ускоряющем зазоре движутся по траекториям, перпендикулярным эквипотенциальным поверхностям. А при $eU/mc^2 \geq d/R$, сила Лоренца, которая действует на электроны, сравнима с силой электрической и траектории электронов заметно искривляются на краю диода под действием собственного магнитного поля тока диода. В результате ток не зависит от напряжения по закону 3/2. Можно получить оценку критического тока при приравнивании значения ширины катод - анодного зазора d к ларморовскому радиусу электрона с энергией eU :

$$I_{кр} = 8,5 \sqrt{\gamma^2 - 1} R/d \quad (1.2)$$

где $\gamma = 1 + eU/mc^2$ – релятивистский фактор; $I_{кр}$ – выражено в кА; R/d – аспектное отношение

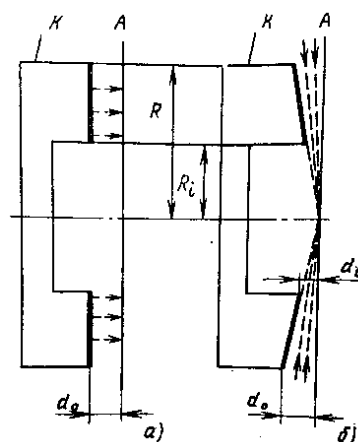


Рисунок 1.11 – Геометрия диода: а – плоский катод; б – конический катод; d_0 , d_i – зазоры; R_i – радиус полости в катоде; R – внешний радиус [1]

Пакхомом и Кридоном была разработана так называемая парапотенциальная теория, которая, несмотря на несамосогласованность, тем не менее, правильно отражает такие существенные черты работы диода, как преимущественная эмиссия электронов с периферии катода, и по преимуществу радиальный характер движения электронов в зазоре между катодом и анодом. Эта теория дает следующее выражение для тока диода [24]:

$$I_{\text{пар}} = 8,5 \frac{R}{d} \gamma \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) \quad (1.3)$$

где $I_{\text{пар}}$ выражено в кА.

Парапотенциальная теория имеет ряд недостатков: во-первых, она не описывает механизм, с помощью которого электроны появляются на эквипотенциальных поверхностях, и как они попадают на анод и, во-вторых, не учитывает влияния ионных потоков, которые играют важную роль в диодах с большим аспектным отношением ($R/d \geq 1$). Подробные экспериментальные исследования вольт – амперных характеристик сильноточных РЭП в диодах с большим аспектным отношением и с использованием плоских и конических катодов, показанных на рис. 1.11, были проделаны на ускорителе OWL-II [25]. В результате исследований было установлено, что источником ускоренных ионов является анодная плазма. Ток ускоренных ионов ограничен пространственным зарядом. Пространственный заряд электронов нейтрализуется пространственным зарядом ионов. Магнитное поле суммарного ионного и электронного тока приводит к пинчеванию электронного потока. Электрическая сила перестает действовать на электроны, попадавшие в анодную плазму. А за счет магнитной силы эти электроны отражаются из анодной плазмы обратно в сторону катода, продолжая дрейфовать по радиусу, пока не сформируют плотный пинч. Расчет показывает, что в итоге достигается состояние стационарное, в котором ионный поток остается ламинарным, а электронный поток оказывается сфокусированным.

1.2.1.2 Фокусировка в диодах с большим $R_{\kappa}/d_{\kappa a}$

При $I < I_{кр}$, электроны нормально попадают на поверхности анода (углы падения малы, рис. 1.12, а). С повышением тока диода углы падения на диод растут благодаря возрастающему действию собственного магнитного поля электронного пучка на движение электронов. При достижении в диоде тока, равного $I_{кр}$, траектория электронов становится принципиально другая, а именно, течение электронов с пересекающимися траекториями заменяет ламинарное течение в ускоряющем зазоре (рис. 1.12, б). Когда $I \geq I_{кр}$, катод - анодный зазор становится равным или больше ларморовского радиуса электронов, и электроны начинают дрейфовать с внешней границы пучка к оси диода. Результатом этого является пинчевание электронного пучка, которое приводит к самофокусировке на аноде.

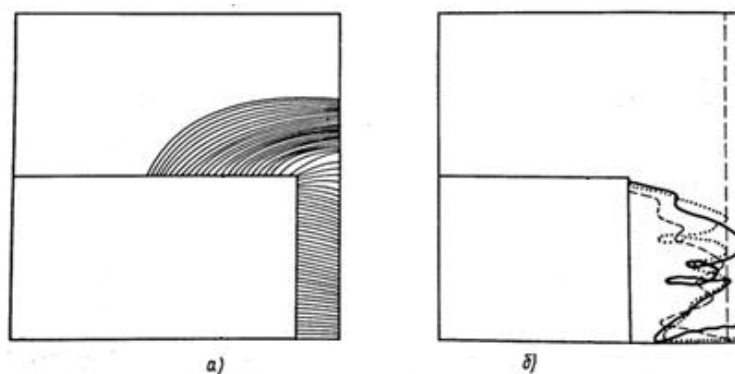


Рисунок 1.12 – Ламинарный электронный поток ($I < I_{кр}$) (а); Фокусировка электронов с помощью токонесущей плазмы на оси ($I \geq I_{кр}$) (б), граница анодной плазмы показана вертикальной пунктирной линией [1]

Авторы работы [26] применили полые катоды с коническим торцом. Основным преимуществом таких катодов явилось существенное увеличение крутизны фронта. С помощью таких катодов образуется тонкий пучок в начале импульса тока. В зависимости от материала анода, скорость схлопывания к оси такого пучка варьировала от 1 до 5 мм/нс. В результате схлопывания пучка образуется стабильный пинч диаметром на аноде менее 3 мм. В то время как для диодов с токовым каналом или инъекцией плазмы вдоль оси диода, время нарастания мощности в диоде определяется скоростью увеличения мощности РЭП в фокальном пятне, это время

составляет около $(20 \div 30)$ нс, а в диоде с полым катодом с коническим торцом это значение уменьшилось до 1 нс. Этот тип диода дает возможность получить стабильный пинч в центре анода.



Рисунок 1.13 – Геометрия диода и щелевая развертка свечения сцинтиллятора за анодом (анод-титан, насыщенный водородом) в опытах по фокусировке РЭП на ускорителе GAMBLE-I: 1 – катод; 2 – анод; 3 – сцинтиллятор толщиной 0,5 мм; 4 – нейтральный фильтр ($D=0,5$) [1]

На рис. 1.13 показана методика, с помощью которой определялся процесс схлопывания полого электронного пучка в пинч малого диаметра. Рентгеновская фотография, полученная с помощью этой методики, показывает, что вначале образуется тонкий трубчатый электронный пучок толщиной менее 3 мм, радиус которого несколько превышает внутренний радиус полого конического катода.

1.2.2 Генерация ударных волн и разрушение твердых тел при облучении РЭП

В этом параграфе, рассмотрим морфологию разрушений материалов, облучаемых мощным РЭП. При воздействии мощного импульсного потока энергии на конденсированное вещество возникает скачок давления, образуется ударная волна, распространяющаяся в веществе. Если толщина материала, подвергнутого импульсному нагружению, имеет конечную величину, то при отражении ударной волны от свободной (тыльной) поверхности мишени формируется волна разрежения, распространяющаяся в глубь вещества, и появляется растягивающее напряжение. При превышении растягивающего напряжения порогового значения σ_0 (откольная прочность

материала) часть свободной поверхности откалывается и улетает приблизительно с двойной массовой скоростью в виде откольной тарелочки [27-29].

Авторы работы [27] провели численные и экспериментальные исследования формирования упругопластических волн в металлических мишенях при облучении потоками заряженных частиц (ионов, электронов) высокой плотностью ($10^7 \div 10^{10}$) Вт/см². Эксперименты проводились на ускорителе «Тонус 1» работавшем в двухимпульсном режиме. Для генерации ионного пучка использовался магнитоизолированный диод с баллистической фокусировкой. Схема диода и эксперимента представлена на рис. 1.14, а. Первый отрицательный импульс (рис. 1.14, б) при подаче на электрод 2 вызывает образование плазмы на поверхности этого электрода. Вторым положительный импульс служит для ускорения ионов. Подавление электронного потока в ускоряющей промежутке между электродами 2 и 3 осуществляется магнитным полем, которое образуется за счет протекания тока по электроду 3 от внешнего источника.

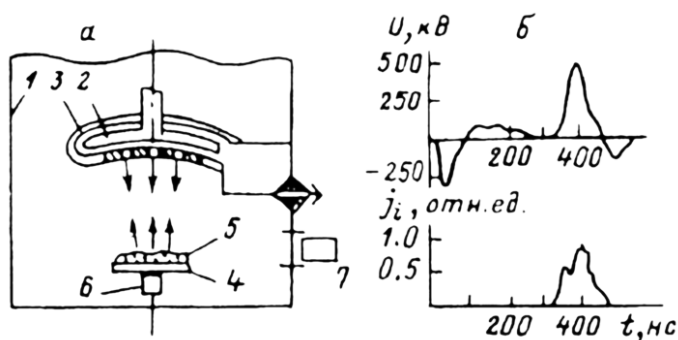


Рисунок 1.14 – а) Схема эксперимента: 1 – экспериментальная камера; 2,3 – электроды магнитоизолированного диода; 4 – мишень; 5 – плазма, расширяющаяся с поверхности мишени; 6 – пьезодатчик; 7 – электронно-оптическая камера; б – Осциллограммы ускоряющего напряжения и тока пучка [27]

Параметры ионного пучка: энергия частиц 0.5 МэВ, длительность импульса тока 80 нс, плотность тока изменялась в пределах ($50 \div 250$) А/см², максимальная плотность мощности на поверхности мишени 4 составляла $\sim 2 \cdot 10^8$ Вт/см², площадь сечения пучка на поверхности мишени составляла ~ 6 см². Генерируемый ионный пучок состоял из $\sim 70\%$ -го Н⁺ и $\sim 30\%$ -го С⁺. В

качестве мишеней использовались пластинки из различных металлов (Al, Cu, Pb), толщина которых варьировалась от 0.2 мм до 1 см. Материалы выбирались с существенно различными энергиями сублимации что приводит к существенно различным условиям формирования на поверхности мишени плазменного слоя 5 и, как следствие этого, к различным условиям формирования ударной волны. Импульс напряжения, распространяющийся по мишени, регистрировался апериодическим пьезодетектором 6, выполненным из керамики типа ЦТС-19. Временное разрешение детектора не хуже 10^{-8} с. Детектор располагался на тыльной (необлучаемой) стороне мишени. Кроме импульса напряжения проводились измерения импульса отдачи с помощью баллистического маятника и прямым взвешиванием мишени унесенной массы. С помощью электронно-оптической камеры «Агат-СФ-Г1» проводилась регистрация разлета поверхностной плазмы.

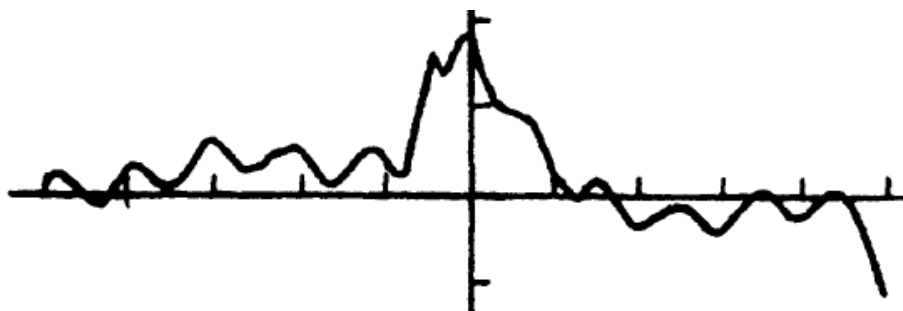


Рисунок 1.15 – Типичная осциллограмма импульса напряжения, снимаемого с пьезодатчика 6 (рис. 1, а). Временной масштаб (горизонтальная ось) 200 нс/дел. Чувствительность (вертикальная ось) 15 В/дел. Толщина мишени 5 мм. Плотность мощности пучка на мишени $\sim 10^8$ Вт/см² [27].

На рис. 1.15 приводится типичная осциллограмма импульса напряжения, сформировавшегося в мишени. Оценка давления по осциллограммам дает амплитудное значение волны сжатия, равное (0,1 ÷ 1) ГПа. Наличие двух максимумов на осциллограмме, находящихся друг от друга в интервале времени ~ 50 нс, свидетельствует, как упоминалось, о двухволновой структуре волны напряжения.

Типичные осциллограммы сигналов с пьезодетекторов при различных плотностях тока пучка приведены на рис. 1.16, а. Видно, что амплитуда

находится в явной зависимости от плотности тока пучка. На рис. 1.16, б приведены фотохронограммы, соответствующие тем же плотностям тока. Из фотохронограмм видно, что скорость разлета плазмы возрастает с увеличением плотности потока мощности пучка.

Авторы работы [27] также провели математическое моделирование для описания взаимодействия интенсивного пучка заряженных частиц с веществом. Проведено решение системы уравнений, содержащей кинетическое уравнение для быстрых заряженных частиц, уравнения механики сплошной среды, широкодиапазонное уравнение состояния. Получено хорошее согласие результатов численного моделирования с экспериментом (таб. 1.1).

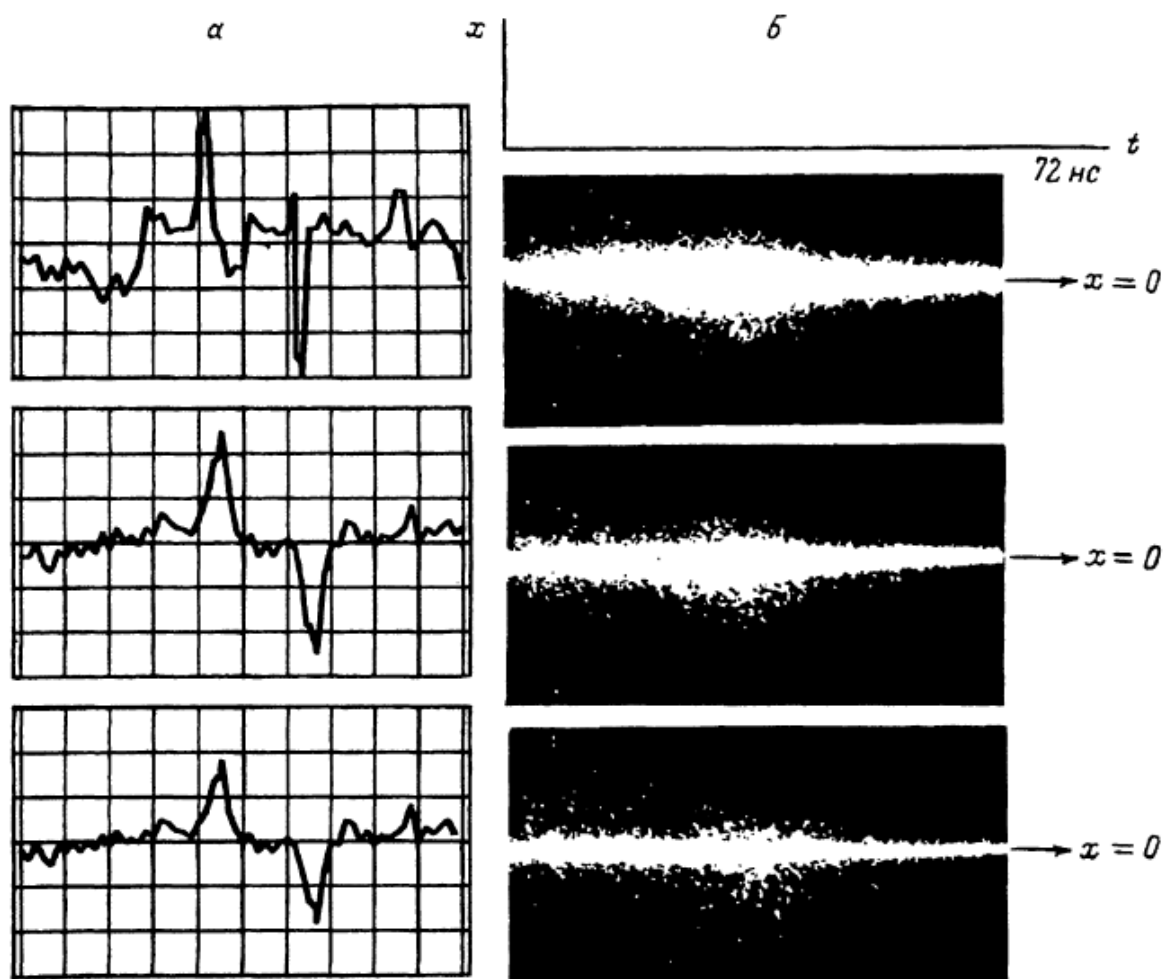


Рисунок 1.16 – а) Осциллограммы сигналов с пьезодатчиков: временной масштаб (по горизонтали) 500 нс/дел, чувствительность (по вертикали) 15 В/дел;
 б) Фотохронограмма, полученная при помощи камеры «Агат-СФ-1» [27]

В таб. 1.1 приведена сводка экспериментальных результатов: унесенная

за импульс масса Δm , импульс отдачи J и средняя скорость разлета плазмы v_n , вычисленная из выражения $J = \Delta m \cdot v_n$. Из таблицы видно, что унесенная масса коррелирует с энергией сублимации

Таблица 1.1 – Экспериментальные и расчетные результаты [27]

Материал мишени	Эксперимент			Расчет		
	Δm , мг	J , Н·с	v_n , м/с	Δm , мг	J , Н·с	v_n , м/с
Al	0,45	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^3$	1,7	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^3$
Cu	1,2	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^3$	1,5	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^3$
Pb	16,9	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^3$	18,4	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^3$

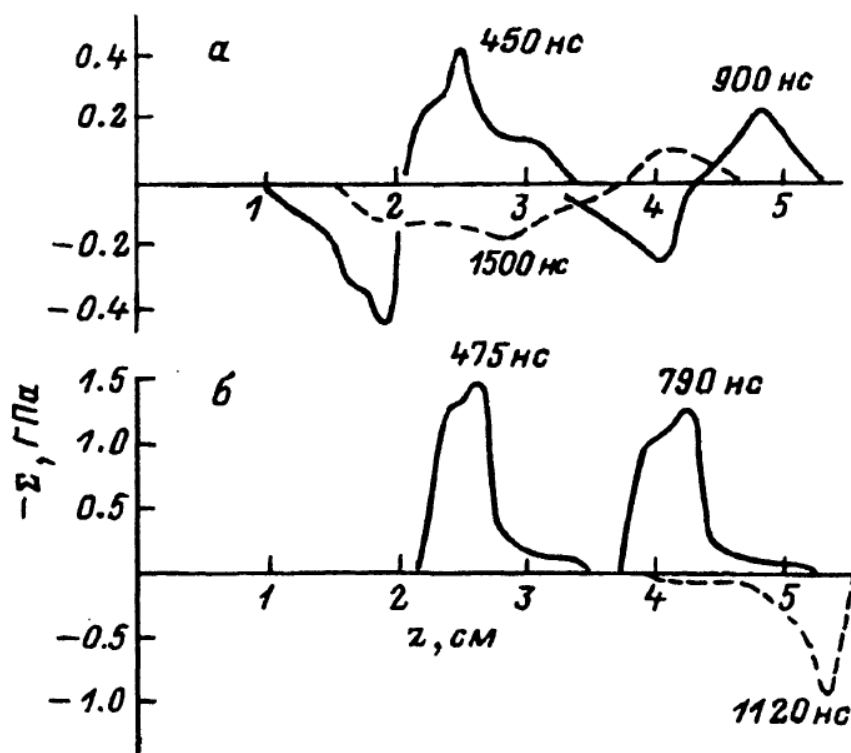


Рисунок 1.17 – Профиль напряжений в алюминиевой мишени в различные моменты времени при облучении импульсным ($\tau_n = 100$ нс) электронным пучком с энергией частиц 0.5 МэВ и различными плотностями токов j , кА/см²: а – 1, б – 3 [27].

Авторы работы [29] исследовали роль плазменного факела в генерации волн напряжения. На рис. 1.17 приводятся результаты расчетов полей напряжения в алюминиевой мишени толщиной 0,55 см при облучении электронами с энергией 0,5 МэВ в течение 100 нс. При малых плотностях тока пучка $j < 1$ кА/см² (рис. 1.17, а) в твердотельной части мишени распространяется волна сжатия и непосредственно за ней волна разрежения. Волна разрежения образуется в результате отражения от поверхности

мишени волны разгрузки. При увеличении плотности тока пучка вещество из зоны энерговыделения начинает интенсивно испаряться и в результате передаваемого мишени импульса отдачи облучаемая поверхность перестает быть свободной. Это обстоятельство приводит к уменьшению величины растягивающих напряжения и их полному исчезновению (рис. 1.17, б). При облучении ионами с той же энергией 0.5 МэВ из-за высокой плотности энерговыделения уже при плотностях тока ≥ 20 А/см² образуется плазма, что приводит только к образованию волны сжатия.

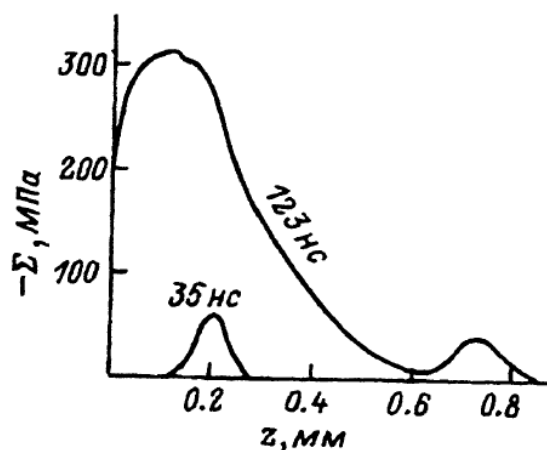


Рисунок 1.18 – Профиль напряжений алюминиевой мишени в различные моменты времени при облучении протонным импульсным ($\tau_u = 100$ нс) пучком с энергией частиц 0,5 МэВ и плотностью тока $j = 250$ А/см² [27].

На рис. 1.18 приведены различные поля напряжений в различные моменты времени. Двухволновая структура волны напряжений (123 нс) объясняется различными механизмами генерации ее составляющих. В начале облучения вещество в зоне энерговыделения находится в твердой фазе и в результате его нагрева генерируется термоупругая волна (35 нс). После плавления вещества в зоне энерговыделения происходят падение напряжений и, как следствие, формирование заднего фронта термоупругой волны. Дальнейший нагрев пучком расплавленной части мишени приводит к возрастанию давления, в результате чего происходят как разлет вещества в сторону свободной поверхности, так и разгрузка напряжений в сторону необлучаемой твердой части мишени. Разгрузка напряжений сжатого вещества в сторону твердотельной части порождает новую волну сжатия в

твердом теле. Двухволновой структурой волны напряжения объясняется вид осциллограммы, приведенной на рис. 1.15.

Поскольку величина напряжений сжатия в твердом теле определяется максимальным напряжением вещества, находящегося в зоне энерговыделения, авторы работ [27] сделали вывод о зависимости величины напряжения в твердом теле от параметров падающего пучка. Действительно, как видно из рис. 1.19, при электронном облучении, когда размеры зоны энерговыделения велики, разгрузка напряжений в твердотельную часть идет в течение времени, много большего длительности импульса облучения. Поэтому амплитуда напряжений в волне определяется лишь плотностью тока частиц и длительностью импульса облучения. Увеличение энергии падающих на мишень частиц не приводит к существенному увеличению амплитуды волны (рис. 1.19). При ионном облучении из-за малого пробега разлет вещества в зоне энерговыделения идет одновременно с нагревом, поэтому, несмотря на большую плотность энерговыделения, амплитуда волны остается невысокой. Увеличение энергии ионов и тем самым размеров зоны энерговыделения увеличивает время разлета, что приводит к значительному увеличению амплитуды волны (рис. 1.19, кривая 4).

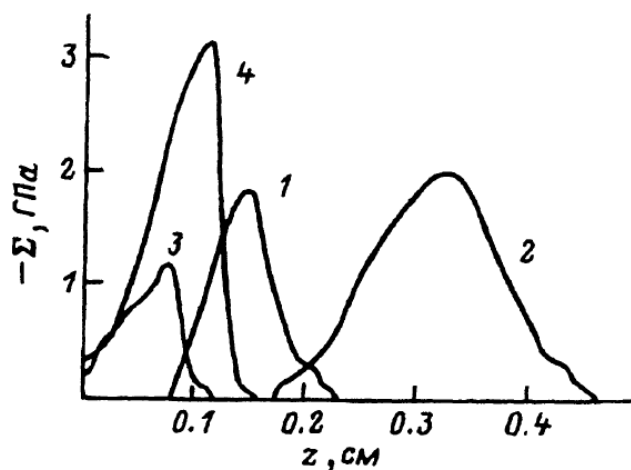


Рисунок 1.19 – Профили напряжения упругопластической волны при воздействии электронных и ионных пучков ($j = 3 \text{ кА/см}^2$, $\tau_{ii} = 100 \text{ нс}$) при различных энергиях частиц. Электроны: 0,5 (1), 1 (2) МэВ; протоны: 0,5 (3), 1 (4) МэВ [27]

Авторы работы [27] также отметили ещё один важный факт. Численное

моделирование показало, что как при ионном, так и электронном облучении в диапазоне плотностей потока энергии ($10^7 \div 10^{10}$) Вт/см² температура среды вне области энерговыведения меняется незначительно $\Delta T \leq 10$ К. Это означает, что все структурные превращения в облучаемых материалах происходят только за счет прохождения волн напряжения.

В работе [28] представлено описание экспериментов по получению высоких давлений, осуществлению структурных и химических превращений в фокальном пятне сильноточного пучка. Обсуждаются принципы моделирования с помощью сильноточного релятивистского пучка, сверхскоростного удара и других энергетических воздействий на преграду. Рассматриваются возможности использования такого пучка для модификации поверхности.

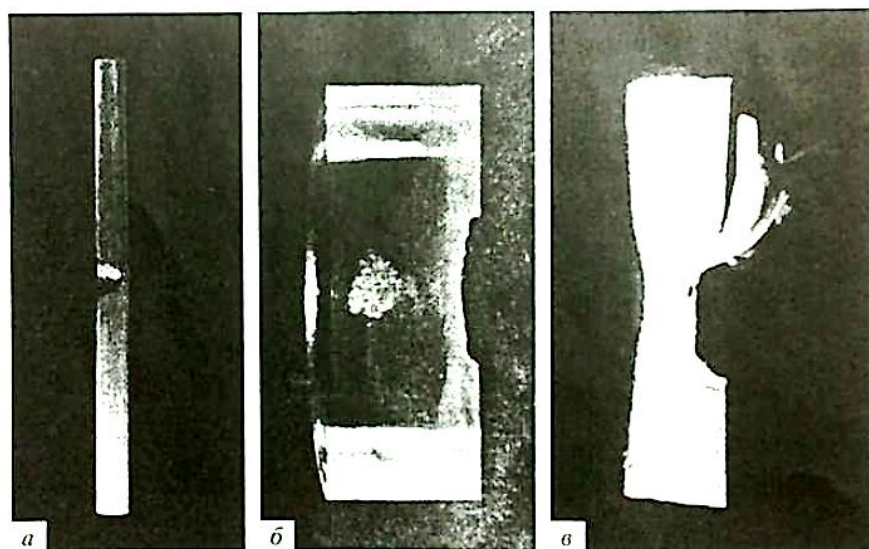


Рисунок 1.20 – Примеры воздействия электронного пучка на различные материалы: а – алюминий; б – оргстекло; в – вакуумная резина [30]

На рис. 1.20 представлены примеры воздействия электронного пучка на различные материалы. В максимальных режимах ускорителя «Кальмар» ($I = 200$ кА, $E = 0,5$ МэВ, $\tau = 10^{-7}$ с) сфокусированный пучок электронов, помимо откола с внешней стороны анода, образовывал за один импульс полусферический кратер глубиной ($5,0 \div 5,5$) мм (рис. 1.20, а) на внутренней поверхности алюминиевого анода, а в отдельных случаях пробивал насквозь анод и алюминия толщиной 6 мм. Несфокусированный пучок электронов

производил передний и задний отколы в пластинах из оргстекла, а боковые волны разгрузки инициировали необратимые явления в объеме мишени (рис. 1.20, б). Интересен факт регистрации заднего откола в вакуумной резине (рис. 1.20, в), который не всегда просто получается во взрывных экспериментах, так как откольные явления в резине происходят при относительном удлинении 600%.

Эксперименты и результаты расчетов показывают, что в фокальном пятне РЭП ускорителя «Кальмар» давление достигает $2 \cdot 10^{11}$ Па. Грубую оценку давления в фокальном пятне РЭП можно, получить, считая, что происходит чисто изохорический нагрев:

$$P[\text{Па}] = \Gamma \cdot \omega [\text{Дж/м}^3] \quad (1.4)$$

где, Γ – коэфф. Грюнайзена, ω – объемная плотность энергии в зоне энерговыделения РЭП.

Высокие термодинамические параметры, реализуемые в фокальном пятне РЭП, открывают широкие возможности для изучения поведения вещества в экстремальных условиях и позволяют осуществить структурные и химические превращения. В работе [31] обнаружено, что при воздействии сильноточного РЭП с плотностью мощности 10^{12} Вт/см² на мишень, содержащую нитрид бора или графит, образуются, как это видно из данных рентгеноструктурного анализа и исследования поглощения ИК-спектра, более плотные алмазоподобные фазы исходного вещества. Совместное действие высоких давлений и температур, реализующихся в фокальном пятне РЭП, является весьма интересным для химического синтеза. Со 100%-ым выходом проходит реакция $\text{CuBr}_2 + \text{Cu} \rightarrow \text{CuBr}$. Легко образуются карбиды меди и железа, обычно требующие длительного нагревания.

В работе [29] представлены результаты экспериментального определения откольной прочности полимерных материалов на примере образцов из оргстекла и полистирола. Исследование проводилось в диапазоне плотности энергии $(35 \div 1500)$ Дж/см². Несмотря на близкие физико-технические параметры исследуемых полимеров (оргстекло, полистирол,

эпоксидные смолы), характер их разрушения при импульсном объёмном энерговыделении различен. Показано, что в полистироле трещины возникают непосредственно из зоны энерговыделения, в оргстекле рядом с зоной энерговыделения наблюдается прозрачный неповреждённый участок, за которым образуются трещины (рис. 1.22). Определена откольная прочность полистирола, которая составила $\sigma = 0,35$ ГПа и мало отличается от откольной прочности оргстекла, что интересно, так как пространственная локализация зон разрушения образцов из этих двух материалов сильно различается.

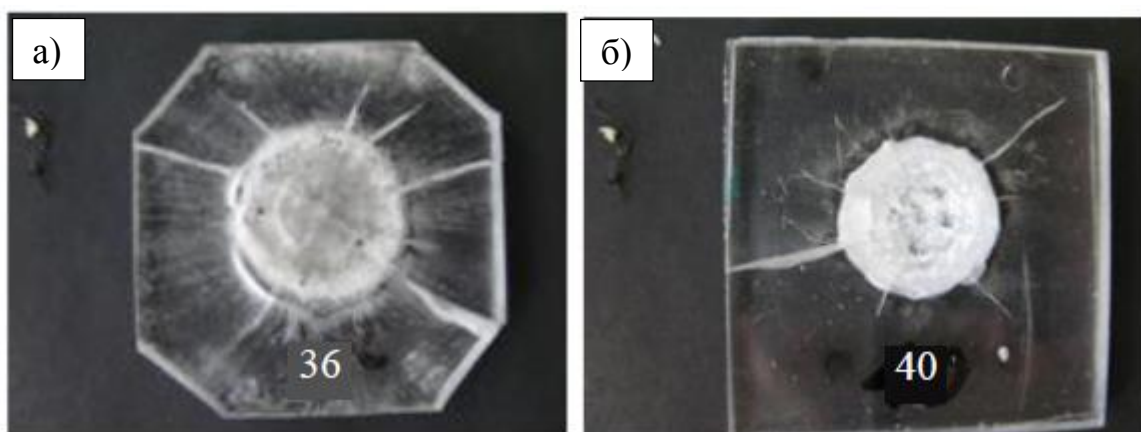


Рисунок 1.22 – Отколы задней поверхности мишени из полистирола (а) и оргстекла (б) при плотности энергии $620 \div 640$ Дж/см². Диаметр откольного разрушения составляет $18 \div 20$ мм [19]

Таблица 1.2 – Откольная прочность материалов [29, 30]

Материалы	Медь	Алюминий	ПММА	Полистирол
Откольная прочность σ [ГПа]	1,19	0,76	0,25 – 0,3	0,35

1.3 Основные выводы из литературного обзора и постановка задач исследования

Анализ экспериментальных работ, посвященных изучению физико-химических процессов, инициируемых сильноточными электронными пучками в конденсированных средах, позволил сделать следующие выводы.

Установлены два главных фактора разрушающего воздействия СЭП на ионные кристаллы – электрические разряды и акустические импульсы

сжатия-растяжения, возникающие в твердом теле в результате мгновенного разогрева электронным пучком. При низких плотностях энергии СЭП $0,1 < H < 1$ Дж/см² и многоимпульсном облучении первичными разрушениями являются каналы электрического пробоя. С увеличением плотности энергии СЭП (при $H > 0,6$ Дж/см²) одновременно с электрическими разрядами возникают трещины и отколы, образующиеся в результате интерференции волн растяжения.

Рассмотрен процесс самофокусировки РЭП (500 кэВ, 500 кА, 70 нс) в вакуумном диоде. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что для магнитной самофокусировки РЭП необходимо, чтобы ток электронного пучка превышал критический ток Альфвена ($I > I_{кр} \sim 20$ кА).

К настоящему времени опубликовано большое количество работ по взаимодействию СЭП средней плотности ($H \leq 2$ Дж/см²) с диэлектриками. Интерес представляют исследования взаимодействия сверхплотных СЭП ($H > 2$ Дж/см²) с конденсированными средами. Получить такие пучки с применением ускорителя, изготовленного на базе ГИН-600 (200 кэВ, 2 кА, 12 нс) можно только с помощью явления самофокусировки электронного пучка.

Целью дипломной работы является изучение морфологии разрушений твердых тел при облучении СЭП в режиме филаментации и самофокусировки и по результатам исследований определить параметры филаментированного СЭП - объемную плотность энергии в пятне фокусировки и среднюю энергию электронов.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1 Экспериментальная установка для исследования свечения и разрушения конденсированных сред

Источником формирования электронного пучка служил ускоритель электронов, изготовленный на базе генератора импульсных напряжений ГИН-600 построенного по схеме Аркадьева–Маркса [31]. Генерация электронного пучка происходила в результате взрывной эмиссии при приложении к катоду импульса высокого напряжения.

В качестве катода использовалась трубка из нержавеющей стали радиусом $R = 3$ мм. Исследуемые металлические образцы (медь, алюминий) устанавливались на аноде вакуумного диода. На одну из поверхностей полимерных образцов наносилась тонкая (~ 10 мкм) алюминиевая фольга, после чего они помещались на анод вакуумного диода, имеющего отверстие для облучения. Расстояние между катодом и анодом варьировалось в пределах $(3,0 \div 5,0)$ мм. Параметры пучка электронов: средняя энергия электронов $E_{cp} = 0,2$ МэВ, ток $I = 2$ кА, длительность импульса $\tau = 12$ нс. Плотность энергии СЭП регулировалась в пределах $(0,05 \div 50)$ Дж/см². Измерение энергии СЭП производилось калориметрическим и радиационно-химическим методами.

Использовались два режима облучения исследованных образцов.

- Режим облучения СЭП низкой и средней плотности $(0,05 \div 2)$ Дж/см².

В данном режиме облучение проводилось при температуре 300 К в атмосферном воздухе при выводе СЭП через алюминиевую фольгу, толщиной $(20 \div 30)$ мкм. Использовались два метода регистрации спектров свечения электрических разрядов, индуцированных СЭП в диэлектриках (рис. 2.1).

Интегральные спектры свечения измерялись с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048 (режим измерения «спектр за импульс»).

Время - разрешенные спектры свечения измерялись с помощью импульсного спектрометра на основе дифракционного монохроматора МДР-

23, ФЭУ-84 и осциллографа Tektronix DPO 3034 (режим измерения «спектр по точкам»).

Регистрация пространственного распределения свечения каналов электрического пробоя (КЭП) в зоне торможения электронного пучка проводилась с помощью зеркальной цифровой фотокамеры SONY DSLR-A500 в режиме «Bulb» за один импульс возбуждения через микроскоп МБС-10. Морфология остаточных разрушений, образующихся после облучения СЭП, изучалась методом оптической микроскопии с помощью микровизора проходящего света μ Vizo-101 с пространственным разрешением ~ 1 мкм.

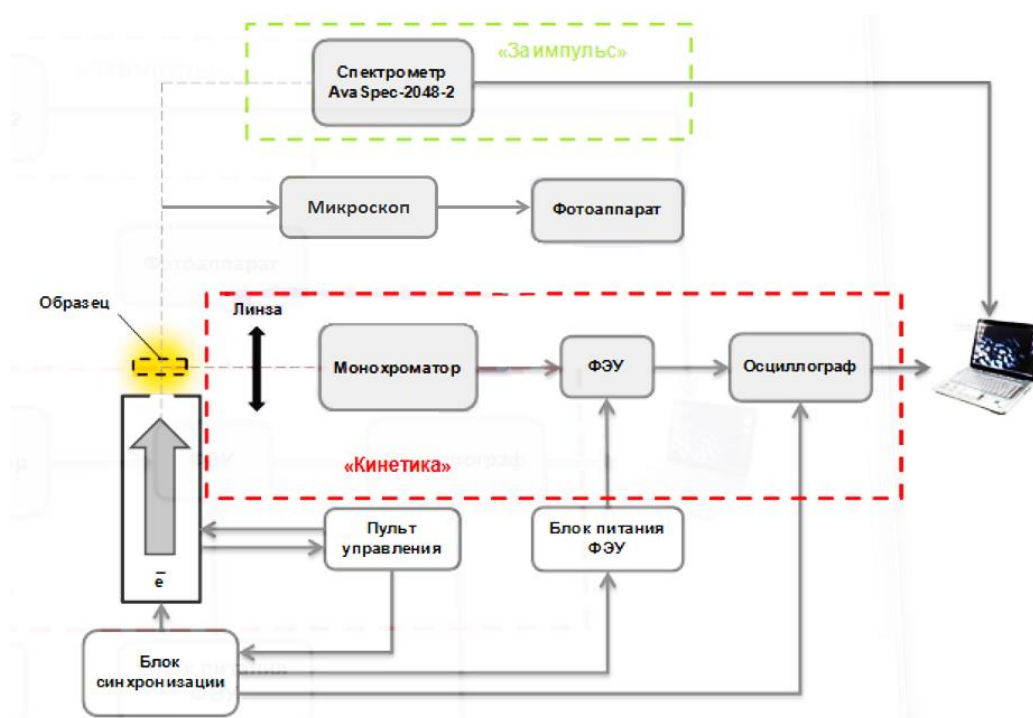


Рисунок 2.1 – Блок-схема экспериментальной установки

- Облучение образцов электронным пучком высокой плотности ($H > 2$ Дж/см²) осуществлялось в вакуумной камере, совмещенной с вакуумным диодом в режиме филаментации и самофокусировки СЭП. Давление в вакуумном диоде составляло $P \sim 10^{-2}$ мм.рт.ст., аспектное отношение $R/d_{ка} = (0,6 \div 1)$, плотность энергии СЭП: $H = (2 \div 50)$ Дж/см².



Рисунок 2.2 – Схема облучения и регистрации пространственного распределения КЭ и КЭП в образцах. L – толщина образца, $d_{ка}$ – межэлектродный зазор, R – радиус полого цилиндрического катода

Для самофокусировки сильноточного электронного пучка (СЭП) использовался полый цилиндрический катод диаметром 6 мм и толщиной стенок $\sim 0,2$ мм. Величина межэлектродного зазора $d_{ка}$ варьировалась в пределах от 3,0 до 5 мм. Геометрия вакуумного диода, используемая для режима самофокусировки СЭП, приведена на рис. 2.2.

Для измерения плотности энергии СЭП, выведенного в атмосферу, использовался пьезодатчик, отградуированный с помощью радиационно-химического метода. Порядок измерений плотности энергии СЭП, выведенного в атмосферу, ($0,1 < H < 0,4$) Дж/см² следующий. Вначале устанавливали величину катод - анодного зазора. Затем вакуумный диод откачивали до давления $\sim 10^{-2}$ мм.рт.ст. За анодной фольгой устанавливался пьезодатчик. С помощью источника питания заряжали емкости ГИН-600 до

напряжения ($25 \div 30$) кВ и инициировали импульс тока электронного пучка. Электронный пучок попадал на приемник пьезодатчика (латунная пластина) и возбуждал акустическую волну, амплитуда которой пропорциональна плотности энергии, выделяющейся в приемнике. Воздействие акустической волны на пьезодатчик приводило к формированию биполярного импульса напряжения, пропорционального амплитуде акустической волны, которая измерялся осциллографом DPO 3034.

2.2 Объекты исследований

В качестве образцов для исследований использовались металлы (медь, алюминий) и полимеры (винипроз, ПММА). Исследуемые образцы представляют собой тонкие пластинки размерами ($20 \times 20 \times L$) мм (табл. 2.1).

Таблица 2.1 - Исследуемые образцы

№	Образец	Толщина L [мкм]	Массовая плотность ρ [г/см ³]	№	Образец	Толщина L [мкм]	Массовая плотность ρ [г/см ³]
1	Медь	180	8,96	3	Винипроз	380	1,4
2	Алюминий	110	2,7	4	ПММА	3 мм	1,19

Винипроз – пластический материал, получаемый термической обработкой непластифицированного сополимера хлорвинила с метилметакрилатом с добавкой стабилизатора (стеарата алюминия).

Применяют этот материал для снятия копий и вычерчивания чертежей несмываемой тушью. Выпускают в виде листов длиной не менее 1300 мм, шириной не менее 550 мм, толщиной ($0,25 \div 0,45$) мм. Поверхность листов ровная, с одной стороны матовая, а с другой – полированная. Материал гибкий, бесцветный, с равномерным желтоватым оттенком. Удельный вес ($1,35 \div 1,4$) г/см³. Предел прочности при растяжении – не менее 50 кг/см². Относительное удлинение при разрыве – не более 12%. Твердость по маятниковому прибору – не менее 0,7. Водопоглощение – не более 1%. Прозрачность по методике МИАМ – не менее 75%. Морозостойкость – не выше – 30° [32].

Полиметилметакрилат (ПММА) – жесткий аморфный материал, обладающий высокой прозрачностью, атмосферостойкостью, хорошими физико-механическими и электроизоляционными свойствами (но непригоден

вследствие своей полярности для использования при высоких частотах). Он имеет высокую морозостойкость (до -60 °С) и сравнительно высокую теплостойкость. Полиметилметакрилат хорошо растворяется в карбоновых кислотах, сложных эфирах, в том числе в собственном мономере, кетонах, хлорированных и ароматических углеводородах. Плохо растворяется в алифатических углеводородах и низших спиртах. При нормальных условиях полиметилметакрилат стоек к кислотам, щелочам, воздействию света и кислорода, масло и водостоек. При нагревании выше ($105 \div 110$) °С полиметилметакрилат размягчается, переходит в высокоэластичное состояние и легко формуется.

2.3 Экспериментальные результаты и их обсуждение

Одна из задач, которая была поставлена в работе – выявить особенности в морфологии разрушений полимеров при облучении самосфокусированным электронным пучком высокой плотности. По результатам исследований определить среднюю (эффективную) энергию электронов, генерируемых в режиме самофокусировки СЭП. Для этого было необходимо детально изучить особенности морфологии разрушений, которые проявляются по мере постепенного увеличения плотности тока СЭП.

2.3.1 Пространственное распределение свечения и разрушений в зоне торможения электронного пучка в ПММА при облучении СЭП низкой плотности

На рис. 2.3 приведены фотографии свечения ПММА при облучении СЭП низкой и средней плотности $H = (0,05 \div 0,3)$ Дж/см².

Анализ фотографий, приведенных на рис. 2.3, свидетельствует о том, что в первом импульсе возбуждения и при малой плотности энергии СЭП ($H \leq 0,1$ Дж/см²) наблюдается сравнительно равномерная по облучаемой поверхности катодолюминесценция образца, длительность которой на полувысоте составляет ~ 19 нс (рис. 2.4, а), что сопоставимо с временным разрешением импульсного спектрометра. Наблюдаемые неоднородности на рис. 2.3, а связаны с флуктуациями плотности тока пучка в отдельных импульсах.

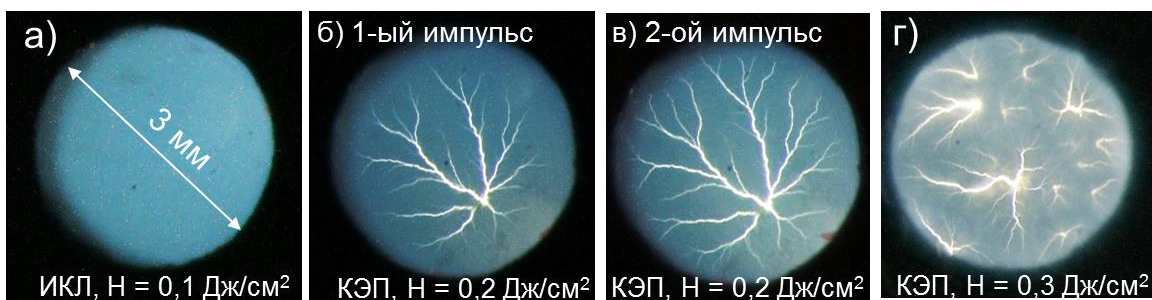


Рисунок 2.3 – Фотографии свечения ПММА при облучении СЭП низкой плотности $H = (0,1 \div 0,3) \text{ Дж/см}^2$

Увеличение плотности энергии СЭП до $H = 0,2 \text{ Дж/см}^2$ привело к накоплению инжектированного в образец отрицательного объемного заряда СЭП и инициированию электрического пробоя ПММА в зоне торможения электронного пучка. Электрический пробой реализуется в виде стримерных разрядов (СР), которые инициируются на возбуждаемой поверхности образца и развиваются в область локализации отрицательного объемного заряда (ООЗ), пространственное распределение которого определяется энергетическим спектром СЭП. Электрические разряды регистрируются как по свечению плотной низкотемпературной плазмы, образующейся в каналах электрического пробоя (КЭП) (рис. 2.3 б, в, г), так и по морфологии остаточных разрушений (рис. 2.6). Плотность энергии $H^* = 0,2 \text{ Дж/см}^2$ соответствует порогу формирования КЭП. При облучении СЭП более высокой плотности ($H = 0,3 \text{ Дж/см}^2$) инициируется больше КЭП в зоне торможения электронного пучка (рис. 2.3, г) за счет накопления большого количества инжектированного ООЗ СЭП в образец. Скорость накопления ООЗ настолько высока, что один КЭП не в состоянии нейтрализовать весь инжектированный отрицательный заряд в зоне торможения СЭП в силу ограниченной скорости его распространения.

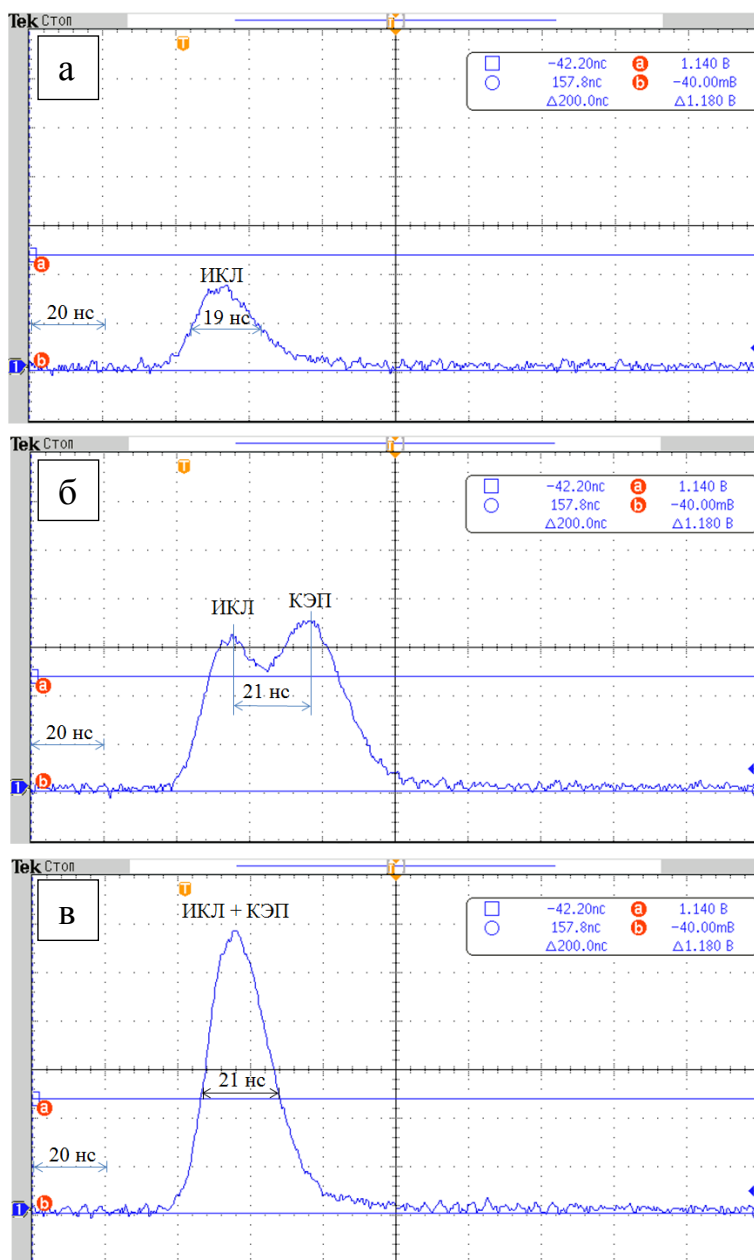


Рисунок 2.4 - Кинетики свечения ПММА на длине волны 600 нм, а – ИКЛ, $H = 0,1$ Дж/см²; б – ИКЛ + КЭП, первый импульс, $H = 0,2$ Дж/см²; в – ИКЛ + КЭП, второй импульс, $H = 0,2$ Дж/см²

На рис. 2.4 приведены кинетики свечения ПММА на длине волны 600 нм при облучении СЭП с различной плотностью энергии. Кинетические характеристики свечения образцов зарегистрированы с помощью монохроматора МДР-23, ФЭУ-84 и осциллографа Tektronix DPO-3034, связанного с компьютером.

Из представленных осциллограмм видно, что при $H = 0,1$ Дж/см² длительность импульса свечения ПММА минимальна и составляет 19 нс. Сравнение кинетики свечения (рис. 2.4, а) и соответствующей фотографии

(рис. 2.3, а) свидетельствует о том, что при данной плотности энергии СЭП регистрируется импульсная катодоллюминесценция (ИКЛ) образца. Вышесказанное также подтверждают и спектральные характеристики наблюдаемого свечения (рис. 2.4, а). Установлено, что кинетические и спектральные характеристики свечения ПММА изменяются при увеличении плотности энергии СЭП. Так, например, при $H = 0,2 \text{ Дж/см}^2$ одновременно наблюдается ИКЛ и свечение КЭП. Импульс свечения ПММА при этом состоит из двух разделенных во времени пиков: ИКЛ и импульса плазменного свечения СР. Из рис. 3. 2, б видно, что в первом импульсе возбуждения СЭП свечение СР запаздывает на $\sim 21 \text{ нс}$ относительно ИКЛ. Это запаздывание связано с задержкой развития электрического пробоя относительно импульса облучения. Во втором импульсе облучения, электрические разряды развивается по уже сформированным в первом импульсе КЭП (рис. 2.3, в) и задержка свечения СР относительно ИКЛ отсутствует (рис. 2.4, в). Интенсивность свечения СР во втором импульсе увеличивается более чем на порядок, и представляет моноимпульс свечения, длительность которого на полувысоте составляет $\approx 21 \text{ нс}$ (рис. 3. 2, в).

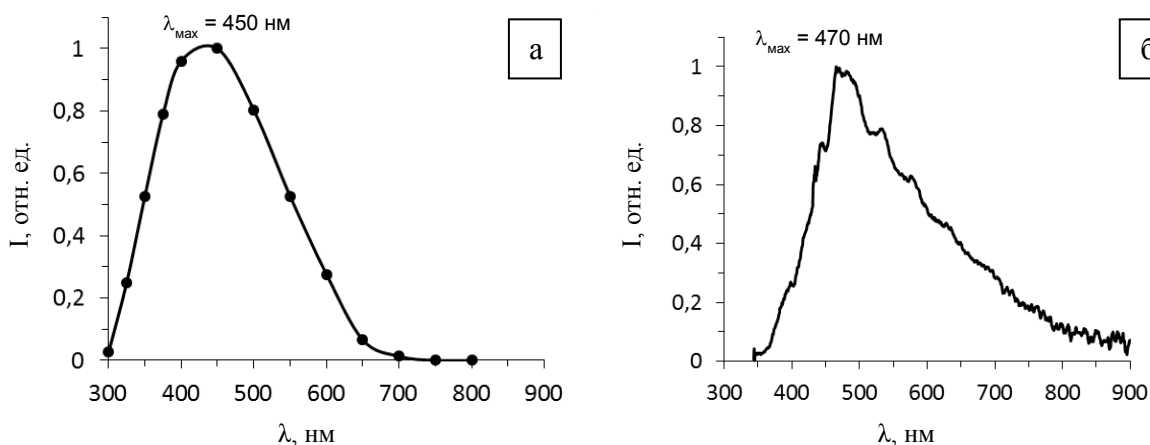


Рисунок 2.5 – Спектр ИКЛ ПММА в допороговом режиме возбуждения при $H = 0,1 \text{ Дж/см}^2$ (а) и спектр свечения плазмы стримерных разрядов в ПММА в режиме возбуждения при $H = 0,4 \text{ Дж/см}^2$ измеренный за 1 импульс возбуждения (б)

На рисунке 2.5 приведены спектр ИКЛ ПММА в допороговом режиме возбуждения при $H = 0,1 \text{ Дж/см}^2$ (а) и спектр свечения плазмы стримерных разрядов в ПММА при $H = 0,4 \text{ Дж/см}^2$ измеренный за 1 импульс возбуждения

Морфология разрушений ПММА после однократного облучения СЭП низкой плотности $H = (0,2 \div 0,3) \text{ Дж/см}^2$ приведена на рис. 2.6, а-в. Видно, что с увеличением H количество КЭП, зарождающихся на облучаемой поверхности, увеличивается. Распределение КЭП в зоне торможения электронного пучка близко к однородному, а максимальная глубина залегания достигает $\sim 350 \text{ мкм}$, что соответствует средней энергии электронов в энергетическом спектре СЭП $E_{\text{ср}} \sim 200 \text{ кэВ}$.

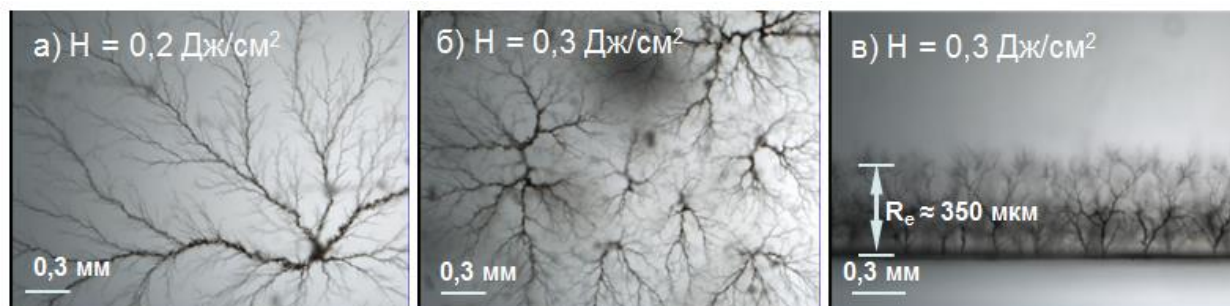


Рисунок 2.6 - Морфологии остаточных разрушений, образующихся в зоне торможения СЭП в результате развития электрического пробоя; а, б) – распределение КЭП по облучаемой поверхности; в) – по глубине

Глубину пробега электронного пучка R_e можно рассчитать по формуле:

$$R_e = 0,11 \left[\left(1 + 22,4 E_{\text{ср}}^2 \right)^{1/2} - 1 \right] \rho^{-1} \quad (2.1)$$

где $E_{\text{ср}}$ [МэВ] – средняя энергия СЭП; ρ [г/см³] – массовая плотность облучаемого материала.

Из (2.1) можно определить $E_{\text{ср}}$ по формуле:

$$E_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{22,4} \cdot \left[\left(\frac{\rho R_e}{0,11} + 1 \right)^2 - 1 \right]} \quad (2.2)$$

В данном случае, $R_e = 350 \text{ мкм}$ (рис. 2.6, в), $\rho_{\text{ПММА}} = 1,19 \text{ г/см}^3$

$$E_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{22,4} \cdot \left[\left(\frac{1,19 \cdot 0,035}{0,11} + 1 \right)^2 - 1 \right]} \approx 0,2 \text{ МэВ}$$

Следовательно, расчетная величина средней энергии СЭП ($E_{\text{ср}} \sim 200 \text{ кэВ}$), близка к экспериментально определенной по глубине залегания КЭП.

2.3.2 Филаментация и самофокусировка СЭП в опытах на ускорителе (0,2 МэВ; 2 кА; 12 нс)

2.3.2.1 Морфология разрушений, формируемых в металлах филаментированным и самофокусированным СЭП

На рис. 2.7 приведены фотографии разрушений, образующихся на облучаемой и тыльной поверхностях медного анода при одноимпульсном облучении электронным пучком на ускорителе ГИН-600 (0,2 МэВ; 2 кА; 12 нс) в режиме его филаментации и самофокусировки.

Роль анода выполняла медная фольга, толщиной $L = 180$ мкм, радиус катода $R = 3$ мм, межэлектродный зазор $d_{ка} = 3$ мм.

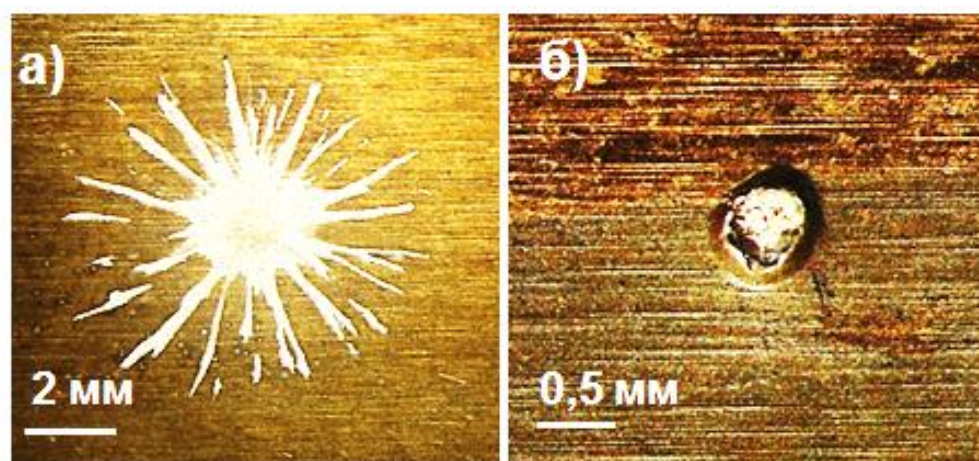


Рисунок 2.7 – Разрушение облучаемой (а) и тыльной (б) поверхности медного анода при облучении на ускорителе ГИН-600 (0,2 МэВ; 2 кА; 12 нс) за один импульс:
а) Фотография эрозионного следа на облучаемой поверхности; б) Фотография откола на тыльной поверхности; межэлектродный зазор $d_{ка} = 3$ мм

Видно (рис. 2.7), что в результате воздействия на облучаемую поверхность меди единичного импульса СЭП при величине межэлектродного зазора $d_{ка} = 3$ мм формируется фигура, напоминающая «звезду», количество лучей в которой составляет $\sim 22 - 25$ при диаметре фигуры $\sim 7,5$ мм. По этой фотографии, можно определить геометрические параметры отдельных «лучей»: ширина эрозионного следа изменялась в пределах $\sim (50 \div 150)$ мкм, диаметр центрального кратера $\sim 2,5$ мм, глубина следов эрозии $\sim (15 \div 20)$ мкм. В опытах иногда наблюдалась редкая эрозионная картина - отдельная часть «луча» имела прерывистую структуру. «Луч» состоял из отдельных микрократеров, диаметром $\sim (50 \div 100)$ мкм, отделенных друг от друга

расстоянием, равным диаметру кратера. Одной из причин формирования прерывистой структуры луча может быть модуляция тока филаменты за счет процессов, развивающихся в плазме анодного факела.

Помимо эрозионных автографов на облучаемой поверхности на тыльной стороне анода, образовывался откол диаметром $\sim 0,5$ мм (рис. 2.7, б).

Причиной образования откола является ударная волна, формирующаяся в пятне самофокусировки по испарительному механизму.

Биполярная ударная волна, образующаяся в фокальном пятне СЭП, распространяется в направлении к тыльной поверхности медной пластины. Волна сжатия отражается от тыльной поверхности медной пластины становится волной растяжения, которая складывается с волной растяжения, движущейся со стороны облучаемой поверхности. В результате интерференции волн растяжения возникает двойное растяжение. При превышении растягивающего напряжения порогового значения σ_0 (откольная прочность материала) часть свободной поверхности откалывается и улетает приблизительно с двойной массовой скоростью в виде откольной тарелочки.

Давление в фокальном пятне СЭП можно вычислить по формуле [28]:

$$P[\text{Па}] = \Gamma \cdot \omega \left[\text{Дж/м}^3 \right] \quad (1.8)$$

где, Γ – коэфф. Грюнайзена, ω – объемная плотность энергии в зоне энерговыделения СЭП. Считая, что происходит чисто изохорический нагрев, $\Gamma \approx 1$. Из рис. 2.7, б видно, что растягивающее напряжение превышает откольную прочность медного анода. Известно, что откольная прочность меди $\sigma_0 = 1,19$ ГПа [23]. Т.е. минимальное значение давления в фокальном пятне СЭП $P_{\text{мин}} = 1,19$ ГПа. Отсюда, по формуле (1.8) можно рассчитать минимальную объемную плотность энергии в фокальном пятне:

$$\omega \approx 1,19 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3.$$

В случае облучения анода из алюминия толщиной 110 мкм, межэлектродный зазор $d_{\text{ка}} = 3$ мм за один импульс облучения пробивал насквозь анод, образовывалось отверстие диаметром 1,8 мм (рис. 2.8). Последовательное

увеличение межэлектродного зазора $d_{ка}$ в диапазоне от 3 до 4 мм приводит к уменьшению диаметра «лучей», а затем к их исчезновению (рис. 2.9 а, б).

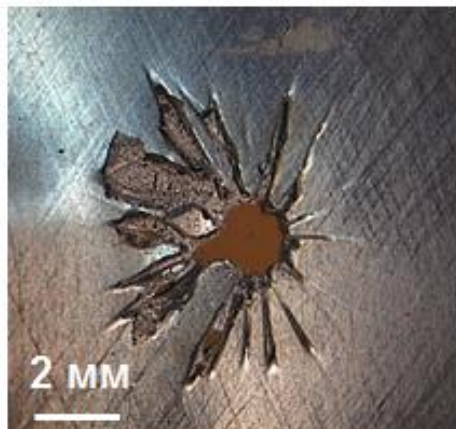


Рисунок 2.8 – Разрушение поверхности алюминиевого анода при облучении на ускорителе ГИН-600 (0,2 МэВ; 2 кА; 12 нс) за один импульс; $d_{ка} = 3$ мм

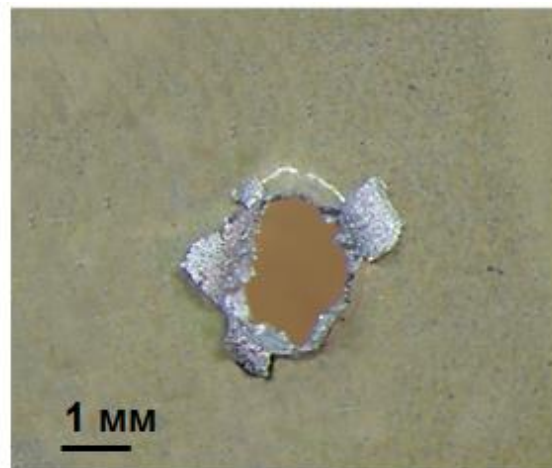
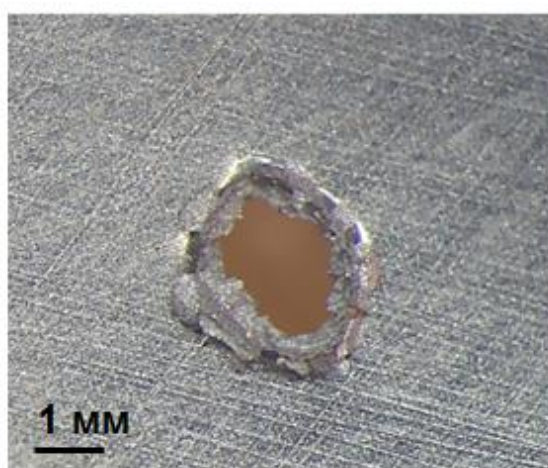


Рисунок 2.9 – Разрушение облучаемой и тыльной поверхности алюминиевого анода при облучении на ускорителе ГИН-600 (0,2 МэВ; 2 кА; 12 нс) за один импульс; $d_{ка} = 4$ мм

Однако центральное отверстие остается, что свидетельствует о стабильности процесса самофокусировки электронного пучка несмотря на увеличение межэлектродного зазора до 4 мм.

На рис. 2.9 приведена морфология разрушений облучаемой и тыльной поверхности алюминиевой мишени, толщиной 110 мкм при $d_{ка} = 3,5$ мм. Видно, что «розетка» разрыва формируется не только на тыльной, а так же на облучаемой поверхности образца. Это свидетельствует о том, что максимум энерговыделения сосредоточен на глубине, порядка 50 мкм. Только в этом

случае возможно формирование откола как на облучаемой, так и на тыльной поверхности мишени.

Различие морфологии разрушений в меди и алюминии связано с различием плотности этих материалов. У меди высокая массовая плотность $\rho = 8,96 \text{ г/см}^3$ так, что глубина зоны поглощения энергии мала. При этом уровень давления в фокальном пятне сфокусированного электронного пучка ограничивается из-за быстрого разлета нагретой области. Глубина поглощения энергии в алюминии большая ($\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ г/см}^3$), что приводит к развитию термического взрыва в объеме образца и сопровождается образованием напряжения на облучаемой и тыльной стороне образца с одновременным формированием двух «розеток».

Считая, что глубина зоны энерговыделения в образце алюминия равна половине его толщины, тогда $R_e = 55 \text{ мкм}$. Можно оценить энергию сфокусированного электронного пучка по формуле (2.2): $E_{cp} = 0,11 \text{ МэВ}$.

2.3.2.2 Морфология разрушений, формируемых филаментированным СЭП в полимерах

На рис. 2.10 приведена морфология разрушений, образующихся в ПММА при облучении СЭП через диафрагму, вырезающей центральную часть пятна самосфокусированного электронного пучка. Видно, что на облучаемой поверхности образуется кратер (а) в результате испарения тонкого приповерхностного слоя образца. На тыльной поверхности образца, толщиной $\sim 1,2 \text{ мм}$ формируется откольная воронка (в). На рис. 2.10, г приведена фотография откольной плоскости, которая образуется при интерференции волн растяжения.

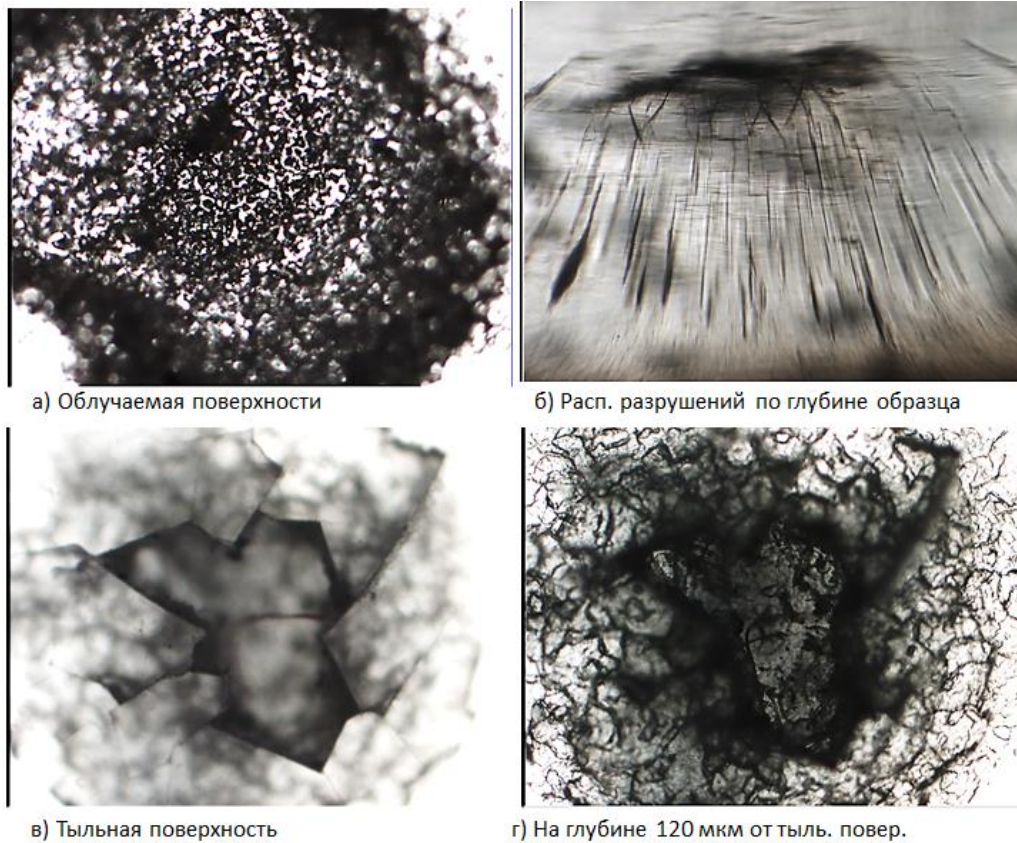


Рисунок 2.10 – Фотографии разрушений в ПММА при облучении СЭП в режиме самофокусировки: а – вид разрушений со стороны облучаемой поверхности; б – распределение разрушений по глубине образца (на глубине ~ 0.5 мм от тыльной поверхности); в - откол на тыльной поверхности; г - морфология разрушения на глубине 360 мкм от тыльной поверхности

Давление и объемную плотность энергии в фокальном пятне СЭП для данного случая можно также вычислить по формуле [28]:

$$P[\text{Па}] = \Gamma \cdot \omega [\text{Дж/м}^3] \quad (2.3)$$

где, Γ – коэфф. Грюнайзена, ω – объемная плотность энергии в зоне энерговыделения СЭП. Известно, что откольная прочность ПММА равна $\sigma_0 = 0,3$ ГПа [23]. Отсюда минимальная объемная плотность энергии в пятне фокусировки равна:

$$\omega \approx 0,3 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$$

Таким образом анализ экспериментальных данных позволяет сделать заключение о том, что в режиме самофокусировки СЭП в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600 объемная плотность энергии в конденсированных средах

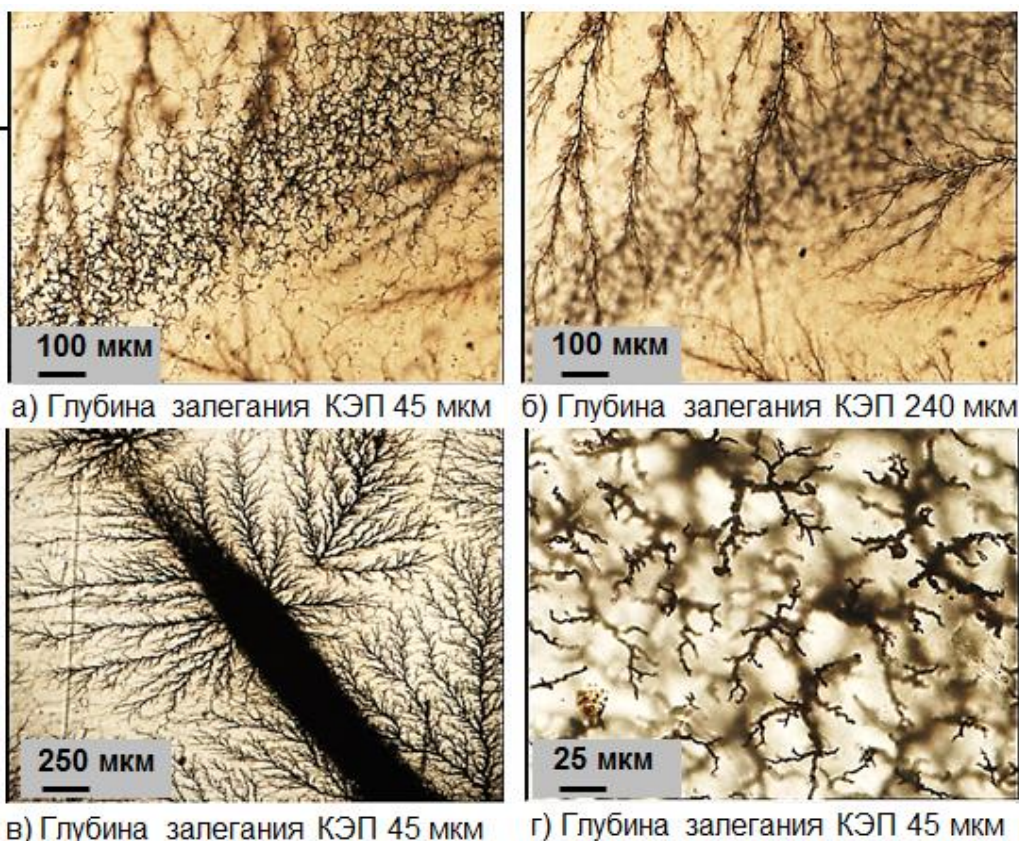
может достигать $(10^9 \div 10^{10})$ Дж/м³, а амплитуда ударных волн «сжатия – растяжения» $(10^9 \div 10^{10})$ Па.

Вторая задача, которую необходимо было решить – определить энергию электронов в режиме филаментации и самофокусировки СЭП. Эта задача была решена следующим образом.

Изменяя величину катод – анодного зазора $d_{ка}$ в диапазоне $(3 \div 4)$ мм можно добиться условий при которых испарения поверхности исследуемых полимеров не наблюдалось. В этом случае становится возможным изучение пространственного (по глубине образца) распределения КЭП, образующихся в исследуемых полимерах. Выше было показано, что по максимальной глубине проникновения стримерных разрядов можно оценить эффективную энергию электронов в пучке. В связи с этим, было запланировано изучение распределения КЭП по глубине в зонах филаментации СЭП.

Первые эксперименты были проведены на образцах винипрозы. На рис. 2.10 приведены фотографии разрушений, формируемых СЭП в винипрозе в режиме филаментации и самофокусировки.

Установлено, что при сравнительно высоких плотностях энергии СЭП в области расположения филаменты интенсивность разрушения была настолько большой, что просмотреть пространственное (по глубине) распределение КЭП не представлялось возможным (рис. 2.10, в). В связи с этим путем изменения величины $d_{ка}$ нами подбирались условия облучения такие, чтобы можно было реализовать необходимые исследования. Эта задача была решена. На рис. 2.10, а,б,г приведены фотографии пространственного, по глубине, распределение КЭП, в зоне распространения филаментированного СЭП.



Рисенок 2.11 – Морфология разрушений, образующихся в винипрозе при облучении СЭП в режиме его филаментации и самофокусировки в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600

Обнаружено, что при облучении полимера филаментированным и самофокусированным СЭП в зоне торможения электронного пучка формируются два типа электрических разрядов, отличающихся пространственным распределением по глубине залегания и плотностью распределения по облучаемому объему. Анализ фотографий КЭП на различных расстояниях от поверхности свидетельствует о том, что в зонах расположения филамент в приповерхностной области образца формируется плотная сетка отдельных микроканалов, длина которых составляет 100 мкм.

Из рис. 2.11, а видно, что средняя глубина залегания микроканалов в винипрозе составляет 45 мкм. Зная $\rho_{\text{винипроз}} = 1,4 \text{ г/см}^3$ из выражения (2.2) можно определить среднюю энергию электронов в филаментированном пучке:

$$E_{\text{cp}} = \sqrt{\frac{1}{22,4} \cdot \left[\left(\frac{1,4 \cdot 0,0045}{0,11} + 1 \right)^2 - 1 \right]} \approx 72 \text{ кэВ}$$

Таким образом, средняя (эффективная) энергия электронов в филаменте, в данных условиях эксперимента, составляет $E_{эфф.} \approx 72$ кэВ.

Измерив глубину залегания более глубоких КЭП, равномерно распределенных в зоне торможения СЭП (~ 240 мкм) с помощью (2.2) можно вычислить среднюю энергию высокоэнергетических электронов, которые одновременно с низкоэнергетическими формируются при работе вакуумного диода в режиме самофокусировки СЭП:

$$E_{cp} = \sqrt{\frac{1}{22,4} \cdot \left[\left(\frac{1,4 \cdot 0,024}{0,11} + 1 \right)^2 - 1 \right]} = 180 \text{ кэВ}$$

Подобные эксперименты были проведены и на образцах ПММА. На рис. 2.12 - 2.13 приведены фотографии свечения, возникающего в момент облучения ПММА самосфокусированным СЭП и остаточные разрушения, зарегистрированные после однократного воздействия электронного пучка.

Плотность энергии СЭП была такова, что в зонах филаментации и в фокальном пятне произошло испарение материала. Поэтому получить необходимую информацию можно только из рис. 2.12. Видно, что первичным источником свечения являются большое количество микроканалов, образующихся в зонах филаментации СЭП.

Уменьшение плотности энергии СЭП позволило изучить пространственное распределение КЭП по глубине облучаемого образца. Полученные данные приведены на рис. 2.14, а-г.



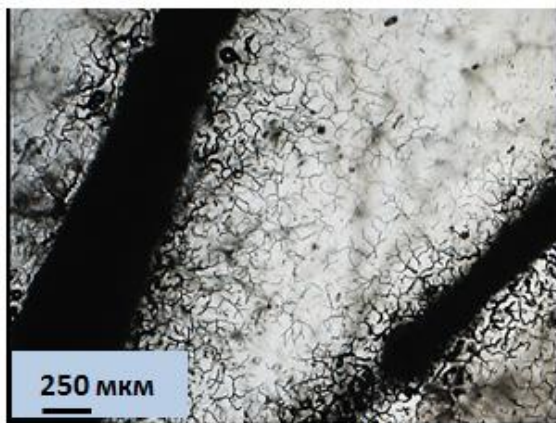
Рисунок 2.12 – Свечение стримерных разрядов, развивающихся в ПММА в зоне торможения СЭП в режиме филаментации и самофокусировки пучка



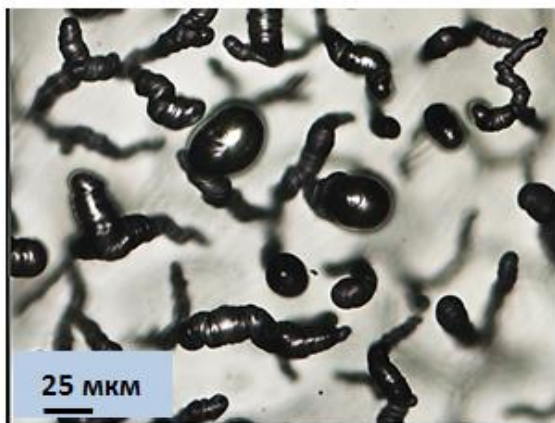
Рисунок 2.13 – Морфология остаточных разрушений в ПММА после облучения импульсом СЭП в режиме самофокусировки пучка

Анализ фотографий свидетельствует о том, что в ПММА также как и в винипрозе в зоне торможения электронного пучка формируются два типа электрических разрядов, отличающихся пространственным распределением по глубине залегания и плотностью распределения по облучаемому объему.

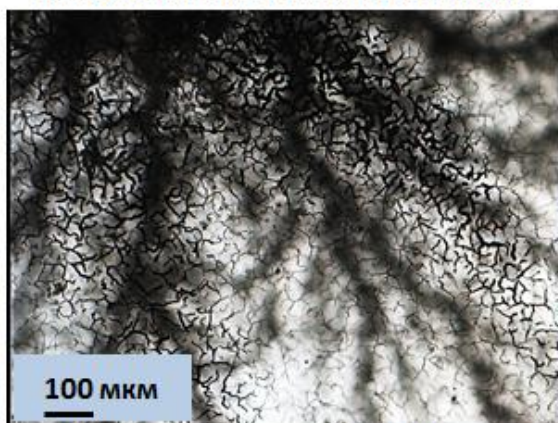
Основное отличие заключается в форме КЭП, образующихся в приповерхностной области ПММА в зоне локализации филамент (рис. 2.14, б).



а) Глубина залегания КЭП 50 мкм



б) Глубина залегания КЭП 50 мкм



в) Глубина залегания КЭП 50 мкм



г) Глубина залегания КЭП 340 мкм

Рисинок 2.14 – Морфология разрушений, образующихся в ПММА при облучении СЭП в режиме его филаментации и самофокусировки в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600

Выводы

Изучена морфология разрушений, образующихся в металлах и полимерах при облучении СЭП в режиме его филаментации и самофокусировки в вакуумном диоде электронного ускорителя, изготовленного на базе ГИН-600 (200 кэВ, 2 кА, 12 нс).

В полимерах обнаружены два типа электрических разрядов, отличающихся размерами, объемной плотностью и глубиной залегания в зоне торможения электронного пучка.

Анализ экспериментальных результатов свидетельствует о том, что в вакуумном диоде электронного ускорителя, работающего в режиме филаментации и самофокусировки, генерируются электронные пучки двух видов, отличающиеся средней энергией электронов и объемной плотностью энерговыделения. В зонах расположения филамент генерируются низкоэнергетические электроны с энергией 50-100 кэВ и объемной плотностью энерговыделения $\omega \sim (10^9 - 10^{10}) \text{ Дж/м}^3$, что на два порядка превышает объемную плотность энерговыделения по сравнению с работой вакуумного диода в обычном режиме ($\sim 10^7 \text{ Дж/м}^3$).

Сделано предположение о том, что филаментированные электронные пучки представляют собой убегаящие электроны, образующиеся в плазме вакуумного диода ускорителя электронов с параметрами (200 кэВ, 2 кА, 12 нс) в процессе его работы.

Задание для раздела

«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ6Б	Нгуен Ван Ву

Институт	ИФВТ	Кафедра	ЛИСТ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	12.04.02 Оптотехника

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

<p>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</p>	<p>1. Стоимость ресурсов НИ (оборудование в составе исследовательского стенда и работа с ним, работа с научными публикациями, анализ экспериментальных данных)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Отчисления во внебюджетные фонды
<p>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</p>	
<p>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</p>	

• Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</p>	<p>1. Определение потенциальных потребителей</p> <p>2. Оценка целесообразности исследования (технология QuaD)</p> <p>3. SWOT-анализ</p>
<p>2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски научно-исследовательских работ (НИР)</p>	<p>1. Определение структуры НИР</p> <p>2. Разработка графика проведения НИР</p> <p>3. Планирование бюджета научно-технического исследования (НТИ)</p>
<p>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой и экономической эффективности</p>	<p>1. Оценка эффективности использования конкурентных решений</p>

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

•

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доц. Отд. соц. - гум. наук	Старикова Е.В.	к. филос. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Нгуен Ван Ву		

3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В настоящее время вопросы коммерциализации, ресурсоэффективности и ресурсосбережения стоят довольно остро, поэтому им необходимо уделять должное внимание при проведении научных исследований.

В ходе работы над данным проектом цель коммерциализации не преследовалась, основной задачей являлось выяснение механизмов разрушения твердых тел под действием высокоэнергетических электронных пучков в режиме филаментации и самофокусировки на базе лаборатории импульсной оптической спектроскопии НИ ТПУ. Направление изучения морфологии разрушения твердых тел имеет узконаправленный характер, потенциальными потребителями результатов исследования являются Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск и ФГУП ФНПЦ «Алтай», г. Бийск.

В данном разделе проведен анализ перспективности исследования, произведено планирование научно-исследовательских работ, а также подсчитан бюджет проекта.

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

3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования




Изучение морфологии разрушений твердых тел при облучении СЭП, представляет интерес не только для исследовательских лабораторий, деятельность которых направлена на выяснение механизмов разрушений. Особый интерес представляют исследования взаимодействия сверхплотных СЭП с конденсированными средами. Увеличить плотность энергии СЭП на поверхности твердых тел можно путем самофокусировки электронного пучка в вакуумном диоде сильноточного ускорителя электронов.

В настоящее время, исследование физико-химических процессов, развивающихся в конденсированных средах при облучении СЭП, представляет интерес для различных научных и прикладных направлений, таких как радиационная физика твердых тел (космическое материаловедение) и разработка электронно-зондовых методов контроля твердых тел различных классов (оптических, электрических и акустических).

Сегментировать рынок услуг по результату исследования можно по следующим критериям: размер компании-заказчика, вид услуга (рис. 3.1).

		Вид услуга			
		Космическое материаловедение	Спектральный элементарный анализ	Контроль твердых тел различных классов	Создание активной среды мощного импульсного лазера
Размер компании	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				

Рисунок 3.1 – Карта сегментирования рынка услуг по результату исследования:

-  – Российская компания «ИСС»;
-  – Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск и ФГУП ФНПЦ «Алтай», г. Бийск;
-  – ООО «Лазеры и оптические системы».

Из рис. 1 видно, что космическое материаловедение является основным сегментом данного рынка. Выбираем контроль твердых тел различных классов как сегмент, на котором намерено ориентироваться предприятие. Создание активной среды мощного импульсного лазера является сегментом рынка, привлекательным для предприятия в будущем.

3.1.2 Технология QuaD

Технология QuaD позволяет оценить целесообразность проведения исследования морфологии разрушений, формируемых в конденсированных средах сильноточным электронным пучком в режиме филаментации и самофокусировки в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600. 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 таб. 3.1.

Таблица 3.1 – 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.

3.1.3 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 таб. 3.2 приведены SWOT-анализа исследования.

Таблица 3.2 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Целесообразность проведения исследования</p> <p>С2. Безопасность технологии</p> <p>С3. Стоимость конечной установки</p> <p>С4. Ремонтопригодность проектируемой установки</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл.1. Узкая направленность исследования</p> <p>Сл.2. Высокое энергопотребление</p> <p>Сл.3. Необходимость вакуумной камеры для исследований</p> <p>Сл.4. Сложности, связанные с точной установкой катод-анодного зазора вакуумного диода ускорителя электронов.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Модификация схемы для изучения других источников излучения</p> <p>В2. Востребованность спектрального анализа с высоким разрешением</p> <p>В3. Метод контроля твердых тел различных классов (оптические, электрические и акустические)</p> <p>В4. Создание активной среды мощного</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>Ремонтопригодность и низкая стоимость позволяют использовать проектируемую установку в других областях (спектральный анализ) с внесением некоторых модификаций в структуру. Также стоит отметить, что данная схема соответствует требованиям радиационной</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>Необходимость вакуумной камеры для исследований вносит дополнительные искажения в конечный результат. Не всегда целесообразна сложная юстировка схемы, что не позволит использовать ее длительное время без контроля параметров. Высокое энергопотребление</p>

импульсного лазера	безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения (импульсные сильноточные ускорители электронов на основе взрывной электронной эмиссии)	может стать еще более значительным для работы с ИИ.
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Недостаточное разрешение системы</p> <p>У2. Снижение интереса к данному направлению исследований</p> <p>У3. Создание новой конкурентной технологии</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта</p> <p>«Сильные стороны и угрозы»:</p> <p>При условии снижения интереса к данному направлению исследования возможность модификации схемы и низкая стоимость позволят использовать схему в других областях спектрометрии. Целесообразность проведения исследования и низкая стоимость позволяют дополнительно изучать альтернативные варианты регистрации и вносить изменения в имеющуюся схему.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта</p> <p>«Слабые стороны и угрозы»:</p> <p>Узкая направленность исследований играет отрицательную роль при условии низкого интереса к данной тематике. При создании новой конкурентной технологии, данная схема с влиянием отсутствия вакуумной камеры на результат и сложной юстировкой потеряет свою востребованность.</p>

Основными сильными сторонами данного проекта являются его небольшая стоимость относительно других вариантов и ремонтпригодность, что приводит к возможности модификации схемы под определенную задачу и возможности применения схемы в других сферах исследования ИИ. Основная слабость проекта – узкая направленность исследований, поэтому при условии снижения интереса к данным технологиям может произойти резкий спад спроса на установку. Угрозу для проекта может представлять низкое разрешение системы в сочетании с влиянием торможения плазмы на воздухе на результат, то есть применимость данной схемы будет ограничена данным параметром.

На данный момент проведение исследования оправдано, так как в данном направлении не существует аналогичных схем регистрации, а лаборатория заинтересована в проведении исследований параметров процессов в вакуумном диоде ускорителя.

Следует отметить, что коммерциализация данного проекта требует дополнительных исследований и более глубоких разработок.

3.2 Планирование научно-исследовательских работ

3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Разработкой схемы регистрации спектрально кинетических параметров разлета продуктов взрыва занимались инженер-дипломник и научный руководитель.

Таблица 3.3 – 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

3.2.2 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 [33]:

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

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 [33].

$$T_{\text{р}i} = \frac{t_{\text{ож}i}}{\text{Ч}_i} \quad (3.2)$$

где $T_{\text{р}i}$ – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

Ч_i – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Таблица 3.4 – 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

3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения диаграммы Ганта необходимо перевести длительность исполнения работы из рабочих дней в календарные согласно следующей формуле [33]:

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

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

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

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется [33]:

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

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

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

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

Таблица 3.5 – 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

На выполнение научно-исследовательского проекта потребуется 90 календарных дней.

Таблица 3.6 – 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 – ■

3.2.4 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. контрагентные расходы;
8. накладные расходы.

3.2.4.1 Материальные расходы

В данной статье учитываются затраты на все материалы, сырье и полуфабрикаты, используемые при разработке проекта. Расчет затрат осуществляется по формуле [33]:

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

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 3.7 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты, руб.
Медь	шт	2	100	200
Алюминий	шт	2	100	200
Винипроз	шт	2	100	200
ПММА	шт	2	150	300
Алюминиевая фольга	шт	1	100	100
Итого с учетом k_T , где k_T – коэффициент, учитывающий затраты на доставку и монтаж, равен 15%.				1150

3.2.4.2 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 3.8 – Затраты на специальное оборудование

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты, руб.
Фотоаппарат Sony DSLRA500	шт	1	30000	30000

Микроскоп МБС-10	шт	1	48000	48000
AvaSpec-2048	шт	1	120000	120000
Насос	шт	1	25000	25000
ГИН-600	шт	1	1000000	1000000
Осциллограф	шт	1	250000	250000
ФЭУ	шт	1	15000	15000
МДР-23	шт	1	130000	130000
Микровизор μ Vizo-101	шт	1	1220000	1220000
Итого с учетом k_T , где k_T – коэффициент, учитывающий затраты на доставку и монтаж, равен 15%.				3263700

3.2.4.3 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 [33]:

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

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (**60 раб. дн.**);

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

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (3.7)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб. (**17500 руб.**);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (**199 раб. дн.**)

Тогда

$$Z_{\text{осн}} = 54\,874,4 \text{ руб}$$

3.2.4.4 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** [33].

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

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

$$Z_{\text{доп}} = 8\,231 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{ЗП}} = 63\,105,6 \text{ руб}$$

3.2.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность размер страховых взносов составляет 27,1 %. Величина отчислений определяется по формуле [33]:

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

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (**0,271**)

$$Z_{\text{внеб}} = 17\,101,6 \text{ руб}$$

3.2.4.6 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 до 2 %.

$$Z_{\text{накл}} = 3\,263\,700 \times 2\% = 65\,274 \text{ руб}$$

3.2.4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 3.9 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма затрат, руб.	Примечание
1. Материальные затраты	1150	Пункт 3.2.4.1
2. Затраты на специальное оборудование	3263700	Пункт 3.2.4.2.
3. Затраты на основную заработную плату	54874,4	Пункт 3.2.4.3
4. Затраты на дополнительную заработную плату	8231	Пункт 3.2.4.4.
5. Затраты на отчисления во внебюджетные фонды	17101,6	Пункт 3.2.4.5
6. Накладные расходы	65247	Пункт 3.2.4.6
7. Бюджет затрат НИИ	3410304	Сумма ст. 1-8

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 продуктов взрывного разложения, то затраты на ее реализацию составляют порядка 150 тыс. руб. В то время как стоимость предоставляемых рынком аналогов схемы начинается от 400 тыс. руб.

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

Для определения эффективности необходимо произвести расчет интегрального показателя эффективности НИ.

• **Интегральный показатель финансовой эффективности**

Таблица 3.10 – Бюджет НТИ для двух исполнений

Наименование статьи	Сумма, руб.		Примечание
	Исп.1	Исп.2	
1. Материальные затраты НТИ	1150	1000	Пункт 3.2.4.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	3263700	3772274	Пункт 3.2.4.2.
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	54874,4	54874,4	Пункт 3.2.4.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	8231	8231	Пункт 3.2.4.4.
5. Отчисления во внебюджетные фонды	17101,6	17101,6	Пункт 3.2.4.5
6. Затраты на научные и производственные командировки	0	0	Пункт 3.2.4.6
7. Контрагентские расходы	0	0	Пункт 3.2.4.7
8. Накладные расходы	65247	66409	Пункт 3.2.4.8
9. Бюджет затрат НТИ	3410304	3919890	Сумма ст. 1-8

Согласно данным, представленным в таблице 9, интегральный финансовый показатель рассматриваемой установки [33]:

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

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 3.11 – 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**

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

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

- **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 продуктов взрыва представлены в таблице 18.

Таблица 3.12 – 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).

3.4 Вывод к разделу

В данном разделе, ответили на вопросы, подлежащие исследованию:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ:

- Определение потенциальных потребителей: создал карту сегментирования и из карты, можно сделать вывод о том, что космическое материаловедение является основным сегментом данного рынка. Выбираем контроль твердых тел различных классов как сегмент, на котором намерено ориентироваться предприятие. Создание активной среды мощного импульсного лазера является сегментом рынка, привлекательном для предприятия в будущем.

- Оценка целесообразности исследования (технология QuaD): Полученное средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки составило **73,7** балла, что говорит о перспективности разработки выше среднего.

- SWOT-анализ: Основными сильными сторонами данного проекта являются его небольшая стоимость относительно других вариантов и ремонтпригодность, что приводит к возможности модификации схемы под определенную задачу и возможности применения схемы в других сферах исследования ИИ. Основная слабость проекта – узкая направленность исследований, поэтому при условии снижения интереса к данным технологиям может произойти резкий спад спроса на установку. Угрозу для проекта может представлять низкое разрешение системы в сочетании с влиянием торможения

плазмы на воздухе на результат, то есть применимость данной схемы будет ограничена данным параметром.

2. Планирование процесса управления НИИ:

- Определение структуры НИР

- Разработка графика проведения НИР

- Планирование бюджета научно-технического исследования (НИИ):

материальные затраты, затраты на специальное оборудование, основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления во внебюджетные фонды, затраты на научные и производственные командировки, контрагентные расходы, накладные расходы.

3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой и экономической эффективности: Проведен расчет интегрального показателя эффективности НИИ.

**Задание для раздела
«Социальная ответственность»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ6Б	Нгуен Ван Ву

Институт	ИФВТ	Кафедра	ЛИСТ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.04.02 Оптотехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Характеристика объекта исследования и области его применения	<p>Объектом исследования являются металлы (медь, алюминий) и полимеры (винипроз, полиэтилен, ПММА).</p> <p>Области применения – изучение сплошной среды; изучение состояния вещества при больших давлениях; создание плотной высокоионизированной плазмы и источников рентгеновского излучения, новые возможности в осуществлении импульсных эксимерных и химических лазеров, исследования по управляемому термоядерному синтезу</p>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</p> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.</p>	<p>Вредные факторы при проведении исследования:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны; – повышение уровней электромагнитных и ионизирующих излучений; – повышение уровней шума; – отклонение показателей микроклимата в помещении; – недостаточная освещенность рабочей зоны <p><i>Действие факторов на организм человека:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – ухудшение и потеря зрения и слуха; – расстройства нервной системы; – снижение иммунитета; – травматизм; – аллергические реакции. <p>Выявление <i>допустимых норм</i>, рассмотрение применяемых <i>средств коллективной и индивидуальной защиты</i></p>
<p>2. Экологическая безопасность</p>	<p><i>Загрязнение атмосферы:</i> шумовое; электромагнитное; химическое.</p> <p><i>Средства защиты от выбросов в атмосферу.</i></p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</p>	<p><i>Возможные ЧС:</i> пожар; взрыв. Приведение <i>порядка действий при возникновении ЧС, профилактические мероприятия.</i></p>

4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Рассмотрение <i>надзора за охраной труда; особенностей работы с вредными и опасными условиями труда; применения спецодежды и СИЗ. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</i>
---	--

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Проф. Отд. контр. и диагн.	Назаренко О.Б.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Нгуен Ван Ву		

4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Данный раздел ВКР посвящен анализу опасных и вредных факторов, проявляющихся в процессе работы с сильнотонным электронным ускорителем (ГИН-600), а также мероприятиям, направленным на уменьшение влияния данных факторов на человека и окружающую среду. В первую очередь опасность представляют сильноточные электронные пучки (СЭП) с высокой плотностью энергии и взрыв, происходящий в области торможения СЭП в вакуумной диоде, а также кратковременное воздействие шума и светового импульса во время взрыва, воздействие электромагнитных полей, неблагоприятный микроклимат и т.д.

Также в рамках данного раздела рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации (ЧС) – пожар, взрыв. Повышенная вероятность возникновения данных ЧС обусловлена спецификой объекта исследования, поэтому необходимо иметь четкие представления о порядке действий в случае возникновения ЧС, а также проводить необходимые мероприятия по предотвращению.

Теоретическая составляющая работы проводится за компьютером, практическая связана с непосредственной регистрацией взрыва с помощью разработанной системы инициирования взрывных процессов, также с изучением морфологии разрушения исследуемых образцов после инициирования электрического пробоя или взрыва с помощью микроскопов МБС-10, μ Vizo-101, расположенных в лаборатории импульсной оптической спектроскопии ТПУ. Следует отметить, что работа с опасным высоковольтным генератором импульсных напряжений выполнялась под контролем руководителя ВКР.

Объект исследования – металлы (медь, алюминий) и полимеры (винипроз, полиэтилен, ПММА).

4.1 Производственная безопасность

4.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

Для обеспечения защиты человека и окружающей среды необходимо определить основные вредные и опасные факторы при инициировании взрывных процессов высокоэнергетическим электронным пучком (табл. 4.1).

Таблица 1 – Основные опасные и вредные факторы, создаваемые лабораторией при проведении исследований

Вид работ	Факторы (ГОСТ 12.0.003-74 [1])		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с физическими процессами, развивающихся в образцах при облучении СЭП	<u>Химические:</u> - повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны	–	ГОСТ 12.1.007–76 [2]
	<u>Физические:</u> - повышение уровней электромагнитных и ионизирующих излучений - повышение уровней шума отклонение показателей микроклимата в помещении - недостаточная освещенность рабочей зоны	<u>Физические:</u> электрический ток	СанПиН 2.2.4.1191-03 [3] ГОСТ 12.1.038-82 [4] СНиП 23-05-95* [5] СанПиН 2.2.4.548–96 [6] ГОСТ 12.1.003-83* [8]

Повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны

СЭП в режиме филаментации и самофокусировки обладает очень высокой энергией. При облучении СЭП в этом режиме образуются на поверхности металлов (медь, алюминий) эрозионные следы. В результате многократного облучения, выделяется в атмосферном воздухе большое количество пылей металлов. Также для полимеров, СЭП не образует эрозионные следы на их поверхности, а СЭП может быть нагревать, плавить и испарять их. И из-за этого также выделяется в воздухе опасные дым и пыль.

Воздействие данных пыли и дыма приводит к отравлению организма человека путем накопления, результатами которого становятся расстройства

ЦНС, головные боли и боли в животе, проявление аллергических реакций. При попадании на слизистые оболочки пыль вызывает раздражение, конъюнктивит.

Согласно ГОСТ 12.1.007–76 [35] выделяют 4 класса вредных веществ. При работе с инициированием взрывных процессов образуются вещества, которые относятся к первой группе «чрезвычайно опасные вещества» и к третьей группе «умеренно опасные вещества» (пыль). В таб. 4.2 приведены основные показатели и их нормы для данных классов вредных веществ.

Таблица 4.2 – Основные нормированные показатели вредных веществ [35]

Наименование показателя	Нормы для класса опасности	
	1-го	3-го
Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Менее 0,1	1,1-10,0
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	Менее 15	151-5000
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	Менее 100	501-2500
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³	Менее 500	5001-50000
Коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО)	Более 300	29-3
Зона острого действия	Менее 6,0	18,1-54,0
Зона хронического действия	Более 10,0	4,9-2,5

Повышение уровней электромагнитных и ионизирующих излучений

В данной работе основной вклад в повышенный уровень электромагнитного излучения вносит СЭП. СЭП представляет колоссальную угрозу, в первую очередь, для зрения человека, так как обладает высокой удельной мощностью. Опасно не только прямое излучение, но и отраженное, и рассеянное. При попадании излучения в глаз человека происходят необратимые повреждения сетчатки, роговицы, хрусталика и т.д. СЭП может стать причиной ожогов кожных покровов человека.

Физические процессы (анодная плазма, катодная плазма, ионный пучок, и т.д.), развивающиеся в вакуумной диоде в момент разряда также являются источником электромагнитных излучений.

Регулярное воздействие электромагнитного излучения может привести к ослаблению половой и иммунной систем, нарушению работы сердечно-сосудистой системы и ЦНС, к возникновению онкологических заболеваний.

Нормирование электромагнитного излучения производится по **СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96** [36].

Повышенный уровень электромагнитных излучений также обусловлен применяемым оборудованием (блок питания ускорителя ГИН-600, ФЭУ, насос). Допустимый уровень напряженности электрической составляющей ($E_{пду}$) составляет **200 В/м**, напряженность магнитной составляющей ($H_{пду}$) – **20 А/м** согласно **СанПиН 2.2.4.1191-03** [36].

Повышение уровней шума

Источником шума во время проведения исследования является, в первую очередь, сам взрыв поверхности анода, а также постоянный шум, который создает при работе вакуумного насоса, и система охлаждения приборов.

Повышение уровня шума в помещении может привести к головным болям, снижению иммунитета, ухудшению работы ЦНС, утомляемости, при регулярном воздействии к частичной или полной глухоте.

Нормирование воздействия на человека повышенного уровня шума производится согласно **ГОСТ 12.1.003-83** [41]. Так как воздействие повышенного уровня шума кратковременное и при работе используются необходимые СИЗ, то средний уровень звукового давления близок к значениям, приведенным в таб. 4.3.

Таблица 4.3 – Допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука [41]

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	

Помещение лаборатории для проведения экспериментальных работ	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75
--	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Недостаточная освещенность рабочей поверхности приводит к преждевременному утомлению зрительного аппарата, ослабляет внимание.

Параметры и нормы освещения помещений приведены в СНиП 23-05-95* [38]. В научно-технической лаборатории при выполнении работ категории высокой зрительной концентрации (Ш 0,3 – 0,5 мм) величина коэффициента естественной освещенности (КЕО) должна быть не ниже 1,0%, что невозможно обеспечить в условиях рассматриваемой лаборатории, так как помещение находится на цокольном этаже и имеющиеся окна не вносят требуемого уровня освещенности. Но для выполнения экспериментов, связанных с использованием СЭП это позволяет создать полное затемнение.

Общая освещенность должна составлять не менее 300 лк [38], что чрезвычайно важно при работе с СЭП, так как в хорошо освещенной комнате зрачок сужен, и возможность повредить его СЭП становится меньше, чем в темном помещении.

Отклонение показателей микроклимата в помещении

Сильноточная электронная установка является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении.

Работа в лаборатории относится к лёгкой по степени тяжести (1б), так как регистрация спектрально-кинетических облучаемых образцов производится в положении сидя, а настройка и подготовка системы инициирования процесса взрывной электронной эмиссии связаны с ходьбой и производится преимущественно стоя. Оптимальные параметры микроклимата, создающие комфортные условия для данной работы представлены в таб. 4.4. Нормы зависят от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения и нормируются СанПиН 2.2.4.548–96 [39].

Таблица 4.4 – Оптимальные значения показателей микроклимата в рабочей зоне производственных помещений [39]

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура воздуха, С ⁰	Температура поверхностей, С ⁰	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/сек
Холодный	1б	21-23	20-24	60-40	0,1
Теплый	1б	22-24	21-25	60-40	0,1

Электрический ток

При работе с сильноточным электронным ускорителем ГИН-600 опасность представляет повышенное значение напряжения тока в цепи, который может пройти через тело человека. Результатом замыкания через тело человека могут стать термические ожоги, электролитическое разложение крови, нарушение внутренних биологических процессов.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82 [37] ПДУ для переменного тока с частотой 50 Гц составляет **напряжение 2 В и сила тока 0,3 мА.**

Согласно классификации помещений по опасности поражения электрическим током лаборатория относится к помещениям *без повышенной опасности* (ГОСТ 12.1.019-2009 [40]). Влажность в помещении не превышает 50%, температура поддерживается на отметке 20⁰, поле не проводит электрический ток.

4.1.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от опасных и вредных факторов

Для безопасной работы по исследованию морфологии разрушения твердых тел, инициированной СЭП в режиме филаментации и самофокусировки необходимо проводить ряд мероприятий и действий, позволяющих минимизировать вредное воздействие факторов на организм человека.

Для защиты от воздействия СЭП и продуктов взрывной электронной эмиссии используют перчатки, очки, защитный экран из свинца.

Средства защиты от СЭП подразделяются на коллективные и индивидуальные [40]. К средствам индивидуальной защиты от СЭП относят

средства защиты глаз и лица: защитные очки, щитки; средства защиты рук (перчатки); специальную одежду (халаты с плотными манжетами). Также важно убирать волосы во избежание попадания их в оптический тракт электронного пучка. В качестве коллективных средств защиты устанавливают специальные *защитные экраны*, поглощающие рабочий диапазон длин волн свечения образца, окружают установку *матыми поверхностями*.

Для защиты от воздействия повышенного уровня шума при проведении экспериментов с взрывами необходимо использование средств индивидуальной защиты (*наушники*). Возможна установка *звукопоглощающих экранов, щитов* [41].

Основными мероприятиями, направленными на поддержание благоприятного микроклимата на рабочем месте исследователя, являются *регулярные проветривания*, использование *системы кондиционирования воздуха*, поддерживающей оптимальные параметры микроклимата.

Что касается недостаточной освещенности, то при настройке и юстировке системы инициирования используется *дополнительное верхнее освещение установки* [42], которое отключается на время проведения эксперимента. В качестве искусственных источников света используются люминесцентные лампы.

Основным мероприятием по защите от воздействия электромагнитного излучения является *режим труда и отдыха* (после часа работы перерыв 10 минут), применение *экранирования частей оборудования* (каучуковые поглощающие поверхности) [36].

Технические средства защиты от поражения электрическим током – *изоляция токоведущих проводов, зануление и заземление* для устранения зарядов статического электричества (сопротивление 4 Ом), *автоматическое отключение питания* [42]. Что касается организационных средств, то для защиты от электрического тока проводятся *регулярные инструктажи*, в лаборатории располагаются *предупредительные плакаты*, при работе

используются *диэлектрические перчатки и инструменты с изолирующими рукоятками*.

4.2 Экологическая безопасность

4.2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Объектами данного исследования являются металлы (медь, алюминий) и полимеры (винипроз и ПММА). Форма объектов представляет собой тонкие пленки в твердом состоянии. В нормальном условии эти пластины с не вредят окружающей среде. В данной работе используются незначительные по массе образцы также позволяет минимизировать вредное воздействие на окружающую среду.

Основным источником загрязнения окружающей среды является химические и физические процессы, развивающиеся в вакуумном диоде в момент электрического пробоя и взрывной электронной эмиссии, что негативно сказывается на атмосфере, литосфере и гидросфере.

4.2.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Очевидно, что в процессе исследования, химические и физические процессы, развивающиеся в вакуумном диоде в момент электрического пробоя и взрывной электронной эмиссии, образуют пыль и аэрозоли, негативно сказывающиеся на атмосфере, литосфере и гидросфере. Предельно допустимые концентрации данных продуктов в атмосфере населенного пункта приведены в таблице 6, согласно *ГН 2.1.6.1338 – 03* [44]. Продукты взрыва необходимо удалять из зоны инициирования при помощи вытяжной вентиляции с адсорбционными фильтрами, позволяющими снизить негативное влияние на атмосферу.

Таблица 4.5 – ПДК вредных веществ в атмосфере [36]

Наименование вещества	Формула	Величина ПДК (мг/м ³)		Класс опасности
		Максимальная разовая	Среднесуточная	
Азота диоксид	NO ₂	0,085	0,04	2
Азота оксид	NO	0,4	0,06	3
Диалюминий триоксид	Al ₂ O ₃	-	0,01	2
Гидрохлорид	СН	0,2	0,1	2
Свинец и его неорганические соединения	-	0,001	0,0003	1

Используемые при проведении экспериментов технологии не приводят к загрязнению гидросферы, так как водные ресурсы не используются ни для охлаждения оборудования, ни для утилизации отходов.

Что касается загрязнения почвы, то его избежать позволяет правильная утилизация используемых для освещения помещения лаборатории люминесцентных ламп, которые относятся к отходу первого класса опасности (ГОСТ Р 53691-2009).

4.2.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

В настоящее время защите окружающей среды уделяется большое внимание, так как именно от качества реализации защитных мероприятий зависит качество жизни и здоровье людей.

В рамках исследования разрушения металлах и полимерах при иницировании СЭП принимаются следующие защитные меры.

- Объекты исследования хранятся в заводской упаковке. Утилизация происходит на специализированном полигоне, где происходит минимизация отрицательного воздействия на почву путем фильтрации и абсорбирования опасных веществ.
- Продукты взрывного разложения нейтрализуются при помощи системы вытяжной вентиляции с абсорбирующими фильтрами.
- Вышедшие из строя люминесцентные лампы передаются в специализированный пункт, где согласно ГОСТ 52105-2003 [46] происходит утилизация ртутьсодержащих отходов.

4.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

4.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

Наиболее вероятными ЧС при работе с СЭП являются пожар и взрыв.

Основной причиной возникновения пожара может стать несоблюдение техники безопасности при работе с СЭП и условий их хранения.

Так как в лаборатории расположен запас взрывного вещества для исследований, то распространение пожара может привести к развитию взрывного процесса, инициированного высокой температурой окружающей среды.

При проведении экспериментов также наиболее вероятными ЧС являются пожар и взрыв. Причиной возникновения пожара может стать уже не только СЭП высокой мощности, но и взрывные вещества, несоблюдение правил работы с высоковольтными установками. Кроме этого опасность возникновения пожара представляют повреждения изолирующих покрытий, попадание влаги, перегрев оборудования.

По пожарной и взрывопожарной опасности помещения лаборатория относится к категории пожароопасность (В1-В4), так как в лаборатории присутствуют твердые горючие вещества [47]. К твердым горючим веществам относятся деревянные элементы мебели (письменные рабочие столы, шкафы), деревянные межкомнатные двери, канцелярские принадлежности (бумага, книги).

Основные опасные факторы при пожаре:

- Воздействие токсичных продуктов горения (угарный газ, продукты горения синтетических материалов);
- Пониженная концентрация кислорода в зоне пожара;
- Высокая температура окружающей среды;
- Открытый огонь;
- Обрушения строительных конструкций.

4.3.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий в случае возникновения ЧС

Для предотвращения возможного возгорания и взрыва во время проведения исследований применяются следующие превентивные меры:

- Организационные: регулярное проведение инструктажей по электро- и пожаробезопасности.
- Технические: правильное размещение оборудования; применение в конструкции быстродействующих средств защитного отключения электроустановок; расположение образца ВВ за защитным экраном, ограничение массы и объема ВВ, используемого в качестве образца; изолирование ВВ от возможных источников инициирования и поддержание температурного режима (кейс, холодильная камера).
- Режимные: запрещение курения в лаборатории.
- Эксплуатационные: регулярные осмотры оборудования, своевременный ремонт и профилактика.

При появлении запаха гари, обнаружении неисправностей оборудования необходимо отключить питание установки и сообщить о произошедшем руководителю проекта.

При непосредственном возгорании следует придерживаться следующего порядка действий:

1. Обесточить установку и лабораторию
2. Принять первые меры по тушению пожара при помощи огнетушителя (углекислотные огнетушители)
3. Вызвать бригаду пожарной охраны, сообщить руководителю
4. При неизбежности взрыва быстро лечь на пол и прикрыть голову руками
5. Если нейтрализовать очаг возгорания своими силами не удалось, то необходимо эвакуировать сотрудников согласно плану эвакуации (рис. 3.1), сохраняя стандартный порядок эвакуации
6. Во время эвакуации обязательно использование средств защиты органов дыхания: ватно-марлевые повязки, смоченный водой текстильный материал.

7. При невозможности эвакуации всеми способами следует привлечь внимание людей.



Рисунок 4.1. – План эвакуации из лаборатории 036, 10 корпус НИ ТПУ

4.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

4.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Основываясь на Конституции РФ трудовая деятельность регулируется непосредственно Трудовым Кодексом (ТК) [48].

Работа связанная с исследованием разрушения твердых тел предусматривает использование специальной одежды, обуви и средств индивидуальной защиты (СИЗ) [49]. Типовые нормы разработаны согласно специальной оценке условий труда [50], а СИЗ предусмотрены Техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности средств индивидуальной защиты».

СИЗ для лаборанта по физико-механическим испытаниям:

- Халат для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий (1 шт.)
- Фартук из полимерных материалов с нагрудником (2 шт.)
- Перчатки с полимерным покрытием (12 пар)
- Очки защитные (до износа)
- Средство индивидуальной защиты органов дыхания фильтрующее (до износа)

4.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочее место, его оборудование и оснащение, применяемые в соответствии с характером работы, должны обеспечивать безопасность, охрану здоровья и работоспособность человека.

При планировке рабочего места необходимо учитывать возможность выполнения рациональных движений, экономичное использование производственных площадей, безопасное расположение человека относительно установки, эргономические параметры и т.п.

Для работы с импульсным сильноточным ускорителем электронов на базе генератора импульсных напряжений ГИН-600 используются следующие параметры рабочего места:

- Высота рабочей поверхности для работы в положении «стоя» 1050 мм;
- Радиус рабочей зоны 1000 мм;
- Место непосредственного взрывного разложения ограничено защитным экраном, расстояние от экрана до человека в момент инициирования взрыва составляет более 1000 мм;
- На рабочей поверхности не должно находиться посторонних предметов, возможных источников огня, горючих и других взрывчатых веществ.
- Освещение рабочей поверхности осуществляется люминесцентными лампами.
- Поверхность пола ровная, нескользкая, около лазерной установки размещены резиновые защитные коврики.

Работа с ВВ и лазерным излучением высокой мощности должна проводиться под контролем руководителя, так как к данным типам работы допускаются сотрудники, имеющие IV группу по электробезопасности и прошедшие инструктаж по работе с взрывчатыми веществами.

Рабочий процесс должен предусматривать технологические перерывы: обеденный перерыв продолжительностью 1 час, перерывы на отдых продолжительностью 10 мин каждый час, так как взрывы хоть и небольшой мощности оказывают угнетающее воздействие на организм человека в целом.

Так как осуществляется кондиционирование воздуха, перерывы на проветривание помещений не предусмотрено.

Комната психологической разгрузки не предусмотрена, но рекомендуема, так как за продолжительное время работы с взрывными процессами, лазерным излучением накапливается стресс, который отрицательно сказывается на работоспособности и состоянии здоровья человека.

На рабочем месте должны присутствовать предупреждающие об опасности знаки (рис. 4.2) .



Рисунок 4.2 – Предупреждающие знаки опасности [52]:
слева – «Взрывоопасно», справа – «Опасно. Лазерное излучение»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучена морфология разрушений, образующихся в металлах и полимерах при облучении СЭП в режиме его филаментации и самофокусировки в вакуумном диоде электронного ускорителя, изготовленного на базе ГИН-600.

В полимерах обнаружены два типа электрических разрядов, образующихся в зоне торможения электронного пучка и отличающихся размерами, объемной плотностью и глубиной залегания.

Анализ экспериментальных результатов свидетельствует о том, что в вакуумном диоде электронного ускорителя (200 кэВ, 2 кА, 12 нс), работающего в режиме филаментации и самофокусировки генерируются электронные пучки двух видов, отличающиеся энергией электронов и плотностью энергии. В зонах расположения филамент генерируются низкоэнергетические электроны с энергией 50-100 кэВ и объемной плотностью энерговыведения $10^9 - 10^{10}$ Дж/м³. Одновременно формируются высокоэнергетические электроны, однородно распределенные в зоне торможения с объемной плотностью, характерной для работы вакуумного диода в обычном режиме.

Сделано предположение о том, что филаментированные электронные пучки представляют собой убегаящие электроны, образующиеся в вакуумном диоде ускорителя (200 кэВ, 2 кА, 12 нс) в процессе его работы.

2. Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Определены потенциальные потребители научного исследования.

3. В разделе социальная ответственность рассмотрены вопросы производственной безопасности, проведен анализ и выявлены вредные факторы при разработке и эксплуатации проектируемого решения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Нгуен В.В. Исследование деградации композитных люминофоров при облучении электронным пучком // Сборник трудов, Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ – 2016), V Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 5 – 7 декабря 2016 г. – с. 299 – 230.

2. Нгуен В.В., Олешко В.И. Морфология разрушений твердых тел при облучении сильноточным электронным пучком в режиме филаментации и самофокусировки // Сборник тезисов, материалы Двадцать четвертой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-24, Томск) – 2018. – с. 189 –190.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудаков Л.И., Бабыкин М.В., Гордеев А.В. Генерация и фокусировка сильноточных РЭП // Энергоатомиздат. - 1990. - 280 с.
2. Бацанов С.С., Демидов Б.А., Рудаков Л.И. Использование сильноточных РЭП для осуществления структурных и химических превращений // Письма в ЖЭТФ - 1979. - Т. 30. - вып. 9. - с. 611-613.
3. Олешко В.И. Пороговые процессы в твердых телах при взаимодействии с сильноточными электронными пучками // диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н. : спец. 01.04.07 / ТПУ; науч. конс. В. М. Лисицын - 2009. - 317 с.
4. Лисицын В.М., Олешко В.И. Электрический пробой ЩГК при импульсном облучении сильноточными электронными пучками // Письма в ЖТФ. - 1983. - Т.9. - № 1. - С. 15-18.
5. Лисицын В.М., Олешко В.И. Электрический пробой ЩГК при импульсном облучении сильноточными электронными пучками // Тез. докл. 3-Всесоюзного совещания "Воздействие ионизирующего излучения и света на гетерогенные системы", Кемерово - 1982. - Ч.2. - С. 227-228.
6. Лисицын В.М., Олешко В.И., Штанько В.Ф. Кумуляция энергии в сильноточных электронных пучках в твердом диэлектрике // ЖТФ. - 1985. - Т.55. - вып. 9. - С. 1881-1884.
7. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. Импульсная катодолюминесценция азидов тяжелых металлов // Письма в ЖТФ. - 2002. - Т. 28. - вып. 24. - С. 48-52.
8. Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П.. Электрический пробой и взрывное разложение монокристаллов ТЭНа при облучении электронным пучком // Письма в ЖТФ. - 2012. - Т. 38 - вып. 9. - С. 37-43.
9. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. Инициирование детонации ТЭНа мощным электронным пучком // Письма ЖТФ. - 2003. - Т. 29. - вып. 16. - С. 23-28.

10. Таржанов В.И., Зинченко А.Д., Сдобнов В.И. и др. // Лазерное инициирование ТЭНа // Физика горения и взрыва. - 1996. - Т. 32. - вып. 4. - С. 113-119.
11. Олешко В.И., Горина С.Г. Морфология разрушений в гетероструктурах InGaN/GaN под действием сильнофокусированного электронного пучка // Письма в ЖТФ. - 2015. - Т. 41. - вып. 15. - С. 75-82.
12. Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. О природе свечения, возникающего при облучении ТЭНа электронным пучком // Физика Горения и Взрыва. - 2007. - Т.43. - вып. 5. - С. 87-89.
13. Олешко В.И., Damamme G., Malys D., Лисицын В.М. Инициирование взрывного разложения азидов тяжелых металлов электрическим разрядом, индуцированным электронным пучком // Письма в ЖТФ. - 2009. - Т.35 - вып. 20. - С. 55-61.
14. Олешко В.И., Штанько В.Ф. Механизм разрушения высокоомных материалов под действием мощных электронных пучков наносекундной длительности // ФТТ. - 1987. - Т. 29. - вып. 2. - С. 320-324.
15. Олешко В.И., Штанько В.Ф. Генерация сильных электрических полей в области пробега мощного электронного пучка в LiF // ЖТФ. - 1986. - Т. 56. - вып. 6. - С. 1235-1236.
16. Олешко В.И., Штанько В.Ф. Спектрально-временные параметры свечения электрических разрядов в ионных кристаллах при воздействии СЭП // ЖТФ. - 1987. - Т. 57. - вып. 9. - С. 1816-1818.
17. Лисицын В.М., Олешко В.И., Штанько В.Ф. Образование периодической структуры разрушений в NaCl под действием мощного пучка наносекундной длительности // Письма в ЖТФ. - 1985. - Т. 11. - вып. 24. - С. 1478-1481.
18. Вайсбурд Д.И., Балычев И.Н. Разрушение твердых тел в результате сверхплотного возбуждения их электронной подсистемы // Письма в ЖЭТФ. - 1972. - Т. 15. - вып. 9. - С. 537-540.

19. Тарумов Э.Э. Получение и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков в диодах // Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков / под ред. Л.И. Рудакова. М. - 1990. - С. 122-181.
20. Брейзман Б.Р., Рютов Д.Д. К теории фокусировки релятивистского электронного пучка в диоде // ДАН СССР. - 1975. - Т. 225 - вып. 6. - С. 1308-1311.
21. Королев В.Д. Ликсонов В.Д., Лукин А.А. и др. Исследование формирования и динамики плазмы в сильноточном диоде // Письма в ЖТФ. - 1984. - Т. 10 - вып. 1. - С. 8-12.
22. Ликсонов В.Д., Сидоров Ю.Л., Смирнов В.П. Генерация и фокусировка сильноточного электронного пучка в низкоимпедансном диоде // Письма в ЖЭТФ. - 1974. - Т.19 - вып. 8. - С. 516-520.
23. Бабыкин В.М., Рудаков Л.И., Скорюпин В.А. и др. Инерционный термоядерный синтез на основе сильноточных генераторов РЭП // Физика плазмы. - 1982. - Т. 8 - вып. 5. - С. 901-914.
24. Creedon J.M. Relativistic Brillouin flow in the high v/γ diodes // J. Appl. Phys. - 1975. - Vol. 46. - P. 2946-2955.
25. DiCapua M., Creedon J., Huff R. Experimental investigation of high-current relativistic electron flow in diodes // J. Appl. Phys. - 1976. - Vol. 47. - P. 1887-1896.
26. Blaugrund A.E., Cooperstein G., Goldstein S.A. Processes governing pinch formation in diodes // Proc. 1-st Intern. Topic. Conf. High Power Electron Beam Res. and Techn., Albuquerque - 1975. - Vol. 1. - P. 233-246.
27. Чистяков С.А., Халиков С.В., Яловец А.П. Исследование формирования упругопластических волн в металлической мишени при воздействии потоков заряженных частиц // ЖТФ. - 1993. - Т. 63. - вып. 1. - С. 31-40.
28. Демидов Б.А. Получение высоких давлений и метастабильных состояний в конденсированных средах на основе использования сильноточного

релятивистского электронного пучка // Физика плазмы - 2003. - Т. 29. - вып. 7. - С. 670-678.

29. Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Курило А.А. Экспериментальное определение откольной прочности полимерных материалов // Вопросы атомной науки и техники - Сер. Термоядерный синтез. - 2017. - Т. 40. - вып. 2. - С. 73-77.

30. Канель Г.И. Сопротивление металлов откольному разрушению // ПМТФ. - 2001. - Т. 42 - вып. 2. - С. 194-198.

31. Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Семин Б.Н. Сильноточный наносекундный ускоритель для исследования быстропротекающих процессов // Приборы и Техника Эксперимента. - 1981. - Т. 4. - С. 15-22.

32. Шерешевский А.И., Унанянц Т.П., Бахаровский Г.Я. Химические товары // Справочник - Государственное научно-техническое издательство химической литературы - Москва, 1959. - Т. 1. - 646 с.

33. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: учебное пособие. - М.: Высшая школа, 2006. - 399 с.

34. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

35. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

36. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях.

37. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

38. СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение.

39. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

40. ГОСТ 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

41. ГОСТ 12.1.003-83*. Шум. Общие требования безопасности.

42. ГОСТ 12.4.011 - 89. ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
43. ГОСТ 12.4.115 - 82. Средства индивидуальной защиты работающих. Общие требования к маркировке.
44. ГН 2.1.6.1338 - 03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.
45. ГОСТ Р 53691-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Паспорт отхода I-IV класса опасности. Основные требования.
46. ГОСТ 52105-2003. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация и методы переработки ртутьсодержащих отходов. Основные положения.
47. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
48. Трудовой кодекс Российской Федерации (с изменениями на 3 июля 2016 года) (редакция, действующая с 1 января 2017 года)
49. Приказ Минтруда России №997н от 9 декабря 2014 г.
50. Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда».
51. ГОСТ 12.4.026-2001 «ССБТ. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний»
52. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Приложение А

Раздел №2

THE EXPERIMENTAL METHOD AND EXPERIMENTAL RESULTS

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Нгуен Ван Ву		

Руководитель ВКР

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

Консультант – лингвист отделение иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доц. Отд. иностраннных языков	Парнюгин Александр Сергеевич	К. пед.н.		

Table of Contents

Introduction	101
A.2 The investigated samples and experimental method	103
A.2.1 The investigated samples	103
A.2.2 The experimental method.....	104
A.2.3 Experimental results and their discussion.....	107
A.2.3.1 Spatial distribution of luminescence and destruction in the zone of deceleration of the electron beam in PMMA upon irradiation with a low-density HCEB	107
A.2.3.2 Filamentation and self-focusing of a HCEB in experiments at the accelerator GIN-600.....	111
A.2.3.2.1 Morphology of the fractures formed by a filamented and self-focused HCEB in metals	111
A.2.3.2.2 Morphology of the fractures formed by a filamented and self-focused HCEB in polymers.....	114
Conclusion.....	120
List of literature.....	121

Introduction

The study of the physical processes responsible for the self-focusing of high-current relativistic electron beams (REBs) in vacuum diodes of high-current electron accelerators was stimulated by the development of the technique of ultrahigh pulse energy sources, the appearance of new problems and applications of REBs. Thus, the appearance of generators of REBs with a duration of less than 1 μ s has opened up new possibilities in the implementation of pulsed excimer and chemical lasers. In turn, studies on controlled thermonuclear fusion have determined remarkable progress in the 1970s and 1980s in the technique of generating superhigh powers and high-current REBs.

In the last decade, the study of physicochemical processes developing in condensed media under irradiation with high-current electron beam (HCEB) is of interest for various scientific and applied fields:

- space materials science (studies of radiation-resistant materials);
- development of electron-probe methods for monitoring solid bodies of various classes (optical, electrical, acoustic);
- physics of explosion (electron beam initiation of energy materials);
- electron-beam technologies (modification of the surface of solids).

Among the numerous processes developing in solids of various classes, the least studied are the nonlinear processes initiated in condensed media by a self-focused HCEB of ultrahigh density. Investigations in this direction made it possible to initiate detonation of the explosive for the first time, as well as to realize methods of atomic-spectral analysis of materials with the evaporation of the sample of a high-current electron beam. Nevertheless, the physical processes responsible for the phenomenon of filamentation and self-focusing of a HCEB in vacuum diodes, whose current does not exceed 3 kA, have not been studied in practice. There is no information about the parameters of self-focused HCEB: the average electron energy and the bulk energy density in the self-focusing spot. In this connection, tasks were set, the solution of which would allow answering the questions posed above.

The purpose of this thesis is to study the morphology of the destruction of solids when irradiated by a HCEB in the filamentation and self-focusing mode. Based on the results of the studies, we estimate the parameters of elementary electron beams (the volume density of energy release and the average electron energy).

To achieve this goal, the following tasks were accomplished:

1. To study the process of filamentation and self-focusing of a HCEB with the help of autographs formed on the surface of metals and determine the geometric parameters of the vacuum diode of the accelerator GIN-600 (diameter and shape of the explosive-emission cathode, the value of the interelectrode gap d_{ka}) at which the self-focusing mode of a HCEB is realized.

2. Identify the distinctive features of the morphology of the destruction of polymers upon their irradiation in the normal operating mode of a vacuum diode and in the filamentation and self-focusing mode.

A.2 The investigated samples and experimental method

A.2.1 The investigated samples

Metals (copper, aluminum) and polymers (Viniproz, Polymethyl methacrylate (PMMA)) were used as the samples for the studies. The investigated samples are thin plates ($20 \times 20 \times L$) mm (tab. A.1).

Table A.1 – The investigated samples

No	Samples	Thickness L [μm]	Mass density ρ [g/cm^3]	No	Samples	Thickness L [μm]	Mass density ρ [g/cm^3]
1	Copper	180	8,96	3	Viniproz	380	1,4
2	Aluminum	110	2,7	4	PMMA	3 MM	1,19

Viniproz is a plastic material obtained by heat treatment of unplasticized copolymer of chlorovinyl with methyl methacrylate with the addition of a stabilizer (aluminum stearate).

This material is applied to make copies from the plasmas. Issued in the form of sheets with a length of not less than 1300 mm, a width of at least 550 mm, a thickness ($0.25 \div 0.45$) mm. The surface of the sheets is even. The material is flexible, colorless, with a uniform yellowish tinge. Specific gravity ($1.35 \div 1.4$) g/cm^3 . The tensile strength is not less than $50 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Relative elongation at break not more than 12%. The hardness of the pendulum device is not less than 0.7. Water absorption is not more than 1%. Transparency according to the MIAM methodology is not less than 75%. Frost resistance is not higher than $30 \text{ }^\circ\text{C}$ [2].

Polymethyl methacrylate (PMMA) is a hard amorphous material with high transparency, weather resistance, good physical-mechanical and electrical insulating properties. It has a high frost resistance (up to $-60 \text{ }^\circ\text{C}$) and a relatively high heat resistance. PMMA is readily soluble in carboxylic acids, esters (own monomer, ketones, chlorinated and aromatic hydrocarbons) and poorly soluble in aliphatic hydrocarbons and lower alcohols. Under normal conditions, polymethylmethacrylate is resistant to acids, alkalis, light and oxygen, oil and water. When heated above $110 \text{ }^\circ\text{C}$, polymethylmethacrylate softens, becomes highly elastic and easily molded. It is well combined with most plasticizers.

A.2.2 The experimental method

The source of the formation of a HCEB is the electron accelerator GIN-600 based on the impulse voltage generator constructed according to the Arkadev-Marx scheme (GIN). Generation of the electron beam occurs as a result of explosive emission when a high voltage impulse is applied to the cathode.

As a cathode a stainless steel tube of radius $R = 3$ mm is used. The anode is a thin metal plate (copper, aluminum). A thin (~ 10 μm) aluminum foil was applied to one of the surfaces of the polymer samples, after which they were placed on the anode of a vacuum diode having an aperture for irradiation. The distance between the cathode and the anode is varied within the limits ($3 \div 5$) mm. The parameters of the electron beam: the average electron energy is $E_{sr} = 0.2$ MeV, the current is $I = 2$ kA, the impulse duration is $\tau = 12$ ns. The energy density of a HCEB was regulated in the range ($0.05 \div 50$) J/cm^2 . Measurement of the energy of a HCEB was carried out by calorimetric and radiation-chemical methods.

Two irradiation modes of the samples were used.

- The irradiation mode with a HCEB of low and medium density ($0.05 \div 2$) J/cm^2 .

In this mode, irradiation was carried out at a temperature of 300 K in atmospheric air when a HCEB was emitted through an aluminum foil of thickness (20-30) μm .

Two methods for recording the emission spectra of electric discharges induced by HCEB in dielectrics were used (fig. A.2.1).

The integrated luminescence spectra were measured using an AvaSpec-2048 fiber optic spectrometer ("spectrum per impulse" measurement mode).

Time-resolved luminescence spectra were measured using a pulsed spectrometer based on the diffractive monochromator MDR-23, FEU-84 and the Tektronix DPO 3034 oscilloscope ("spectrum at points" measurement mode).

Registration of the spatial distribution of the glow of the electric breakdown channels (EBC) in the electron beam deceleration zone was carried out using a SONY DSLR-A500 digital SLR camera in the "Bulb" mode for one excitation pulse through the MBS-10 microscope. The morphology of residual fractures formed after

irradiation with HCEB was studied by optical microscopy using a μ Vizo-101 microscope with a spatial resolution of 1 μm .

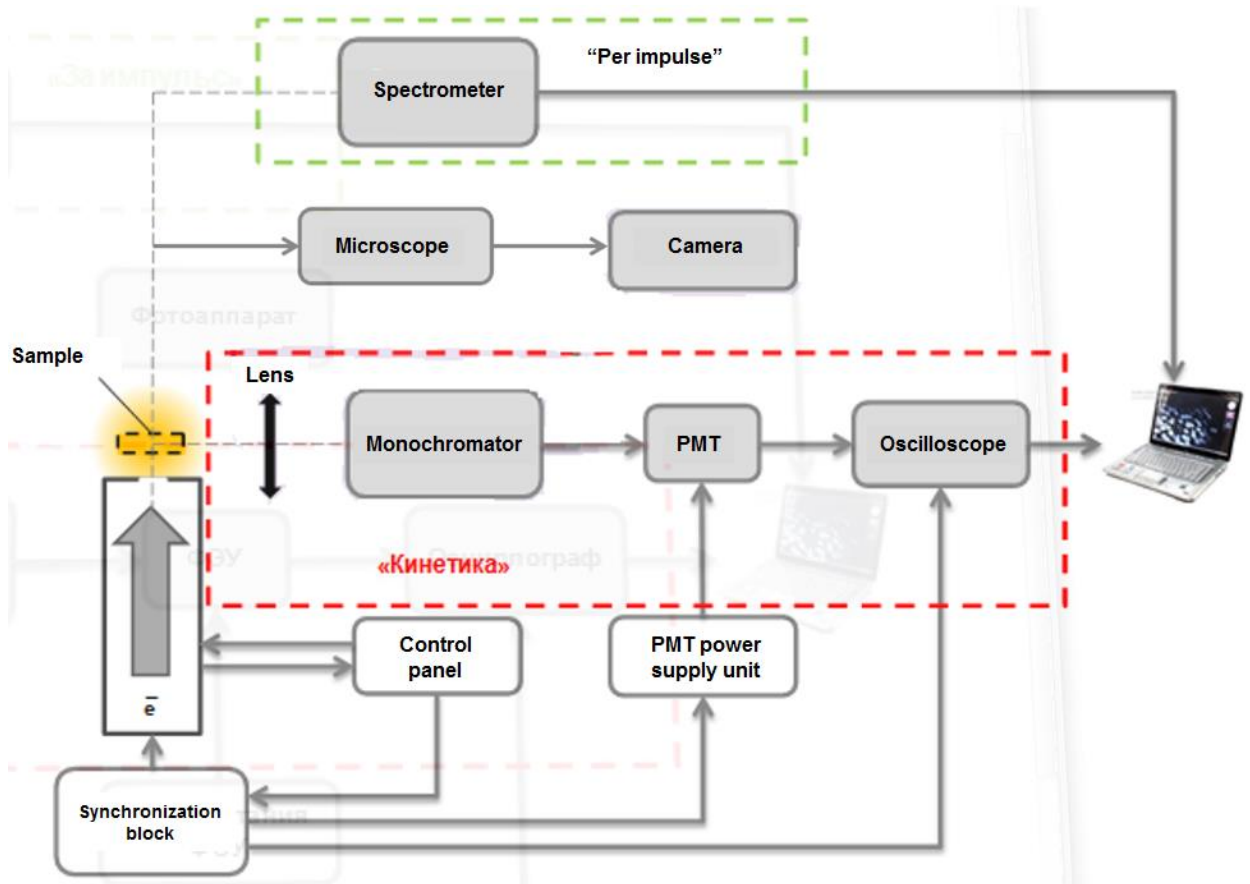


Figure A.2.1 – Block diagram of the experimental setup

- Irradiation of samples with an electron beam of high density ($H > 2 \text{ J/cm}^2$) was carried out in a vacuum chamber combined with a vacuum diode in the filamentation and self-focusing mode of a HCEB. The pressure in the vacuum diode was $P \sim 10^{-2}$ mm Hg, the aspect ratio $R/d_{ka} = (0.6 \div 1)$, the energy density of a HCEB: $H = (2 \div 50) \text{ J/cm}^2$.

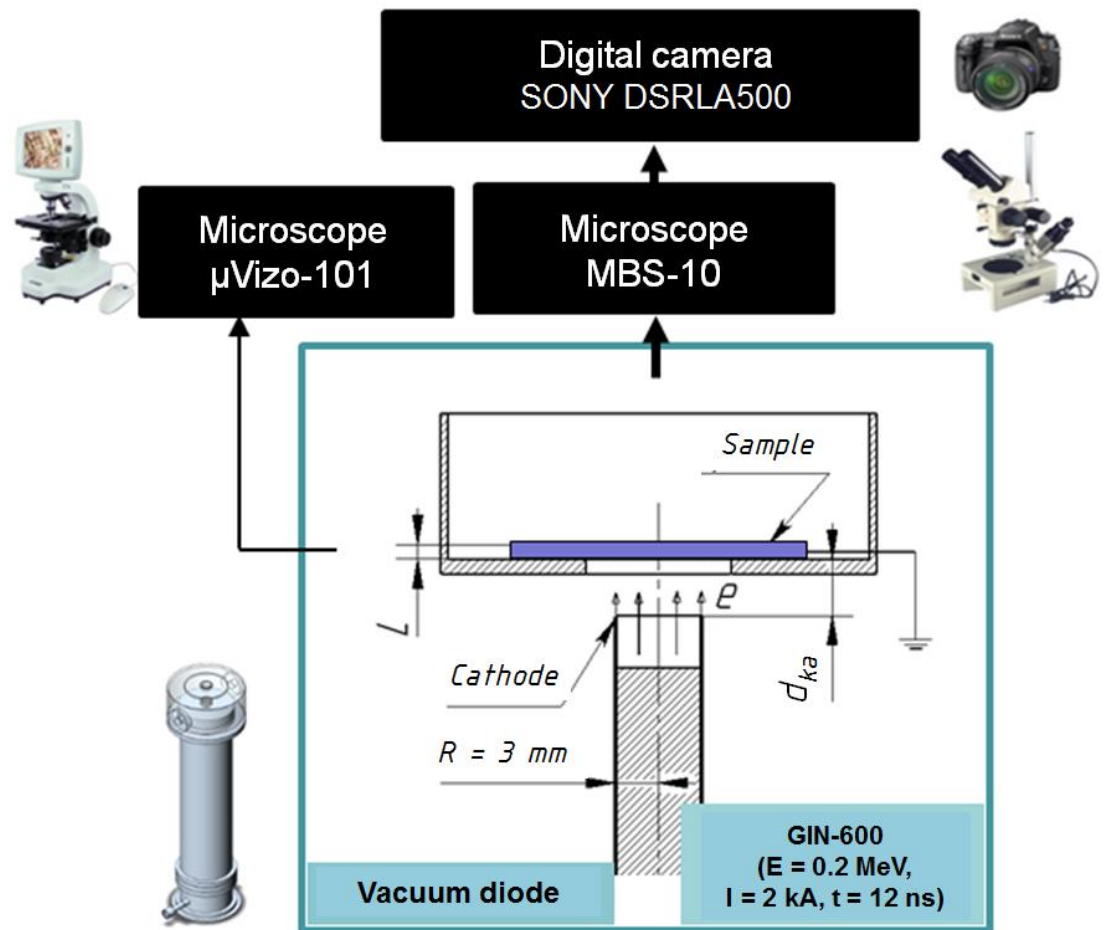


Figure A.2.2 – Scheme of irradiation and registration of the spatial distribution of cathodoluminescence and electrical breakdown in the samples.

L - thickness of the sample, d_{ka} - airgap, R - the radius of the cylindrical hollow cathode.

A hollow cylindrical cathode with a diameter of 6 mm and a wall thickness of ~ 0.2 mm was used to focus a HCEB. The value of the interelectrode gap d_{ka} varied from 3 to 5 mm. The geometry of the vacuum diode for self-focusing of a HCEB is shown in Fig. A.2.2. To measure the energy density of a HCEB, a piezoelectric sensor was used to determine the energy density of the electron beam discharged into the atmosphere.

A.2.3 Experimental results and their discussion

One of the tasks that has been set in this work is to reveal the features in the morphology of the destruction of polymers upon irradiation with a self-focused high-density electron beam. Based on the results of the research, determine the average (effective) energy of electrons generated in the self-focusing mode of a HCEB. For this, it was necessary to study in detail the features of the morphology of fractures, which manifest themselves as the current density of a HCEB gradually increases.

A.2.3.1 Spatial distribution of luminescence and destruction in the zone of deceleration of the electron beam in PMMA upon irradiation with a low-density HCEB

Photographs of PMMA glow after irradiation by a high-current low-density electron beam $H = (0.1 \div 0.3) \text{ J/cm}^2$ are given in fig. A.2.3.

Analysis of the photographs shown in fig. A.2.3 indicates that in the first excitation pulse and at a low energy density of a HCEB ($H = 0.1 \text{ J/cm}^2$) a relatively uniform cathodoluminescence of the samples is observed on the irradiated surface, the duration of which at half-maximum is $\sim 19 \text{ ns}$ (fig. A.2.4, a) and is comparable with the time resolution of the pulsed spectrometer. The observed inhomogeneities in fig. A.2.3 a associated with fluctuations in the beam current density in individual impulses.

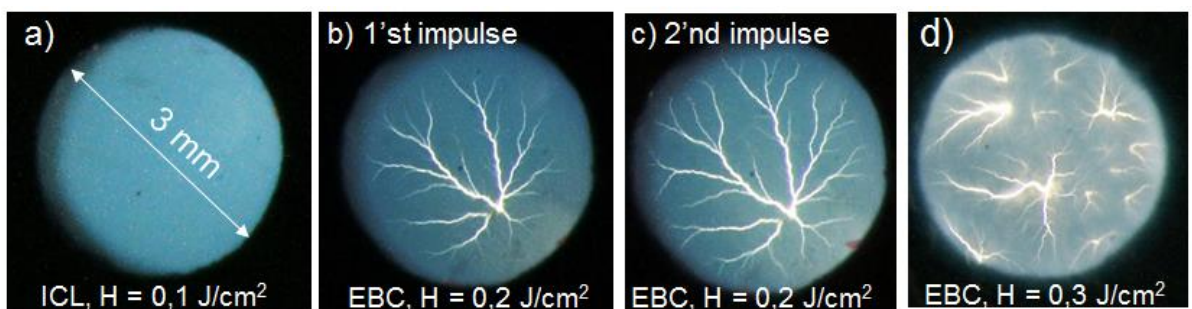
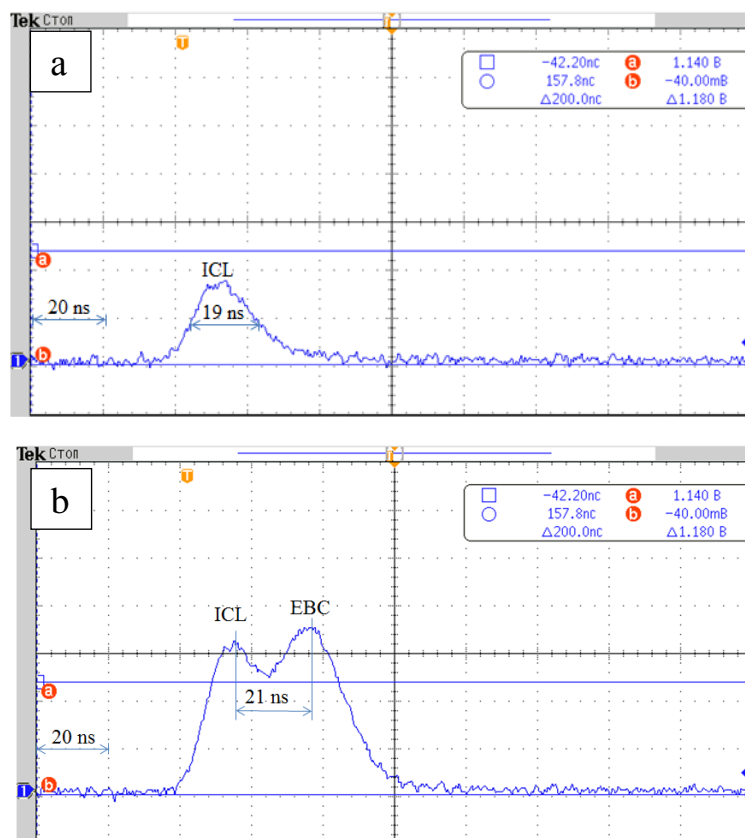


Figure A.2.3 – Photographs of PMMA glow after irradiation by low-density HCEB $H = (0.1 \div 0.3) \text{ J/cm}^2$: a – impulse-cathodoluminescence (ICL); b – electrical breakdown channel (EBC), the first impulse, $H = 0,2 \text{ J/cm}^2$; c – EBC, the second impulse, $H = 0,2 \text{ J/cm}^2$; d – EBC, $H = 0,3 \text{ J/cm}^2$

An increase in the energy density of a HCEB to $H = 0.2 \text{ J/cm}^2$ led to the accumulation of a negative space charge injected into the sample and the initiation of electric breakdown of PMMA in the electron beam deceleration zone. Electric

breakdown is realized in the form of streamer discharges, which are initiated on the excited surface of the sample and develop in the region of localization of the negative space charge, the spatial distribution of which is determined by the energy spectrum of a HCEB. Electric discharges are recorded both from the luminescence of a dense low-temperature plasma formed in the EBC (fig. A.3.1 b, c, d), and by the morphology of residual damage (Fig. A.2.5). The density $H^* = 0.2 \text{ J/cm}^2$ corresponds to the threshold for the formation of the EBC. When a high-density electron beam is irradiated with a density $H = 0.3 \text{ J/cm}^2$, more than the EBC in the electron beam deceleration zone (Fig. A.3.1, d) is initiated by the accumulation of a large amount of injected negative space charge into the sample. The rate of accumulation of a negative space charge is so high that one EBC can not neutralize the entire injected negative charge in the zone of deceleration of a HCEB due to the limited velocity of its propagation.



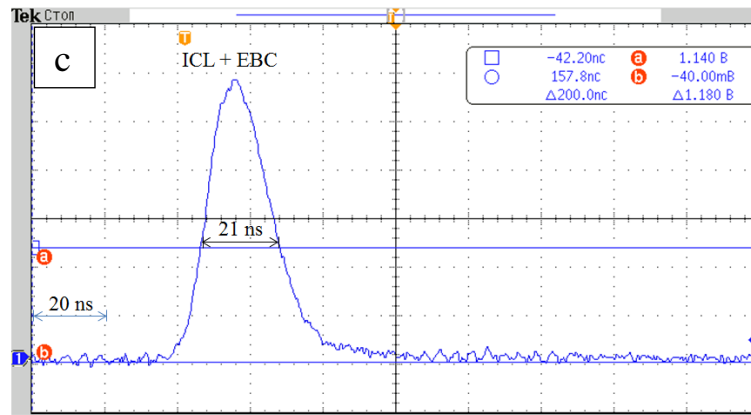


Figure A.2.4 – Kinetics of emission of PMMA at a wavelength of 600 nm, a - ICL, $H = 0.1$ J/cm²; b – ICL + EBC, the first impulse, $H = 0.2$ J/cm²; c – ICL + EBC, the second impulse, $H = 0.2$ J/cm²

Fig. A.2.4 shows the kinetics of emission of PMMA at a wavelength of 600 nm upon irradiation by a HCEB of different energy densities. Kinetic characteristics of the luminescence of the samples were recorded using a MDR-23 monochromator, an FEU-84 photomultiplier and a Tektronix DPO-3034 oscilloscope connected to a computer.

It can be seen from the presented oscillograms that at $H = 0.1$ J/cm², the duration of the PMMA emission pulse is minimal and amounts to 19 ns. A comparison of the luminescence kinetics (Fig. A.2.4, a) and the corresponding photograph (Fig. A.2.3a) indicates that for a given energy density of a HCEB, the pulse cathodoluminescence (ICL) of the sample is detected. The above also confirms the spectral characteristics of the observed luminescence (Fig. A.2.4, a). It is established that the kinetic and spectral characteristics of PMMA emission vary with increasing energy density of a HCEB. Thus, for example, at $H = 0.2$ J/cm² both ICL and EBC are observed simultaneously. The PMMA emission pulse in this case consists of two time-separated peaks: ICL and plasma stream emission pulse of the streamer discharge. From Fig. 2.4b, it is seen that in the first excitation pulse of a HCEB, the streamer discharge luminescence lags by ~ 21 ns relative to the impulsive cathodoluminescence. This delay is associated with a delay in the development of electrical breakdown relative to the irradiation pulse. In the second irradiation pulse, electric discharges develop along the EBC already formed in the first impulse (Fig. A.2.3, c) and the luminescence delay of the streamer discharge relative to the impulse

cathodoluminescence is absent (fig. A.2.4, c). The intensity of the glow of the streamer discharge in the second pulse increases by more than an order of magnitude, and represents a monopulse of the luminescence, whose duration at half-maximum is ≈ 21 ns (fig. 2.4, c).

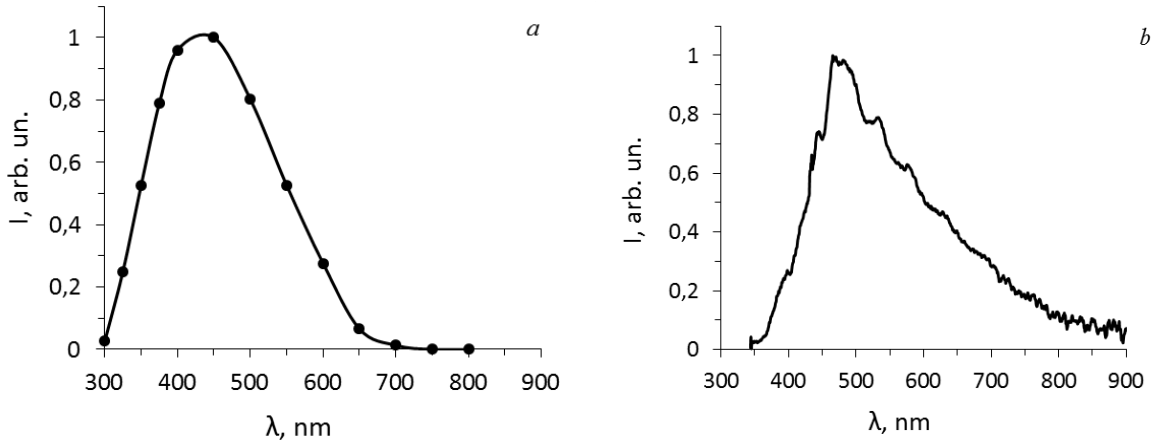


Figure A.2.5 - The spectrum of the ICL of PMMA in the subthreshold excitation mode at $H = 0.1 \text{ J/cm}^2$ (a) and the emission spectrum of the plasma of streamer discharges in PMMA in the excitation mode at $H = 0.4 \text{ J/cm}^2$ measured for 1 excitation pulse

Fig. A.2.5 shows the spectrum of the ICL of PMMA in the subthreshold excitation mode at $H = 0.1 \text{ J/cm}^2$ (a) and the emission spectrum of the plasma of streamer discharges in PMMA at $H = 0.4 \text{ J/cm}^2$ measured for 1 excitation pulse.

The morphology of destruction of PMMA after a single irradiation by a high-current low-density electron beam $H = (0.1 \div 0.3) \text{ J/cm}^2$ is shown in fig. 2.6, a-c. It is seen that with increasing H , the amount of the EBC increases. The distribution of the EBC in the zone of deceleration of the electron beam is close to uniform, and the maximum depth of occurrence reaches $\sim 350 \text{ }\mu\text{m}$, which corresponds to the average electron energy in the energy spectrum of the HCEB $E_{sr} \sim 200 \text{ keV}$.

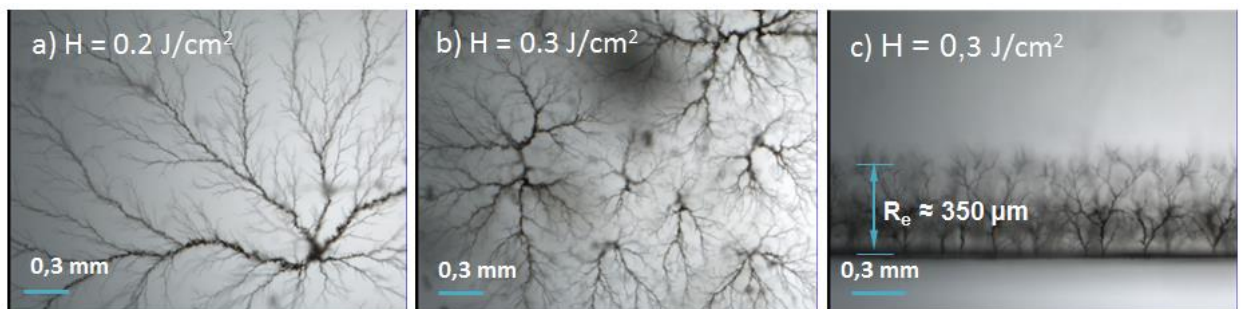


Figure A.2.6 - Morphology of residual fractures formed in the zone of deceleration of a HCEB as a result of the development of electrical breakdown (a, b) and a photograph of the spatial distribution of the EBC in the depth of the electron beam path (c) after the first impulse of a HCEB.

The depth of the path of the electron beam R_e can be calculated by the formula:

$$R_e = 0,11 \left[\left(1 + 22,4 E_{sr}^2 \right)^{1/2} - 1 \right] \rho^{-1} \quad (\text{A.1})$$

where $E_{sr}[\text{MeV}]$ is the average energy of the HCEB; $\rho [\text{g/cm}^3]$ is the mass density of the irradiated material.

From (A.1) it is possible to determine E_{sr} by the formula:

$$E_{sr} = \sqrt{\frac{1}{22,4} \cdot \left[\left(\frac{\rho R_e}{0,11} + 1 \right)^2 - 1 \right]} \quad (\text{A.2})$$

In this case, $R_e = 350 \mu\text{m}$ (fig. A.2.6, c), $\rho_{\text{PMMA}} = 1.19 \text{ g/cm}^3$

$$E_{sr} = \sqrt{\frac{1}{22,4} \cdot \left[\left(\frac{1,19 \cdot 0,035}{0,11} + 1 \right)^2 - 1 \right]} \approx 0,2 \text{ MeV}$$

Consequently, by calculation, we can determine and estimate the average energy of a HCEB $E_{sr} \sim 200 \text{ keV}$.

A.2.3.2 Filamentation and self-focusing of a HCEB in experiments at the accelerator GIN-600

A.2.3.2.1 Morphology of the fractures formed by a filamented and self-focused HCEB in metals

Fig. A.2.7 shows the destruction of the irradiated and back surfaces of the copper anode upon irradiation with a HCEB at the accelerator GIN-600 (0.2 MeV, 2 kA, 12 ns) per impulse in the filamentation and self-focusing mode: the anode thickness $L = 180 \mu\text{m}$, the radius of the cathode $R = 3 \text{ mm}$, the interelectrode gap is $d_{ka} = 3 \text{ mm}$.

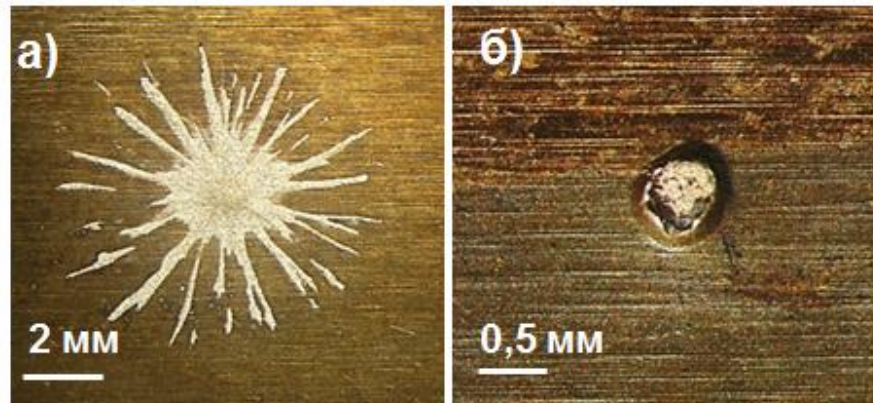


Figure A.2.7 - Destruction of the irradiated and back surface of the copper anode upon irradiation at the accelerator GIN-600 (0.2 MeV, 2 kA, 12 ns) per impulse: a) Photo of the erosion track on the irradiated surface; b) A photo of the spall on the back surface; interelectrode gap $d_{ka} = 3$ mm

It can be seen (fig. A.2.7) that as a result of the action of a single pulse of a HCEB on the irradiated surface of copper with a value of the interelectrode gap $d_{ca} = 3$ mm, a figure resembling a "star" is formed, the number of beams in which is ~ 22 with a diameter of ~ 7.5 mm. According to this photograph, it is possible to determine the geometric parameters of individual "beams": the width of the erosion track varied within $\sim (50-150)$ μm , the diameter of the central crater is ~ 2.5 mm, depth $\sim (15-20)$ μm . In this experiment, a rare erosion pattern was also observed - a separate part of the "ray" had an intermittent structure. "Ray" consisted of individual microcraters, with a diameter of $\sim (50-100)$ μm , separated from each other by a distance equal to the diameter of the crater. One of the reasons for the transformation of an individual part of the beam can be the modulation of the filament current due to the processes developing in the plasma of the anode flame.

In addition to the erosive autographs on the irradiated surface on the back side of the anode, a spall was formed with a diameter of ~ 0.5 mm (fig. A.2.7, b).

The cause for the formation of a spall is the shock wave formed in the self-focusing spot by the evaporation mechanism. A shock wave is produced in the focal spot of a HCEB in the self-focusing mode, propagating in the anode. This shock wave is reflected from the back surface of the anode and a shock wave of rarefaction propagates into the depth of the anode and a tensile stress appears. When the tensile stress σ_0 (spalling strength of the material) is exceeded, a part of the free surface is broken off and flies approximately at a double mass velocity in the form of a spall plate.

The pressure in the focal spot of a HCEB can be computed from the formula [1]:

$$P[\text{Pa}] = \Gamma \cdot \omega \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{A.3})$$

where, Γ is the Gruneisen coefficient, ω is the volume energy density in the energy release zone of the HCEB. Assuming that there is purely isochoric heating, $\Gamma \approx 1$.

Fig. A.2.7, b shows that the tensile stress exceeds the spall strength of the copper anode. It is known that spalling strength of the copper is $\sigma_0 = 1.19$ GPa [3]. That is, the minimum value of the pressure in the focal spot of a HCEB is $P = 1.19$ GPa. Hence, according to formula A.3, it is possible to calculate the bulk density of energy in the energy release zone of a HCEB:

$$\omega \approx 1.19 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$$

In the case of irradiation of anode of aluminum with thickness of 110 μm , interelectrode gap $d_{ka} = 3$ mm an aperture 1.8 mm in diameter was formed in one irradiation impulse (fig. A.2.8). A gradual increase in the interelectrode gap d_{ka} in the range from 3 to 5 mm leads to a decrease in the diameter of the "rays", and then to their disappearance (fig. A.2.9 a, b). The hole remains, indicating the stability of the focusing process of the electron beam when the interelectrode gap is increased to 5 mm.

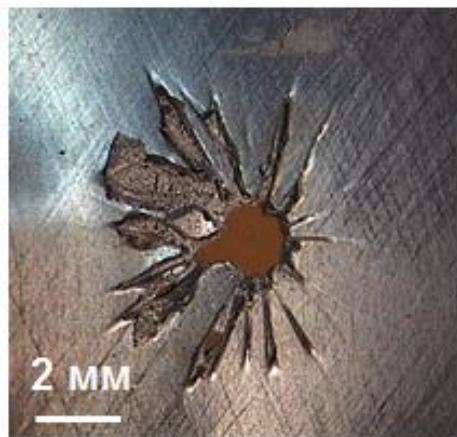


Figure A.2.8 - Destruction of the surface of the aluminum anode when irradiated at the accelerator GIN-600 (0.2 MeV, 2 kA, 12 ns) per impulse; $d_{ka} = 3$ mm

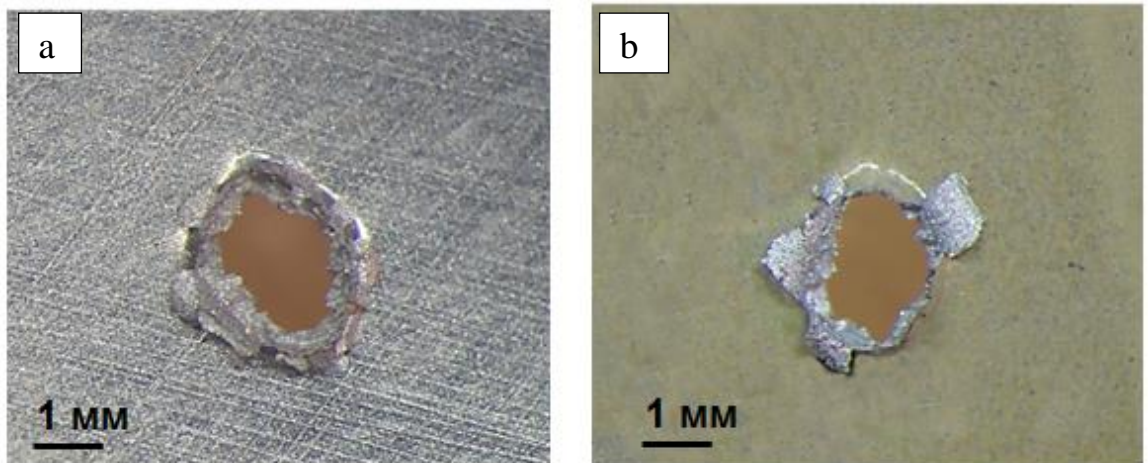


Figure A.2.9 - Destruction of the irradiated and back surfaces of the aluminum anode when irradiated at the accelerator GIN-600 (0.2 MeV, 2 kA; 12 ns) per impulse; $d_{ka} = 3,5$ mm

Fig. A.2.9 shows the morphology of the destruction of the irradiated and back surfaces of the aluminum anode with a thickness of $110 \mu\text{m}$, $d_{ka} = 3,5$ mm. It can be seen that the "outlet" of the rupture is formed not only on the rear, but also on the irradiated surface of the sample. This indicates that the maximum energy release is concentrated at a depth of about $50 \mu\text{m}$. Only in this case it is possible to form a splitting both on the irradiated and on the rear surface of the irradiated target.

The difference in the morphology of the fractures in copper and aluminum is due to the difference in the density of these materials. Copper has a high mass density $\rho = 8.96 \text{ g/cm}^3$ so that the depth of the energy absorption band is small. In this case, the pressure level in the focal spot of the focused electron beam is limited because of the rapid expansion of the heated region. The absorption depth of energy in aluminum is large ($\rho_{\text{Al}} = 2.7 \text{ g/cm}^3$), which leads to the development of a thermal explosion in the bulk of the sample and is accompanied by the formation of a voltage on the irradiated and back surfaces of the sample with the simultaneous formation of two "sockets".

Considering that the depth of the energy release zone in an aluminum sample is half of its thickness, then $R_e = 55 \mu\text{m}$. It is possible to estimate the energy of a focused electron beam from the formula A.2: $E_{\text{sr}} = 0.11 \text{ MeV}$.

A.2.3.2.2 Morphology of the fractures formed by a filamented and self-focused HCEB in polymers

Fig. A.2.10 shows the morphology of the damage formed in PMMA upon irradiation with a HCEB through the diaphragm, which cuts out the central part of the spot of the self-focused electron beam. It can be seen that a crater (a) is formed on the irradiated surface as a result of the evaporation of a thin near-surface layer of the sample. A spall funnel (c) is formed on the back surface of the sample, ~ 1.2 mm thick. Fig. A.2.10, d shows a photograph of the spall plane, which is formed by interference of stretching waves.

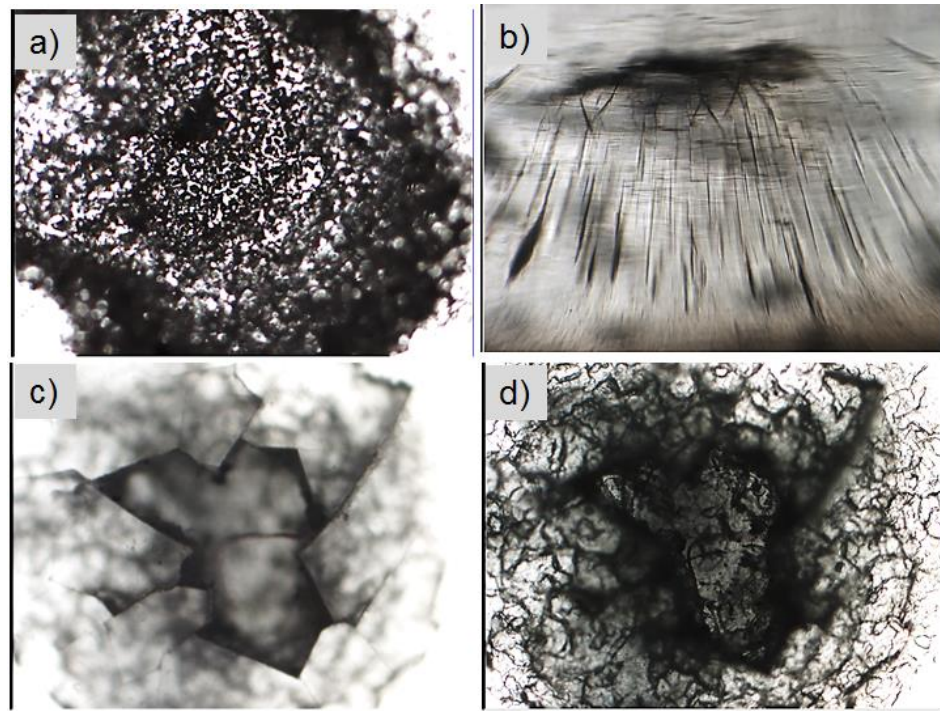


Figure A.2.10 - Photographs of destruction in PMMA when irradiated with a HCEB in the self-focusing mode: a - type of destruction from the irradiated surface; b - distribution of destruction along the depth of the sample (at a depth of 1 mm from the back surface); c - a photo of the spall on the back surface; d - fracture morphology at a depth of 360 μm from the back surface

The pressure and bulk density of energy in the focal spot of a HCEB can also be calculated from the formula [A.3] for this case:

$$P[\text{Pa}] = \Gamma \cdot \omega \left[\text{J}/\text{m}^3 \right]$$

where, Γ is the Gruneisen coefficient, ω is the volume energy density in the energy release zone of the HCEB. Assuming that there is purely isochoric heating, $\Gamma \approx 1$.

It is known that the spall resistance of PMMA is $\sigma_0 = 0.3 \text{ GPa}$ [3]. Hence the minimum volume density of energy in the focusing spot is equal to:

$$\omega \approx 0,3 \cdot 10^9 \text{ J}/\text{m}^3$$

Thus, the analysis of the experimental data allows us to conclude that in the self-focusing mode of a HCEB in the vacuum diode of the GIN-600 accelerator, the bulk energy density in condensed media can reach $(10^9 \div 10^{10}) \text{ J}/\text{m}^3$, and the shock-wave amplitude of "compression-stretching" $(10^9 \div 10^{10}) \text{ Pa}$.

The second problem that needed to be solved was to determine the electron energy in the filamentation and self-focusing mode of a HCEB. This problem was solved as follows.

By varying the size of the cathode-anode gap (dKA) in the (3 ÷ 4) mm range, it is possible to achieve conditions in which evaporation of the surface of the investigated polymers was not observed. In this case, it becomes possible to study the spatial (in the depth of the sample) distribution of the EBC formed in the polymers under study. It was shown above that from the maximum depth of penetration of the streamer discharges one can estimate the effective energy of the electrons in the beam. In connection with this, it was planned to study the distribution of the channel of electric breakdown in depth in the zones of filamentation of a HCEB.

The first experiments were carried out on viniproze samples. Fig. A.2.11 shows photographs of the disruptions generated by a HCEB in a viniproze in the filamentation and self-focusing mode.

It was found that at relatively high energy densities of a HCEB, in the filament location region, the intensity of destruction was so great that it was not possible to look at the spatial (in depth) distribution of the EBC (Fig. A.2.11, c). In this connection, by changing the dKA value, we selected the irradiation conditions such that the necessary investigations could be carried out. This problem was solved. Fig. A.2.11 a, b, d shows photographs of the spatial, in depth, channel distribution of electrical breakdown in the propagation zone of a filamentary HCEB.

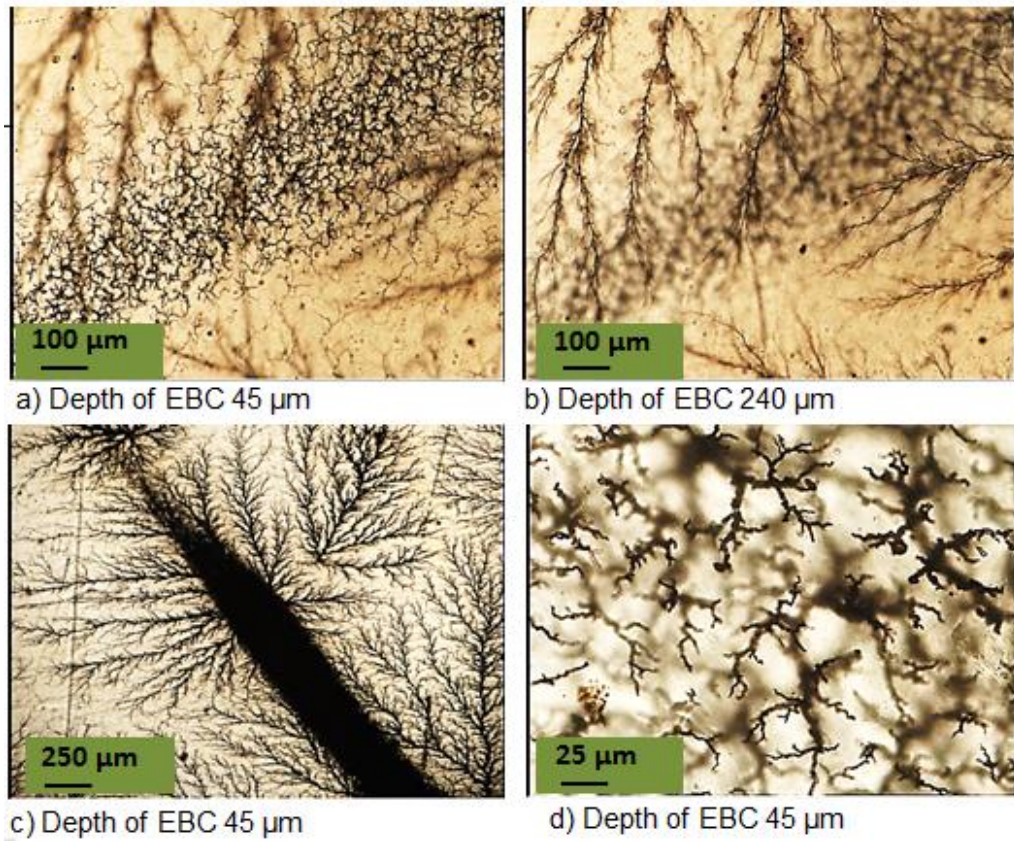


Figure A.2.11 - Morphology of the fractures formed in viniproze during irradiation with a HCEB in the filamentation and self-focusing mode in the vacuum diode of the accelerator GIN-600

It is found that when the polymer is irradiated with a filamented and self-focused HCEB, two types of electric discharges are formed in the zone of deceleration of the electron beam, differing in spatial distribution over depth and distribution density over the irradiated volume. Analysis of the photographs of the EBC at various distances from the surface indicates that in the filament location areas in the near-surface region of the sample a dense network of individual microchannels is formed, the length of which is 100 μm .

From Fig. A.2.11, a, it is seen that the average depth of microchannels in the viniproze sample is 45 μm . Knowing $\rho_{\text{viniproz}} = 1.4 \text{ g/cm}^3$, from the expression (1.7) it is possible to determine the average energy of electrons in a filamented beam:

$$E_{sr} = \sqrt{\frac{1}{22,4} \cdot \left[\left(\frac{1,4 \cdot 0,0045}{0,11} + 1 \right)^2 - 1 \right]} \approx 72 \text{ keV}$$

Thus, the average energy of the electrons in the filament is $E_{sr} \approx 72 \text{ keV}$.

Measuring the depth of occurrence of deeper channels of electric breakdown uniformly distributed in the zone of deceleration of a HCEB ($\sim 240 \mu\text{m}$), using (A.2), it is possible to calculate the average energy of high-energy electrons, which, simultaneously with low-energy electrons, are formed during the operation of a vacuum diode in the self-focusing mode of a HCEB:

$$E_{sr} = \sqrt{\frac{1}{22,4} \cdot \left[\left(\frac{1,4 \cdot 0,024}{0,11} + 1 \right)^2 - 1 \right]} = 180 \text{ keV}$$

Similar experiments were carried out on PMMA samples. Fig. A.2.12 and fig. A.2.13 show photographs of the luminescence generated at the time of PMMA irradiation by a self-focused HCEB and residual fractures recorded after a single exposure to an electron beam.

The energy density of the HCEB was such that evaporation of the material occurred in the filamentation zones and in the focal spot. Therefore, can get the necessary information only from Fig. 2.12. It is seen that the primary source of emission is a large number of microchannels formed in the zones of filamentation of a HCEB.

The decrease in the energy density of a HCEB made it possible to study the spatial distribution of the EBCs in the depth of the irradiated sample. The data obtained are shown in fig. A.2.14, a-d.

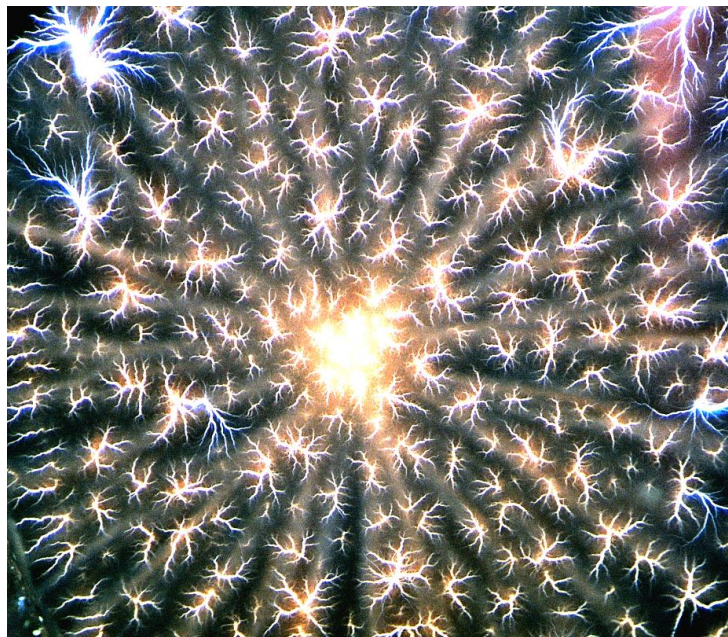


Figure A.2.12 - Glow of streamer discharges developing in PMMA in the zone of deceleration of a HCEB in the filamentation and beam self-focusing mode



Figure A.2.13 - Morphology of residual damage in PMMA after irradiation with a pulse of a HCEB in beam self-focusing mode

Analysis of photographs shows that in PMMA as well as in viniproze in the zone of electron beam deceleration two types of electric discharges are formed, differing in spatial distribution over depth and distribution density over the irradiated volume.

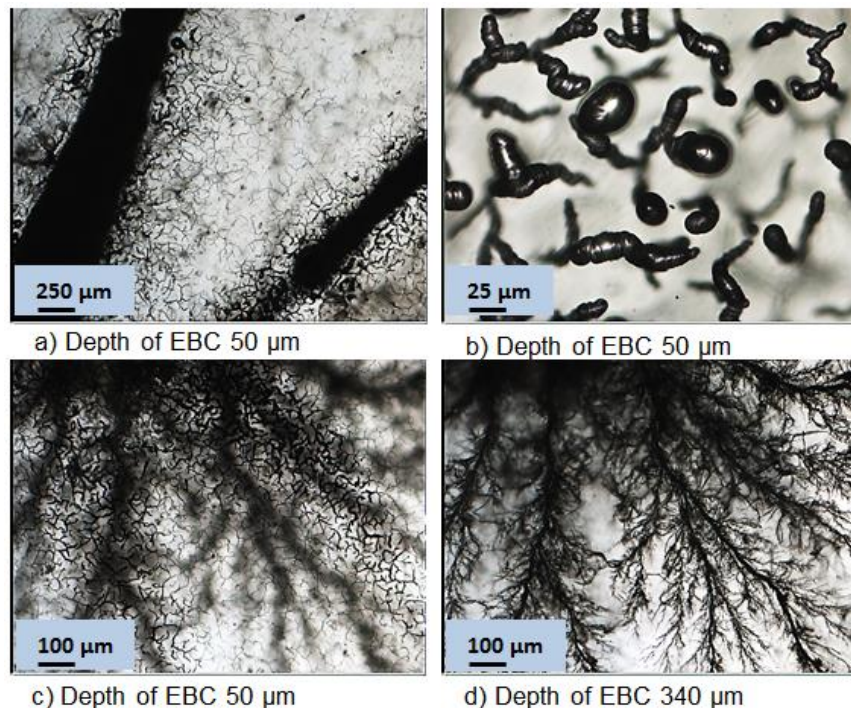


Figure A.2.14 - Morphology of the fractures formed in PMMA upon irradiation of a HCEB in the filamentation and self-focusing mode in the vacuum diode of the accelerator GIN-600

The main difference is in the form of the EBCs formed in the near-surface region of PMMA in the filament localization zone (Fig. A.2.14, b).

Conclusion

The morphology of the damage formed in metals and polymers upon irradiation by a HCEB in the filamentation and self-focusing mode in a vacuum diode of the electron accelerator GIN-600 has been studied.

In polymers, two types of electric discharges have been distinguished, differing in the depth of occurrence in the zone of deceleration of the electron beam.

An analysis of the experimental results indicates that in the vacuum diode of the electron accelerator GIN-600, operating in the filamentation and self-focusing mode, electron beams of two types are generated, which differ in the electron energy and in the energy density. In the filament location zones, low-energy electrons with energy of $(50 \div 100)$ keV and volumetric density of energy release of $(10^9 \div 10^{10})$ J/m³ are generated. At the same time, high-energy electrons are formed uniformly distributed in the zone of inhibition with a bulk density characteristic for the operation of a vacuum diode in the usual mode.

It is assumed that the filamentary electron beams are runaway electrons formed in the vacuum diode of the accelerator GIN-600 during operation.

List of literature

1. Demidov B.A. Production of high pressures and metastable states in condensed media on the basis of the use of a high-current relativistic electron beam // Plasma Physics - 2003. - V. 29. - №. 7.- P. 670 - 678.
2. Shereshevsky A.I., Unanyants T.P., Bakharovsky G.Ya. Chemical goods // Handbook - State Scientific and Technical Publishing House of Chemical Literature - Moscow. - 1959. - V. 1. - 646 p.
3. Kanel G.I. Resistance of metals to spall fracture // PMTF. - 2001. - V. 42 - № 2. - P. 194-198.