

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



Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка и исследование ионного В_г-диода

УДК 621.387.122.3:537.533

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рысбаев Каныш Жолболсынулы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИШФВП	Степанов Андрей Владимирович	кандидат технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение социально- гуманитарных наук, доцент	Старикова Екатерина Васильевна	кандидат философских наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение контроля и диагностики, профессор	Ахмеджанов Рафик Равильевич	доктор биологических наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	кандидат технических наук		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
Р1	Способность <i>совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
Р2	Способность <i>использовать иностранный язык в профессиональной сфере</i> .
Р3	Способность применять на практике <i>навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в <i>управлении</i> коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности
Р4	Способность использовать методологические основы <i>научного познания и творчества</i> , научную информацию в развитии отрасли, навыки проведения работ с использованием <i>современных информационных технологий</i> ; синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
Р5	Способность применять <i>углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
Р6	Способность <i>ставить и решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
Р7	Способность выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
Р8	Способность выполнять инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
Р9	Способность проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
Р10	Способность проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
Р11	Способность осваивать <i>новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
Р12	Способность разрабатывать <i>рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; <i>составлять оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Рысбаев Каньш Жолболсынулы

Тема работы:

Разработка и исследование ионного V_r -диода

Утверждена приказом директора (дата, номер) № 1799/с от 15.03.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы: 09 июня 2018 года

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Литературные данные, результаты при проведении НИР и прохождении практик.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1 Ионный V_r-диод для генерации мощных ионных пучков2 Экспериментальная установка и диагностическое оборудование3 Расчет параметров и разработка конструкции ионного V_r-диода4 Исследование параметров ионного V_r-диода5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение6 Социальная ответственность

Перечень графического материала	Презентация в Microsoft PowerPoint
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старикова Екатерина Васильевна
Социальная ответственность	Ахмеджанов Рафик Равильевич
Разделы, выполненные на иностранном языке	Квашнина Ольга Сергеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Глава 1 Ионный В _r -диод для генерации мощных ионных пучков	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22 января 2018 г.
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
научный сотрудник лаборатории №1	Степанов Андрей Владимирович	кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рысбаев Каныш Жолболсынулы		

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

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки: 13.04.02 «Электротехника и электротехника»
 Уровень образования: магистр
 Отделение материаловедения
 Период выполнения: 2017/2018 учебный год

Форма представления работы:

магистерская диссертация

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08 июня 2018 г.
--	-----------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15/03/2018	Литературный обзор	15
28/03/2018	Описание конструкции и основных параметров генератора сильноточных импульсных ионных пучков ТЕМП – 4М	30
08/04/2018	Экспериментальная часть по расчету параметров и разработке конструкции ионного В _г -диода с целью улучшенной генерации ионных пучков	30
23/04/2018	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
05/05/2018	Социальная ответственность	10
07/05/2018	Разделы, выполненные на иностранном языке	5
		<i>Сумма: 100 баллов</i>

Составил руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИШФВП	Степанов Андрей Владимирович	кандидат технических наук		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	кандидат технических наук		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 129 страниц, 44 рисунков, 16 таблиц, 49 источников, 1 приложения.

Ключевые слова: МОЩНЫЙ ИОННЫЙ ПУЧОК (МИП), ИОННЫЙ ДИОД, МАГНИТНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ, ПАРАМЕТРЫ ИОННОГО ДИОДА, ФОКУСИРОВКА ИОННОГО ПУЧКА, ЭМИССИОННОЕ ПОКРЫТИЕ АНОДА.

Объектом исследования является ионный V_r -диод с внешним магнитным полем.

Целью работы является разработка конструкции ионного V_r -диода и проведение на нем исследования по генерации мощных ионных пучков различного массового состава и фокусировки ионного пучка, для повышения эффективности работы ионного диода и ресурса работы анодного покрытия.

В процессе исследования проводились расчеты по определению размеров и конструкции ионного V_r -диода, параметров магнитного поля, создаваемого внешним источником питания. По разработанному V_r -ионному диоду проводились экспериментальные исследования различных эмиссионных покрытий анода, а также опыты по улучшению фокусировки ионного пучка.

В результате исследования был разработан ионный диод с разными эмиссионными покрытиями. Экспериментально была определена эффективность работы разных эмиссионных покрытий. Определены способы фокусировки и транспортировки ионных пучков к мишени.

ABSTRACT

Master's thesis consists of 129 pages, 44 figures, 16 tables, 49 references, 1 applications.

Key words: HIGH INTENSE PULSED ION BEAM (HIPIB), IONIC DIODE, MAGNETIC INSULATION, PARAMETERS OF ION DIODE, FOCUSING OF ION BEAM, EMISSION COATING OF ANODE.

The object of investigation is an ion B_r -diode with an external magnetic field.

The purpose of the work is to develop ion pool designs, to improve the efficiency of the ion diode and the life of the anode coating.

During the research, calculations were made to determine the size and design of the ion B_r -diode, the parameters of the magnetic field created by an external power source. Based on the developed B_r -ion diode, experimental studies of various emission coatings of the anode, as well as experiments to improve the focusing of the ion beam, were carried out.

As a result of the research, an ion diode with different emission coatings was developed. The efficiency of different emission coatings was determined experimentally. The methods for focusing and transporting ion beams to the target are determined.

Обозначения и сокращения

В настоящей работе использованы следующие обозначения и сокращения:

МИД - магнитно-изолированный ионный диод

МИП – мощные ионные пучки

ДФЛ – двойная формирующая линия

ГИН – генератор импульсных напряжений

А-К зазор – анод катодный зазор

КЦФ – коллимированный цилиндр Фарадея

Оглавление

Введение.....	11
1 Ионный V_r -диод для генерации мощных ионных пучков.....	13
1.1 Конструкция и характеристики ионного V_r -диода	13
1.2 Магнитная изоляция ионного V_r -диода внешним магнитным полем.....	19
1.3 Транспортировка мощного ионного пучка к мишени.....	26
Выводы.....	34
2 Экспериментальная установка и диагностическое оборудование	36
2.1 Сильноточный импульсный ионный ускоритель «ТЕМП»	36
2.2 Диагностическое оборудование	38
2.3 Источник питания катушек магнитного поля	40
2.4 Измерение плотности энергии с помощью калориметра.....	42
3 Расчет параметров и разработка конструкции ионного V_r -диода	44
3.1 Расчет параметров ионного V_r -диода	44
3.2 Расчет магнитной изоляции ионного V_r -диода	50
3.3 Разработка конструкции ионного V_r -диода	54
4 Исследование параметров ионного V_r -диода	58
4.1 Генерация ионного пучка различного массового состава	58
4.2 Фокусировка ионного пучка	63
4.3 Анализ полученных результатов.....	68
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	72
5.1 Потенциальные потребители результатов НИИ	73
5.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	74
5.3 SWOT-анализ.....	76
5.4 Планирование комплекса работ на создание проекта.....	77
5.5 Определение трудоемкости работ.....	80

5.6 Бюджет научного исследования	82
5.6.1 Расчет основной заработной платы.....	82
5.6.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	84
5.6.3 Затраты электроэнергии	84
5.6.4 Накладные расходы	85
6 Социальная ответственность	91
6.1 Производственная безопасность	92
6.1.1 Анализ вредных факторов производственной среды.....	92
6.1.2 Анализ опасных факторов производственной среды.....	97
6.2 Экологическая безопасность.....	102
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	103
6.4 Правовые и организационные мероприятия обеспечения безопасности	104
Заключение	106
Список публикаций студента.....	107
Список использованных источников	108
Приложение А – Ionic V_r -diode for generating a high-intensity pulsed ion beam..	113

Введение

Во время эксплуатации поверхностный слой материала подвергается механическому, тепловому, магнитному, электрическому, световому и другим воздействиям. Проявляются такие дефекты как, трещины, износ, эрозия, коррозия и т.д. [1]. Модификации материалов ионным пучком улучшает состав и структуру поверхностного слоя материала, которым нельзя получить с помощью термической обработкой, поверхностным пластическим деформированием и др. При воздействиях пучков заряженных частиц на металл и сплав появляются явления термического, термомеханического и диффузионного характера, которые приводят к структурным и фазовым превращением материала. В результате изменяются свойства материалов: твердость, прочность, износостойкость; повышаются эксплуатационные характеристики изделий.

Под мощными ионными пучками понимают импульсные пучки ионов с потоком энергии более 10^7 Вт/см² и длительностью импульса, как правило, $(10^6 - 10^8)$ с [2].

Разработка источников мощных ионных пучков началось с середины 70-х годов прошлого века для исследования, связанных с реализацией инерционного управляемого термоядерного синтеза [3]. Первоначально мощные ионные пучки (МИП) использовались для моделирования воздействия мощных нейтронных потоков на материалы, радиационных испытаний. Впоследствии они широко использовались в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу, накачке лазеров, модифицированию материалов, импульсному осаждению пленок из абляционной плазмы.

В настоящее время сформировались следующие основные направления по применению МИП в технологиях: получение сверхплотной плазмы для управляемого термоядерного синтеза, имплантация и отжиг полупроводников, модификация прочностных, трибологических и антикоррозионных свойств металлов и сплавов, включая метастабильные фазы и соединения; получение

тонких пленок и покрытий с заданной структурой и свойствами посредством осаждения абляционной плазмы; очистка, полировка и гляцевание поверхностей; нанофазный порошковый синтез; разрушение и резка твердых материалов. Реализация нужной технологии достигается определенным выбором интенсивности и времени облучения [3].

Среди известных конструкций ионных диодов выделяются диодные системы с радиальным магнитным полем (V_r -диоды), обеспечивающие замкнутый дрейф электронов в прикатодной области. Такие диоды являются наиболее эффективными источниками МИП и могут обеспечивать (10^3 – 10^4) импульсов без изменения характеристик пучка. В данных диодных системах, как правило, в качестве источника МИП используется предварительно ионизованный газ либо диэлектрик. Однако использование ионизованного газа требует дополнительной системы для инъекции газа, а диэлектрические покрытия имеют ограниченный ресурс работы.

Целью работы является разработка конструкции ионного V_r -диода, проведение на нем исследований по генерации мощных ионных пучков различного массового состава и фокусировки ионного пучка, направленных на повышение плотности тока и энергии МИП и ресурса работы анодного покрытия.

1 Ионный B_r -диод для генерации мощных ионных пучков

1.1 Конструкция и характеристики ионного B_r -диода

Известны различные типы магнитно-изолированных ионных диодов (МИД). Ионные диоды с изоляцией радиальным магнитным полем (B_r -диоды) до настоящего времени являются наиболее изученными экспериментально и теоретически. Высокая повторяемость характеристик мощного ионного пучка (МИП), высокая плотность энергии МИП, возможность использования B_r -диода в широком диапазоне выходного импеданса генератора высоковольтных импульсов напряжения – обусловили развитие этого класса диодов для прикладных исследований.

В первых экспериментальных работах по исследованию МИД [4,5] основной трудностью являлась проблема создания эффективного источника анодной плазмы. Этот источник должен генерировать однородную и плотную плазму на больших площадях за времена, малые по сравнению с длительностями импульсов (10 нс). Первоначально для этой цели использовались нитяные аноды, выполненные из водородосодержащего материала. Дальнейшая модификация привела к конструкции составного массивного анода, в котором плазма генерируется на поверхности изолированных (диэлектрических) участков анода, при развитии по ним поверхностного пробоя. Как и в случае нитей, возникновение поверхностного пробоя обусловлено переходными напряжениями, развивающимися по поверхности изолированных участков анода при поступлении на него высоковольтного импульса. Аноды такой конструкции нашли широкое применение в ионных диодах благодаря целому ряду преимуществ по сравнению с нежесткими нитяными анодами. Они обеспечивают:

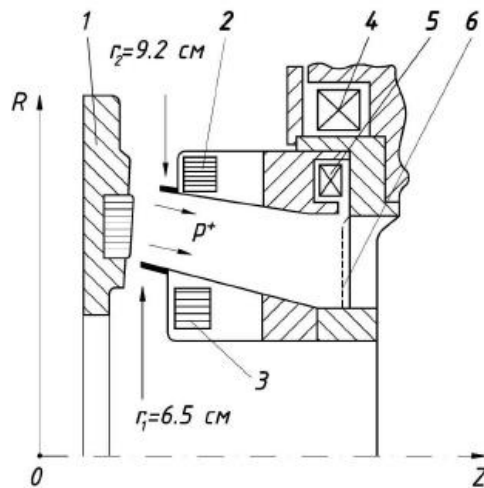
- 1) более «холодные» пучки ионов, т. е. пучки с меньшим эмиттансом;
- 2) жесткую геометрическую юстировку всей системы;

3) эффективный вывод ионного пучка, так как области генерации плазмы могут быть расположены в нужных местах напротив соответствующих отверстий в катоде;

4) использование катодов жесткого типа (не сетчатого), способных удерживать магнитное давление быстрых импульсных полей.

В ионном V_f -диоде с изоляцией внешним магнитным полем по способу образования плазменного слоя различают «пассивные» и «активные» источники плазмы. В качестве «пассивных» источников плазмы наиболее широко применяются аноды с водородсодержащими включениями (эпоксидный компаунд или полиэтилен) [6]. В таких системах образование плазмы на поверхности анода реализуется за счет поверхностного пробоя на фронте высоковольтного импульса напряжения, поэтому существует задержка эмиссии ионного тока относительно переднего фронта ускоряющего напряжения. Согласно результатам работы [7] длительность времени задержки составляет от (10–20) нс.

Одним из образцов таких систем [8] является анод в виде тора намотанного лентами алюминия и полиэстера ($C_{10}H_8O_4$) толщиной 0,3 мм и 0,75 мм соответственно, и впаянного в медное основание (рисунок 1). Анод изготовлен в виде кольцевой поверхности состоящей из двадцати сферических витков и имеет площадь 100 см². Катоды имеют цилиндрическую форму и изготовлены из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Промежуток анод-внутренний катод составляет (3–4) мм, промежуток анод – внешний катод составляет 8 мм. Магнитное поле в диоде имела величину $B_f=(1-2)$ Тл с временем нарастания 100 мкс и создавалось током двух катушек 2 и 3, и азимутальными вихревыми токами в аноде.



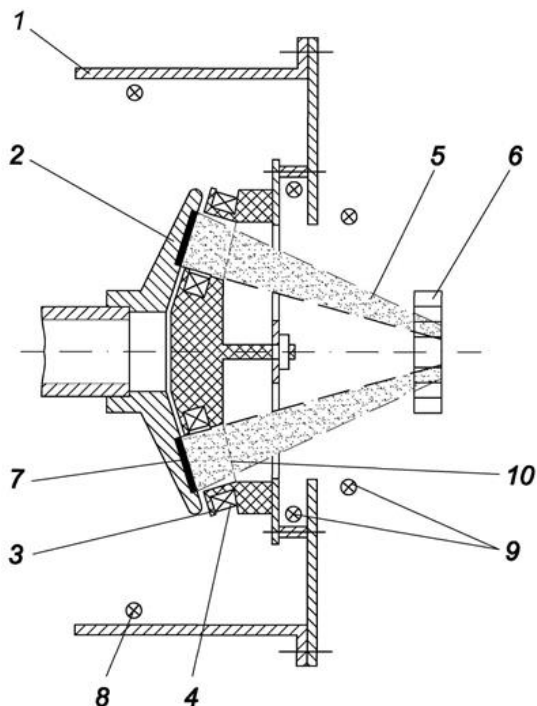
1 – анод; 2 и 3 – внешняя и внутренняя катушки магнитного поля, соответственно; 4 и 5 – измерительные катушки; 6 – сетка

Рисунок 1 – Схема МИД с V_r -магнитным полем и полым катодом

Такой диод при давлении остаточного газа в вакуумной камере $1 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. и при ускоряющем напряжении 0,6 МВ, длительности импульса 60 нс и полном токе диода 200 кА, обеспечивал образование мощного ионного пучка с током 120 кА. Доля протонов в пучке составляла (70–80)%. Результаты исследований работы данного диода показывают [9], что ионные V_r -диоды с анодами, содержащими диэлектрики, позволяют получать МИП, в которых наряду с протонами содержатся, как правило, ионы углерода. Образование плазмы на поверхности анода происходит неоднородно, также диэлектрическое покрытие анода подвергается эрозии при электрическом пробое.

В работе [10] исследовали генерацию МИП в подобном ионном V_r -диоде с «пассивным» источником плазмы. Данный диод, в отличие от рассмотренного выше, имел баллистическую фокусировку ионного пучка (рисунок 2). При величине А-К зазора 10 мм, и величине ускоряющего напряжения (700 ± 30) кВ полный ток диода составлял (25 ± 2) кА. Импеданс диода в течении основной части импульса был примерно постоянным на уровне 30 Ом. Задержка в появлении ионного тока не превышала 10 нс. Амплитуда тока МИП в диоде достигала 18 кА. Авторы данной работы также установили, что наработка плазмы на поверхности анода происходит при плотности энергии больше $(1-2)$ Дж/см².

Максимальная энергия переносимая выведенным МИП составляет 550 Дж, что составляет 60% энергии рассеянной в диоде. Остальная часть 450 Дж приходилась на электронный ток 250 Дж, а также на потери ионов на боковых стенках катушек.



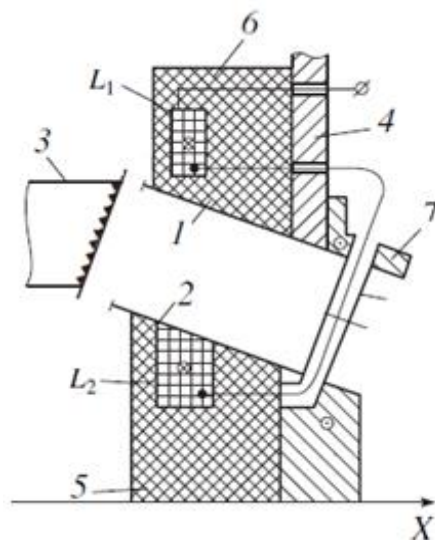
1 — корпус диода; 2 — алюминиевый анод; 3 — катод; 4 — коаксиальные катушки магнитного поля; 5 — сходящийся кольцевой ионный пучок; 6 — калориметр с профилированной поверхностью приемного коллектора; 7 — эпоксидный слой - источник анодной плазмы; 8 — пояс Роговского; 9 — пояс Роговского (полный ток диода); 10 — нейтрализующая сетка

Рисунок 2 – Схема магнитно-изолированного диода (МИД)

Анод диода 3 был полым с перфорированной поверхностью, геометрическая прозрачность которого составляла 75%. В этом случае при заполнении плазмой А-К области формировалась равномерная эмиссионная поверхность. Конструктивные особенности А-К области позволили улучшить стабильность импеданса диода и, соответственно, параметров ионного пучка.

В работе [11] подробно рассмотрена конструкция ионный V_r -диод с «пассивным» источником плазмы. Диод питался от сильноточного

наносекундного ускорителя с согласующим выходным автотрансформатором ТЭУ-500. Данная конструкция (рисунок 3) характерна для большинства диодов данного типа.



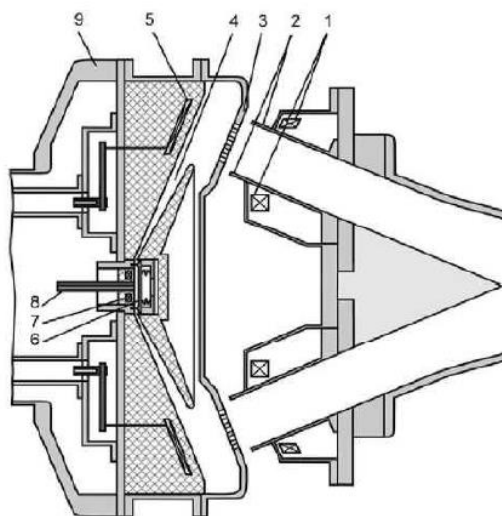
L_1 – внешняя катушка магнитного поля; L_2 – внутренние катушки магнитного поля; 1,2 катоды; 3 – анод; 4 – опорный диск; 5, 6 – каркас катушки;
7 – фланец

Рисунок 3 – Конструкция ионного диода с кольцевым анодом

Ионный диод содержит кольцевой анод 3 и два кольцевых конусообразных катода 1, 2. Анод изготовлен из материала с высокой проводимостью (медь, алюминий), радиусы колец $R_1 = 75$ мм, $R_2 = 55$ мм. Катоды выполнены из тонкой нержавеющей стали (0,8 мм) с большим удельным сопротивлением. Эмиссионная поверхность анода имеет кольцевые канавки, покрытые диэлектриком (полиэтилен или эпоксидный компаунд). Распределение магнитного поля должно быть таким, чтобы для замагниченных электронов поверхности равного потенциала по магнитному полю совпадали с эквипотенциальными поверхностями электрического поля при ускорении ионов в диоде, поэтому анод изготавливается из хорошо проводящего материала (медь, алюминий), как и фланец 7 которые также экранируют магнитный поток в области транспортировки ионного пучка.

При ускоряющем напряжении 350 кВ, и при длительности импульса напряжения 80 нс был получен МИП с плотностью тока 100 А/см². При энергии в формирующих линиях 180 Дж эффективность диода составило 60%.

В диодах с «активным» анодом эмиссия ионов осуществляется из предварительно созданной плазмы. В данных диодных системах, как правило, в качестве источника МИП используется предварительно ионизованный газ, что позволяет формировать МИП определенного массового состава. Схематично конструкция диода с активным анодом показана на рисунке 4[12].



- 1 – катушки изолирующего внешнего магнитного поля; 2 – полые конические катоды; 3 – анод; 4 – газовое сопло Лавалья; 5 – «ударная» катушка магнитного поля для ионизации газа; 6, 7 – импульсный газовый клапан;
8 – канал подача газа; 9 – держатель анода

Рисунок 4 – Устройство МИД с B_r -магнитным полем и с активным источником плазмы

Конструкция подобных диодов близка к конструкции диодов с «пассивным» анодом. Отличием является система инжекции газа, которая формирует сверхзвуковой газовой поток, направленный радиально наружу. Когда расширяющийся газ достигает положения «ударной» катушки 5, в области анода происходит ионизация газа вихревым электрическим полем катушки 5. Благодаря синхронизации инжекции газовой струи и возбуждения внешнего

магнитного поля относительно момента формирования импульса ускоряющего напряжения, был получен МИП состоящий в основном из протонов, с плотностью тока свыше 100 А/см^2 с общей площади анода 400 см^2 при ускоряющем напряжении (75–150) кВ, и длительности импульса 1 мкс. Данный диод обеспечивал до 700 срабатываний без замены основных деталей конструкции.

При исследовании подобной диодной системы авторы работы [13] установили, что плотность плазмы на аноде может достигать значения выше 10^{16} см^{-3} . В подобных ионных диодах плотность тока МИП, как правило, не превышает (100–150) А/см^2 , а плотность энергии пучка в фокусе достигает 8 Дж/см². Данные диодные системы работают в диапазоне давлений [14] в рабочей камере ($1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-5}$) мм. рт. ст. При давлении остаточного газа в вакуумной камере $1 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст., ток ионного пучка на 95% состоит из ионов используемого газа.

Ионные V_r -диоды с магнитным полем и «пассивным» анодом в сравнении с диодами с газовыми анодами позволяют получать ионные пучки с более высокой плотностью ионного тока и плотностью энергии, это связано с тем, что плотность плазмы поверхностного пробоя выше. Однако ресурс работы диэлектрических покрытий в таких диодах ограничен, что обуславливает их недолговечность.

1.2 Магнитная изоляция ионного V_r -диода внешним магнитным полем

Впервые идея использования магнитной изоляции в ионных диодах была выдвинута Винтербергом [15]. Сущность магнитной изоляции заключается в наложении на область А-К зазора внешнего (или собственного) магнитного поля (перпендикулярного к электрическому полю) такой величины, что оно подавляет прохождение через диод электронной компоненты тока (рисунок 5).

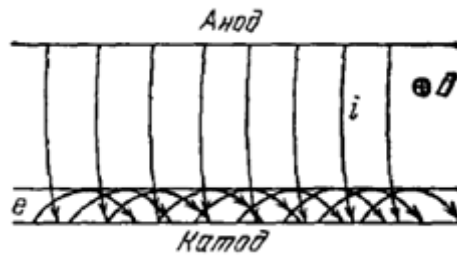


Рисунок 5 – Принципиальная схема дрейфовых электронных (e) и ионных потоков (i) в магнитно-изолированном диоде

При этом электронные потоки оказываются ограниченными в прикатодном слое, толщина которого зависит от внешних параметров — разности потенциалов, величины А-К зазора и магнитного поля. Благодаря значительно большей массе ионы, пересекающие А-К зазор, испытывают в поперечном магнитном поле лишь незначительное отклонение.

Роль магнитного поля заключается в ограничении потока электронов в прикатодной области и формировании виртуального катода. Режим работы МИД и параметры МИП зависят от конфигурации магнитного поля в области А-К зазора. Высокая эффективность генерации ионного тока в МИД достигается при выполнении нескольких условий [16]:

- строгая параллельность магнитных силовых линий в А-К зазоре поверхностям электродов, иначе возникают неоднородности ионного потока и локальные колебания его плотности;
- отсутствие в пределах А-К зазора силовых линий пересекающих как анод, так и катод, либо формирование максимально возможной протяженности силовых линий, пересекающих оба электрода и металлические части их держателей, и минимальной напряженности магнитного поля на поверхности катода в области пересечения с этими линиями;
- замкнутость внутри А-К зазора траекторий дрейфа в скрещенных электромагнитных полях ($E \times B$) электронного потока, незамкнутый дрейф приводит к локальному накоплению электронного заряда и срыву его на анод.

Общим критерием, определяющим возникновение магнитно-изолированного потока электронов независимо от геометрии А-К зазора диода, является критическое магнитное поле $B_{кр}$. Критическая величина магнитного поля зависит от геометрии самого МИД и приложенной разности потенциалов, геометрии изолирующего магнитного потока, его сохранения в А-К зазоре, времени его включения и характера нарастания.

Магнитная изоляция электронного тока наступает при величине магнитного поля в А-К зазоре превышающей критическое значение индукции магнитного поля $B > B_{кр}$ [17]. Для ионных B_f -диодов с замкнутым дрейфом электронов критическое значение индукции магнитного поля $B_{кр}$ не является четко определенной функцией величины А-К зазора диода и ускоряющего напряжения. Критическое значение индукции магнитного поля определяется как:

$$B_{кр} = \left(\frac{r_f}{r_i} \right) \cdot [2eUm c^2 + (eU)^2]^{1/2} / edc, \quad (1)$$

где r_i – начальный радиус электрона в м,

r_f – радиус, при котором электрон попадает на анод в м,

U – напряжение на аноде в вольтах,

c – скорость света в м/с,

m и e – масса и заряд электрона соответственно в кг и в Кл,

d – величина А-К зазора в м.

При отсечке электронов от анода с помощью магнитного поля замагниченные потоки электронов находятся в определенных состояниях, условия существования и устойчивость которых в значительной степени определяют эффективность генерации пучка ионов. Эффективность генерации МИП зависит от характера дрейфа электронного потока в скрещенных электрических и магнитных полях в А-К зазоре и общей величины электронных утечек. Последние становятся доминирующими при наличии в А-К зазоре силовых линий, пересекающих одновременно оба электрода, что обусловлено протеканием вдоль них электронного тока, нагружающего диод. Дрейф вдоль

незамкнутых траекторий приводит к срыву прикатодного электронного потока на краю катода, сопровождаемому локальными осцилляциями плотности электронов и генерацией СВЧ излучения. Не параллельность поверхностей электродов МИД магнитным силовым линиям может приводить к нарушению однородности ионного потока и локальным колебаниям его плотности в 2 - 5 раз.

Механизм работы ионного диода основан на создании электронного облака (э.о.), выполняющего роль катода в диоде. Накопление заряда в э.о. происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях. Накапливаемые носители заряда совершают замкнутое азимутальное дрейфовое движение по циклоиде у поверхности анода, которое обеспечивается радиально сходящимися линиями магнитной индукции двух обмоток, при незначительном радиальном дрейфе по радиусу вдоль поверхности анода. Траектории электронов в радиальном направлении представляют медленно сворачивающиеся спирали.

Согласно работе [18] величина ионного тока определяется различием давления магнитного поля у анода и катода, которое определяется направлением дрейфа электронного тока в А-К зазоре. Дрейфовое движение электронов изменяет конфигурацию магнитного поля в А-К зазоре усиливая поле у поверхности анода B_A и ослабляя магнитное поле B_K у кромок катодов (рисунок 6). Разница катод – анодного магнитного давления уравновешена импульсом потока ионов к катоду.

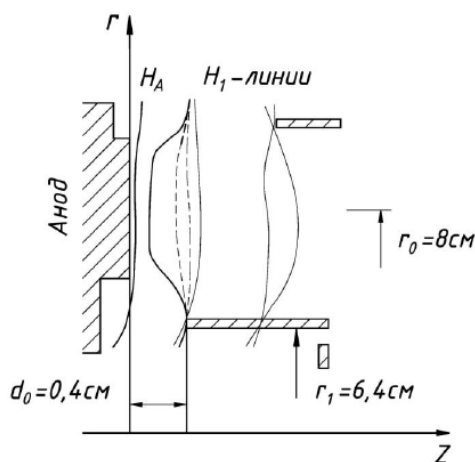
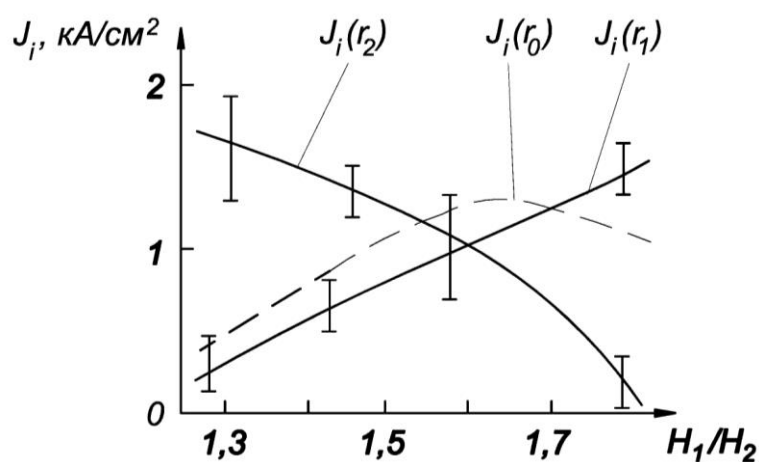


Рисунок 6 – Изменение магнитного поля за счет тока дрейфа электронов в МИД с полым катодом

В работе [18] исследовалась зависимость плотности ионного тока J_i от отношения напряженностей магнитного поля на внутреннем и внешнем катоде B_1/B_2 (рисунок 7).



$J_i(r_2)$ – плотность тока МИП у внешнего катода, $J_i(r_1)$ – плотность тока МИП у внутреннего катода, $J_i(r_0)$ – плотность тока МИП в средней точки между катодами

Рисунок 7 – Профили распределения плотности тока МИП J_i на расстоянии 1,5 см от анода

Величина B_1/B_2 определялась соотношением токов в катушках магнитного поля при заданном отношении величин А-К зазоров диода d_1/d_2 , где d_1 – зазор между анодом и кромкой внутреннего катода, d_2 – зазор между анодом и кромкой внешнего катода (рисунок 6). Согласно данной зависимости, радиальное распределение плотность ионного тока $J_i(r_0)$ имеет максимальное значение $J_i=1300$ А/см² при отношении $B_1/B_2 = 1,6$. В диапазоне изменения $B_1/B_2 = 1,3–1,6$ зависимость плотности ионного тока J_i является пологой, в этом случае эмиттером является кромка внешнего катода. При увеличении отношения $B_1/B_2 > 1,6$ эмиссия электронов, в основном, идет с кромки внутреннего катода. Оптимальное отношение B_1/B_2 , при максимальной плотности тока МИП J_i зависит от отношения d_1/d_2 . В данных экспериментах была получена лучшая однородность ионного пучка, когда эмиттером электронов была кромка внутреннего катода.

В работе исследовано влияние конфигурации магнитного поля в А-К зазоре на параметры ионного В_r-диода [19]. Конфигурация магнитного поля у поверхности анода определялась, в том числе положением катушек магнитного поля и соотношением их ампер-витков при сохранении магнитного потока постоянным. Соотношение ампер-витков катушек магнитного поля изменялось в диапазоне:

$$0,44 < IN_1/IN_2 < 0,56, \quad (2)$$

где N_1 – количество витков внешней катушки;

N_2 – количество витков внутренней катушки;

I – ток катушек. Число витков внешней катушки N_1 менялось от 11 до 14, число витков внутренней катушки оставалось постоянным $N_2 = 25$.

Распределение индукции магнитного поля вдоль поверхности анода и кромок внешнего и внутреннего катодов показано на рисунке 14. При заданном положении катушек магнитного поля изменение соотношения ампер-витков в большей степени влияло на распределение индукции вдоль поверхности анода, в области катодов распределение индукции магнитного поля изменялось не значительно. При соотношении ампер-витков $IN_1/IN_2 = 0,56$ у поверхности анода формировался «провал» магнитного поля, который был обусловлен влиянием наведенного вихревого тока в поверхностном слое анода.

Вследствие неоднородности распределения магнитного поля у поверхности анода, в данной области нарушается магнитная изоляция электронов. Поэтому формирование плазменного слоя на поверхности анода было не эффективным, т. е. уменьшается площадь эмиссионной поверхности.

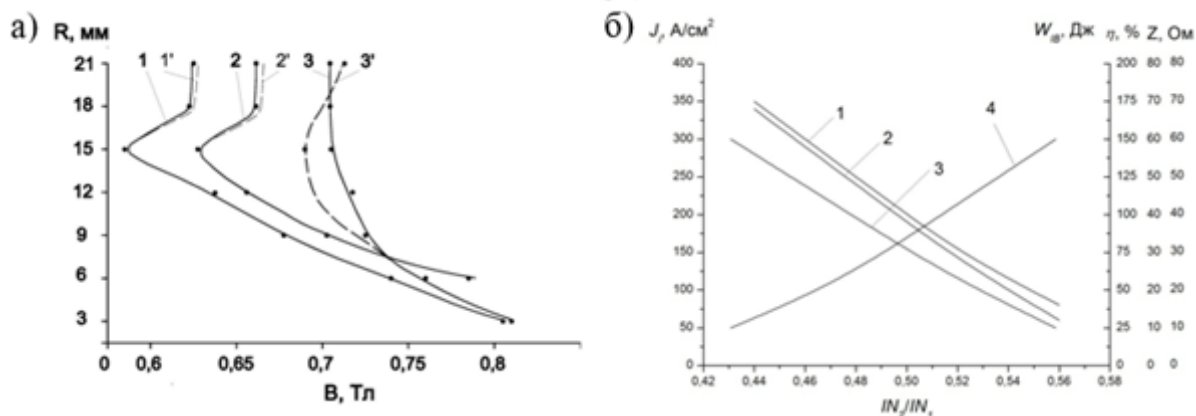


Рисунок 8 – Распределение индукции B магнитные поля в области А-К зазора (а): 1 и 1' – у эмиссионных кромок внутреннего катода, 2 и 2' – у эмиссионных кромок внешнего катода, 3 и 3' – на поверхности анода; зависимость параметров ионного диода от соотношения ампер-витков (б):
 1 – плотность ионного тока, 2 – энергия ионного пучка, 3 – эффективность преобразования энергии, 4 – импеданс диода

В результате, импеданс ионного диода возрстал до 60 Ом (рисунок 8, б) и энергия ионного пучка в фокальной плоскости снижалась до 25 Дж. Увеличение импеданса ионного диода также сопровождалось снижением эффективности работы диода до 14% и плотности ионного тока до 80 А/см².

В случае равномерного увеличения индукции магнитного поля вдоль поверхности анода с уменьшением радиуса (кривая 4, рисунок 8, б), импеданс диода соответствовал значению 10 Ом, и эффективность преобразования энергии диодом достигала 60% (кривая 3, рисунок 8, б). При этом плотность тока ионного пучка в фокальной плоскости диода была максимальной и составляла 350 А/см², энергия ионного пучка достигала значений 150 Дж. На единицу площади рабочей поверхности анода приходилось среднее значение энергии 1,4 Дж/см².

1.3 Транспортировка мощного ионного пучка к мишени

Одной из важнейших проблем, связанной с использованием мощных ионных пучков, является их фокусировка и транспортировка к мишени. Поскольку в результате расходимости МИП, изменяется плотность тока и энергия ионов, а также форма МИП.

Основными причинами расходимости МИП являются не скомпенсированный заряд МИП, плохая юстировка А-К узла, температура МИП на выходе ионного диода (включая начальную температуру плазмы), не скомпенсированный магнитный поток внешнего источника на участке транспортировки МИП к фокусу диода и не полная токовая компенсация МИП. Температура анодной плазмы зависит от способа ее образования, экспериментально установленные значения лежат в диапазоне единиц – десятков электрон-вольт.

Для сохранения формы ионного пучка его объемный заряд должен быть скомпенсирован зарядом электронов. Отсутствие полной компенсации заряда МИП приводит к появлению электрических полей с напряженностью 10^5 – 10^6 В/см, которые вызывают рассыпание ионного пучка на длинах порядка его поперечных размеров. Наиболее распространена «газовая» компенсация объёмного заряда в МИП. При столкновении положительных ионов пучка с атомами остаточного газа в вакуумной камере образуются электроны, и относительно медленные положительные ионы. Последние выталкиваются из пучка электрическим полем, а электроны накапливаются в нём, несмотря на то, что этому препятствуют кулоновские столкновения их с первичными ионами. Так достигается не полная, но значительная компенсация объёмного заряда в пучке положительных ионов.

Авторы работы [20, 21] произвели исследования расходимости МИП в ионном V_r -диоде с «пассивным» источником плазмы (рисунок 2). Эксперименты выполнялись на ускорителе «ВЕРА» с параметрами в согласованном режиме работы: напряжение на аноде 0,5 МВ, длительность импульса напряжения 80 нс,

ток МИП 18 кА, волновое сопротивление двойной формирующей линии (ДФЛ) 8 Ом. Для эффективной токовой нейтрализации вне области ускоряющего зазора размещались металлические сетки. В этом случае нейтрализация по току достигала 94 %, без использования сеток нейтрализация ионного пучка была на уровне 40 %. Это свидетельствует в пользу того, что в поперечном магнитном поле реализуется зарядовая нейтрализация МИП электронами, дрейфующими вдоль силовых магнитных линий; вне магнитного поля токовая нейтрализация реализуется электронами, вытягиваемыми из металлической сетки в пучок в результате ионно-электронной эмиссии.

Также были выполнены измерения направления траекторий ионов МИП с помощью камеры Обскура, которая устанавливалась на трех различных расстояниях от анода (12, 15 и 19 см). Средние значения углов сходимости МИП лежали в диапазоне от 35° до 15° для внутренних и внешних областей поперечного сечения МИП соответственно. По результатам исследований установлено, что внешняя граница МИП испытывает наибольшее отклонение от направления движения. Основная часть ионов МИП фокусировалась в фокальной плоскости диаметром 50 мм на расстоянии 15 см от анода.

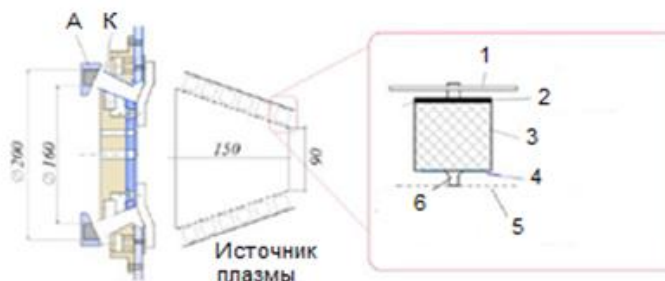
В результате установлено, что наиболее существенным фактором, который влияет на предельную степень фокусировки МИП, является неполная зарядовая нейтрализация (99,6%) и неудовлетворительная юстировка А-К узла. Второстепенную роль играет прохождение ионным пучком не скомпенсированного магнитного потока на выходе из диода.

Необходимо отметить, что использование «быстрых» магнитных полей, время диффузии которых внутрь проводящих электродов диодной системы значительно превосходит длительность импульса тока, позволяет увеличить степень баллистической фокусировки ионного пучка в $r_a/2d$ раз (r_a –радиус анода, d –диаметр пучка) по сравнению со случаем «медленных» полей, проникающих за катодное пространство. Это связано со значительным уменьшением длины транспортировки ионного пучка в не скомпенсированном магнитном потоке.

Магнитная изоляция может быть создана при пропускании тока, через электроды диода.

Еще одним способом нейтрализации положительного заряда МИП является использование дополнительного источника плазмы. Этот метод оказался весьма эффективным для вывода МИП из пинч-диода, в котором большие собственные магнитные поля могут приводить к токовой декомпенсации МИП.

Для нейтрализации положительного заряда МИП в работе [22] применялся дополнительный источник плазмы. Эксперименты выполнялись на ускорителе ТЕМП-4М с ионным V_r -диодом с «пассивным» источником плазмы со следующими параметрами: ток МИП 10 кА, энергия ионов 370 кэВ, длительность импульса напряжения 100 нс. В качестве источника плазмы использовался электрический разряд по поверхности пьезокерамики $BaTiO_3$ с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 900-1000$. Схема эксперимента показана на рисунке 9.

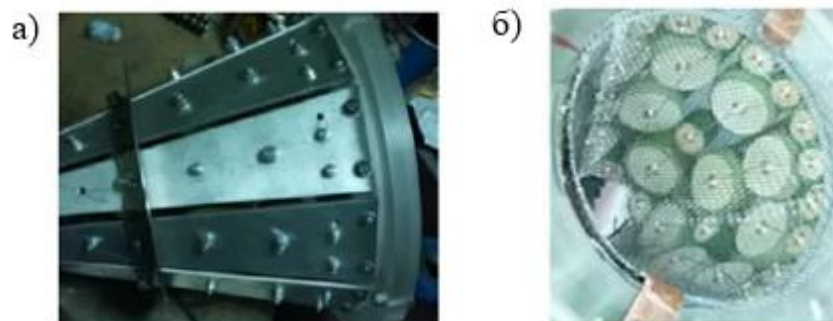


А – анод; К – катод; 1 – высокое напряжение; 2 - электрод, 3 – титанат бария; 4 – плазма; 5 - заземленная сетка; 6 – металлический контакт

Рисунок 9 – Схема эксперимента

Источник плазмы представлял собой полый конус из набора параллельно включенных конденсаторов на основе керамики $BaTiO_3$, который устанавливался на участке транспортировки МИП (рисунок 10). Сетка на внутренней поверхности конуса объединяла все конденсаторы и имела нулевой потенциал. Под действием импульса напряжения (17 кВ, 4 мкс) на внешнем электроде на поверхности керамики формировался разряд, начинающийся в

тройной точке металл – керамика – вакуум. Генерируемая плазма заполняла внутреннюю область между сеткой и конденсаторами вдоль всего участка транспортировки МИП, электроны из плазмы вытягивались в область МИП. Плотность плазмы вблизи заземленной сетки источника составляла $>10^{10}$ см⁻³.



а) - внешний высоковольтный электрод; б) - область образования плазмы

Рисунок 10 – Конический плазменный источник

В качестве мишени использовался медный калориметр диаметром 1,5 см для измерения полной энергии ионного пучка на разных расстояниях от диода (5 см, 8 см и 11 см). В результате нейтрализации заряда МИП плотность энергии ионного пучка в фокальной плоскости увеличивалась в 2 раза. Изменение плотности энергии ионного пучка показано на графике и дозиметрической пленке (рисунок 11).

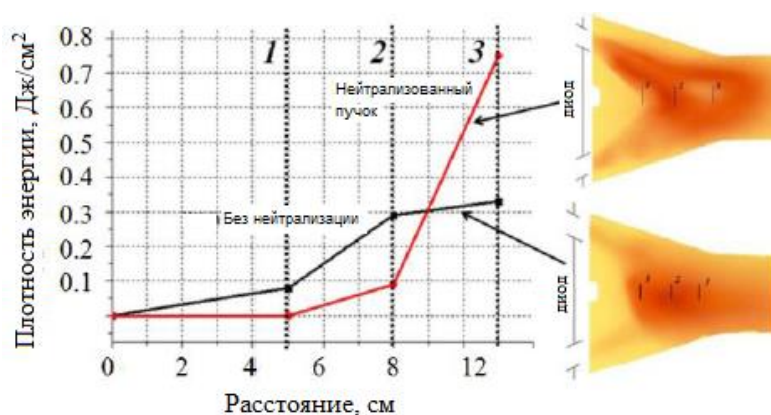


Рисунок 11 – Результаты эксперимента

Наиболее эффективным способом получения необходимой плотности мощности МИП является сжатие ионного пучка со скомпенсированным зарядом сильным магнитным полем. В работе [23] использовался комбинированный

метод фокусировки МИП, который состоял в баллистической фокусировке и магнитном сжатии. Схема формирования ионного пучка показана на рисунке 12.

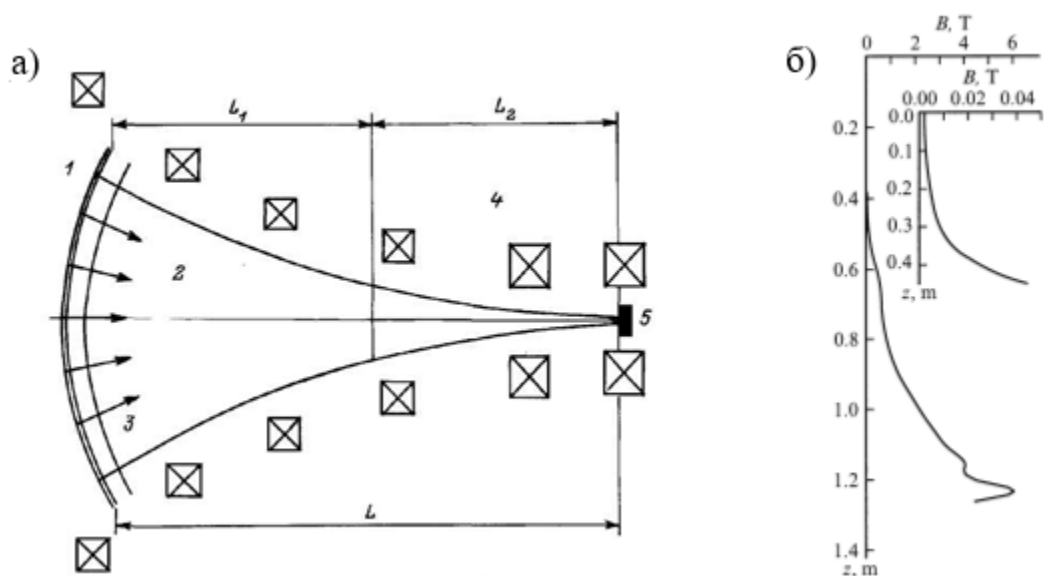
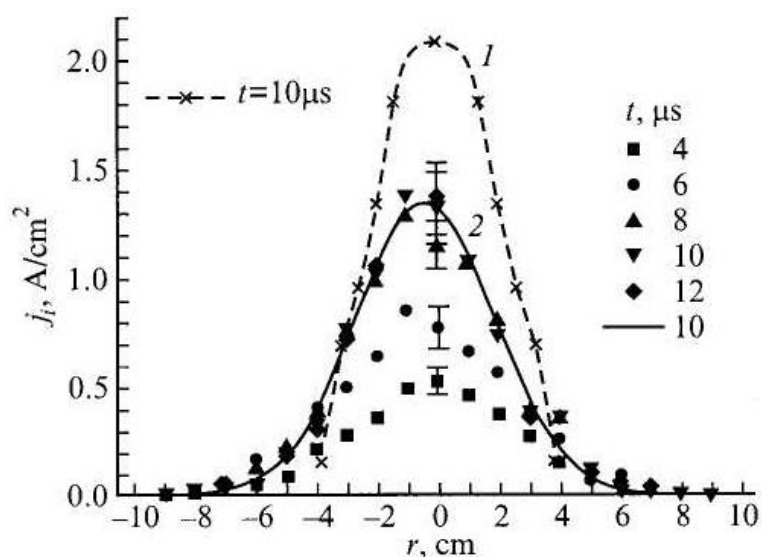


Рисунок 12 – Схема фокусировки протонного пучка (а): 1 – анод, 2 – протоны, 3 – катод, 4 – магниты, 5 – мишень, L – длина канала фокусировки (2 м);
распределение индукции магнитного поля на оси пучка (б)

Для генерации МИП использовался диод с многоострийным взрывоэмиссионным катодом и десорбционным анодом. Ионный пучок инжектировался вдоль сходящихся силовых линий магнитного поля. Компенсация объемного заряда осуществлялась при прохождении пучка через катод – сетку. Ионный пучок состоял из протонов и имел следующие параметры: энергия протонов (10–30) кэВ, длительность импульса более 10 мкс, плотность мощности 10 МВ/см², плотность тока ионов (0,3–1) кА/см². Конфигурация магнитного поля была максимально приближена к траектории ионов (рисунок 12, б). В конце первого участка L_1 при нарастании индукции магнитного поля ионы эффективно замагничивались, на втором участке L_2 индукция магнитного поля нарастала адиабатически до величины 4,5 Тл.

На рисунке 13 показано распределение плотности тока в области баллистического фокуса при наличии и отсутствии магнитного сжатия.



1 – при наличии внешнего магнитного поля; 2 – при отсутствии внешнего магнитного поля

Рисунок 13 – Распределение плотности тока в плоскости баллистического фокуса

Внешнее магнитное поле (в зависимости от длительности) улучшает фокусировку пучка. По результатам исследований плотность тока МИП увеличивалась с $1,3 \text{ A/cm}^2$ до $2,1 \text{ A/cm}^2$. Коэффициент компресии по площади составил больше $1,6 \cdot 10^3$, пучок сжимался с площади на аноде 10^4 cm^2 до $(19,6-28) \text{ cm}^2$ в баллистическом кроссовере. Максимальная эффективность фокусировки составляла 70%.

В работе [24] для фокусировки ионного пучка так же использовали внешнее магнитное поле. Исследования проводились на ионном V_r -диоде без баллистической фокусировки (рисунок 14). Питание ионного диода осуществлялась генератором Маркса с выходным сопротивлением 3 Ом. Анод диода был изготовлен из акрилата с медными иглами. Внутренний и внешний диаметр анода составлял (3,6 и 9) см соответственно, величина А-К зазора была равна 10 мм, полный ток диода лежал в диапазоне 50 кА. Изоляция А-К зазора вокруг центрального стержня осуществлялась азимутальным магнитным полем, электроны осуществляли дрейфовое движение в радиальном направлении. Анодная плазма создавалась поверхностным разрядом на аноде. Вывод ионного

пучка осуществлялся в камеру дрейфа через отверстия в катоде. Компенсация объемного заряда пучка осуществлялась за счет ионно-электронной эмиссии при прохождении через катод. Камера дрейфа имела диаметр 93 мм и была выполнена из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм, и устанавливалась внутри стеклянной вакуумной трубки с наружным диаметром 100 мм.

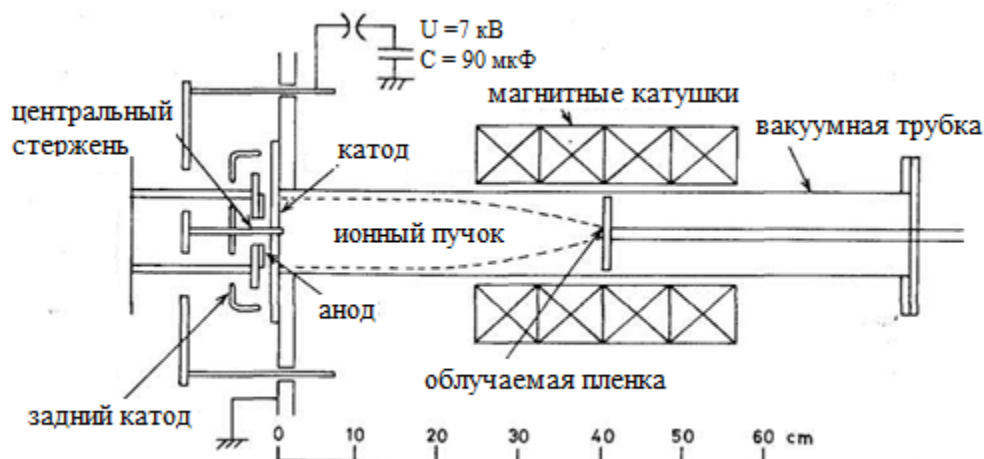


Рисунок 14 – Схема установки

Интенсивный импульсный ионный пучок (энергия больше 50 кэВ, плотность тока МИП 80 А/см^2 , длительности импульса 400 нс) инжектировался в осевом направлении в сильное магнитное поле. Магнитное поле создавалось соленоидом, состоящим из четырех катушек с размерами: внутренний диаметр 14 см, наружный диаметр 24 см, длина 5,5 см. Время нарастания индукции магнитного поля составляло (3 – 4) мс до величины 2,2 Тл (на расстоянии 40 см от диода). Давление в вакуумной камере $5 \cdot 10^{-5}$ Торр, угол расходимости пучка составлял от 3° до 6° .

При нулевом магнитном поле было получено почти плоское распределение плотности ионного тока, величина плотности ионного тока составляла 80 А/см^2 (рисунок 15). При приложении магнитного поля $B = 1,6 \text{ Тл}$, средняя плотность ионного тока увеличивалась до 130 А/см^2 в центре пучка.

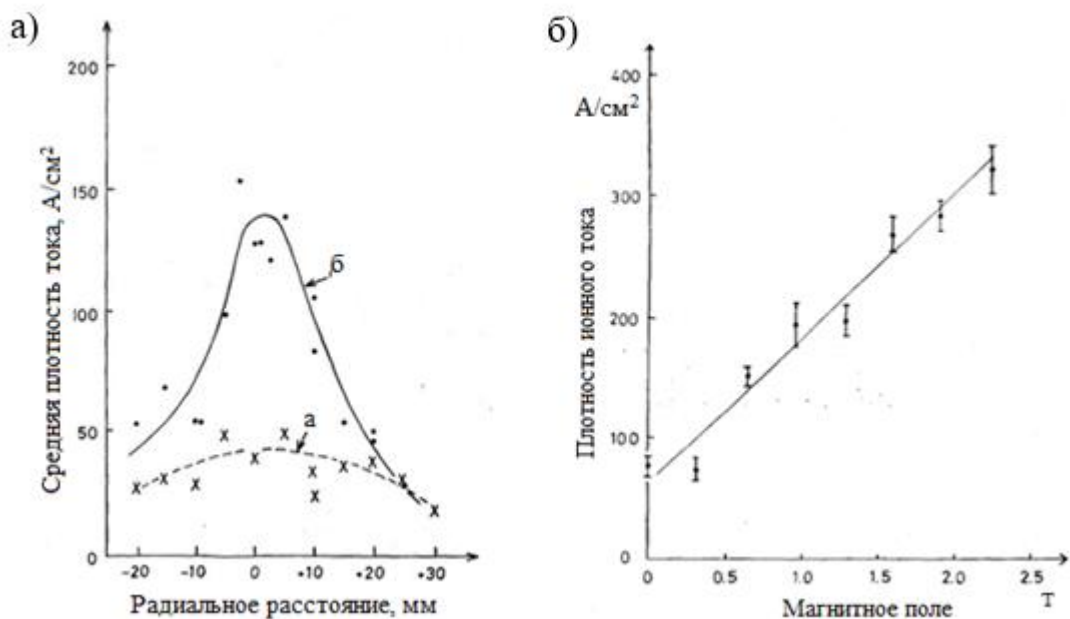


Рисунок 15 – Распределение плотности ионного тока по сечению пучка при отсутствии и при приложении магнитного поля $B = 1,6$ Тл (а), зависимость плотности ионного тока от индукции магнитного поля на оси МИП на расстоянии 40 см от диода (б)

При максимальном поле плотность тока на оси ионного пучка (на расстоянии 40 см от диода) увеличилась в четыре раза до $320 A/cm^2$. Эффективное сжатие МИП достигалось магнитным полем с индукцией больше $0,8$ Тл, ионный пучок распространялся на дистанцию 50 см без потерь энергии. При величине поля $0,4$ Тл давление магнитного поля было уравновешено давлением ионного пучка в поперечном направлении, сжатия пучка не происходило.

На рисунке 16 показаны отпечатки МИП на пленке Polaroid после серии импульсов. Для ослабления МИП поверхность пленки была покрыта одной или двумя тонкими металлическими сетками с прозрачностью 78% и 39%, соответственно. Величина катушек магнитного поля $B_{кат} = 1,6$ Т.

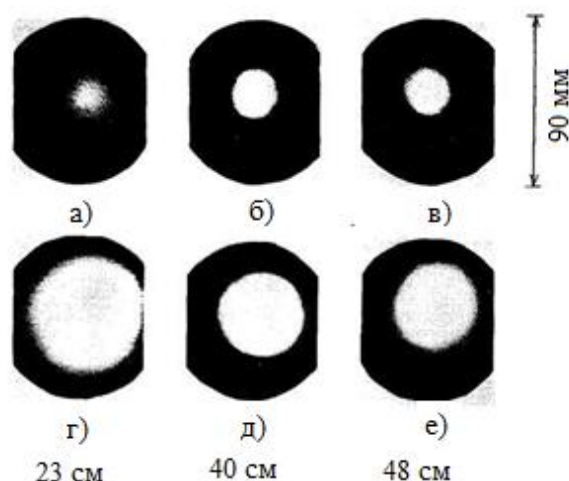


Рисунок 16 – Следы облучения пленки на разных расстояниях от диода (23,40,48) при приложении магнитного поля $B_{кат} = 1,6$ Т: (а) –(в) –на пленку нанесена сетка; (г) - (д) – пленка без сетки

С увеличением индукции магнитного поля до 1,6 Тл на расстоянии 40 см диаметр отпечатка МИП не значительно уменьшался с 6,5 см до 4,5 см (рисунок 16 (г-е)). При этом (рисунок 16 (а-в)) наблюдалось, увеличение плотности тока МИП с увеличением магнитного поля. Это свидетельствует о том, что увеличение тока в центре пучка происходит из-за сжатия пучка магнитным давлением.

Выводы

Анализ литературных данных показал, что в работах, посвященных ионным диодам с B_r -магнитным полем, подробно изучены особенности магнитной изоляции, рассмотрены различные модели работы данных диодов, и исследованы параметры диодов и ионных пучков.

В ионных диодах с изоляцией радиальным магнитным полем (B_r -диоды) в качестве источника МИП используется предварительно ионизованный газ либо диэлектрик. Однако использование ионизованного газа требуется дополнительной системы для инъекции газа, диэлектрические покрытия имеют ограниченный ресурс работы. В связи с этим представляет научный и практический интерес проведение исследований генерации ионного пучка с

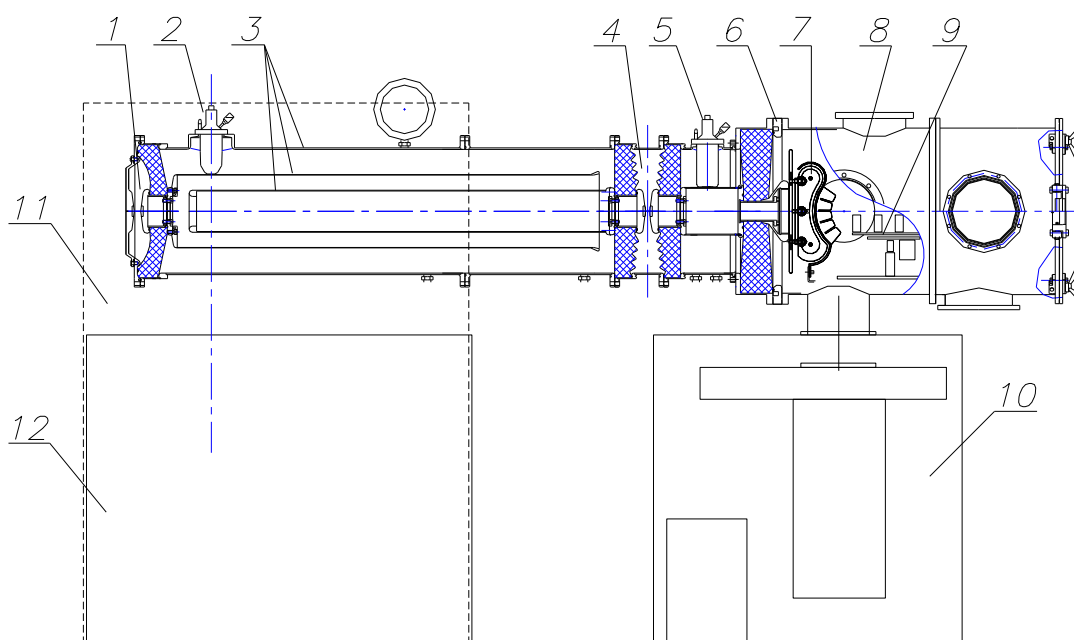
использованием разных материалов для получения ионных пучков различного массового состава.

Авторами работ, в которых основное внимание было уделено транспортировке и фокусировке ионного пучка к мишени было определено, что для эффективной работы ионного диода необходимо обеспечить зарядную и токовую нейтрализацию пучка, юстировку диодного узла. Применение сторонних магнитных полей и использование предварительно созданной плазмы являются решением данной проблемы. Однако эти способы требуют дополнительных источников, в виде источника плазмы и источника магнитного сжатия.

2 Экспериментальная установка и диагностическое оборудование

2.1 Сильноточный импульсный ионный ускоритель «ТЕМП»

Исследования проводились на сильноточном ионном ускорителе «ТЕМП-4М» [25]. Ионный ускоритель «ТЕМП-4М» построен по схеме (рисунок 15), включающей в себя генератор импульсного напряжения (ГИН) собранный по схеме Аркадьева-Маркса, источник питания высоковольтного напряжения ИРИС-6 для зарядки конденсаторов ГИНа, двойная формирующая линия (ДФЛ), ионный магнитно-изолированный диод, расположенный в вакуумной камере, систему питания катушек магнитного поля (на рисунке 17 не показана).



1, 4 – газовые разрядники; 2, 5 – делители напряжения; 3 – ДФЛ; 6 – пояс Роговского; 7 – магнитоизолированный диод; 8 – вакуумная камера; 9 – мишенный узел; 10 – вакуумная система; 11 – генератор импульсных напряжений (ГИН); 12 – система газоподдачи и водоподготовки

Рисунок 17 – Схема ускорителя

Источник питания формирует постоянное напряжение до (30–60) кВ и служит для электрической зарядки конденсаторов ГИН Аркадьева-Маркса. ГИН состоит из восьми ступеней конденсаторов ИК 100-0,4 (0,4 мкФ, 100 кВ).

Собственная индуктивность ГИН составляет 7,5 мкГн. ДФЛ изготовлена в виде трех коаксиальных труб (ДФЛ) с жидким диэлектриком (водой) удельное сопротивление которой составляет $(1-10) \cdot 10^6$ Ом·см. Волновое сопротивление ДФЛ 5 Ом, электрическая длина 80 нс. Генератор импульсного напряжения (ГИН) коммутирован со средним электродом ДФЛ. Для коммутации используют газовые разрядники на сжатом газе (азот, либо смесь элегаза и азота).

Внешний вид ускорителя представлен на рисунке 18. Ускоритель дополнительно оснащен вакуумной системой на основе диффузионного насоса НВДМ-250, который обеспечивает давление в вакуумной камере 10^{-5} мм. рт. ст., объем вакуумной камеры 250 л.

Также в состав ускорителя входят система газоподготовки, которая поддерживает давление в разрядниках и ГИНе на требуемом уровне, и система водоподготовки на основе ионообменных смол.



Рисунок 18 – Фотоснимок ионного ускорителя ТЕМП – 4М

Данный ионный ускоритель может работать как в одноимпульсном (положительный импульс), так и в двухимпульсном режиме. В двухимпульсном режиме в отрицательном импульсе напряжения образуется взрывоэмиссионная

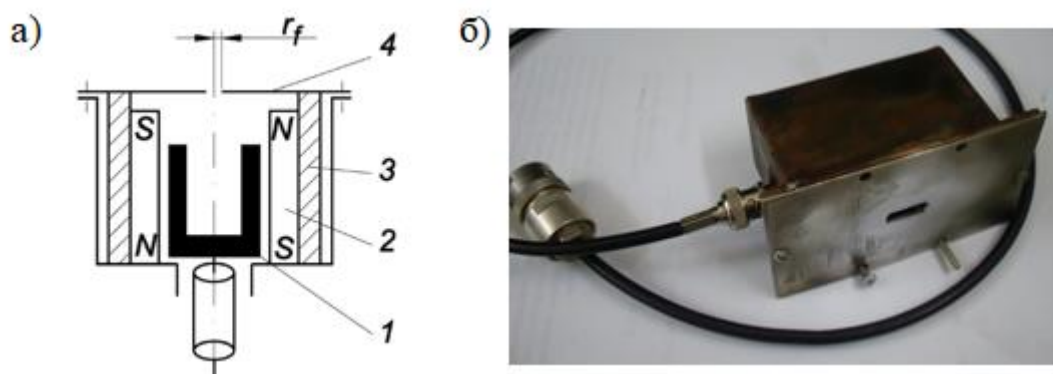
плазма на поверхности потенциального электрода в диоде, во втором – положительном, происходит ускорение ионов из образованной плазмы [26, 27].

При двухимпульсном режиме ускоритель работает данным образом. ГИН заряжает емкость ($C_1=14$ нФ), средним электродом ДФЛ и корпусом ускорителя. Емкость внутреннего электрода ДФЛ относительно среднего электрода ($C_2=10$ нФ) на много больше паразитной емкости внутреннего электрода ДФЛ относительно корпуса, следовательно, потенциал внутреннего электрода приблизительно равен потенциалу среднего электрода. Когда на предварительном газовом разряднике достигается пробивное напряжение, происходит срабатывание разрядника и зарядка емкости между внутренним и средним электродами ДФЛ. Зарядка совершается через предварительный газовый разрядник и диод. При этом на диоде образуется импульс отрицательного напряжения ((300 – 600) нс, (100-150) кВ). В течение первого импульса на поверхности потенциального электрода диода образуется взрывоэмиссионная плазма. Пробивное напряжение основного разрядника выше, чем у предварительного разрядника, и его пробой происходит через паузу, контролируемую давлением газа в основном разряднике. В течение паузы происходит дополнительная зарядка емкостей среднего электрода относительно корпуса и внутреннего электрода ДФЛ. После срабатывания основного газового разрядника генерируется второй импульс напряжения положительной полярности (150 нс, (250 - 300) кВ). В течение второго импульса из взрывоэмиссионной плазмы формируется пучок ионов, который ускоряется в А-К зазоре.

2.2 Диагностическое оборудование

Напряжение на потенциальном электроде контролировали резистивным делителем напряжения, установленным в диодной камере, и высокочастотным высоковольтным делителем, установленным перед диодным узлом. Для измерения полного тока диодного узла использовали пояс Роговского (ПР) с обратным витком. Пояс Роговского позволяет измерять ток косвенным методом

без непосредственного включения измерительного преобразователя в цепь. Датчик представляет собой длинный замкнутый соленоид произвольной формы с равномерно намотанной обмоткой. Плотность ионного тока измеряли коллимированным цилиндром Фарадея (КЦФ) с магнитной отсечкой электронов. КЦФ представляет собой коллектор для сбора заряда и отверстие определенного диаметра, в которое проникает исследуемый пучок частиц и попадает на коллектор. Для измерения заряда пучка прикладывается магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны движению частиц пучка (ионов и электронов). Так как масса ионов намного больше массы электронов, то воздействующее поперечное магнитное поле отклоняет электроны, не давая попадать им на катод. Таким образом, цилиндр Фарадея регистрирует заряд положительно заряженных частиц. На рисунке 19 (а) представлено схематическое изображение конструкции КЦФ. Корректность измерений КЦФ определялась радиусом входного отверстия r_f диафрагмы 4.



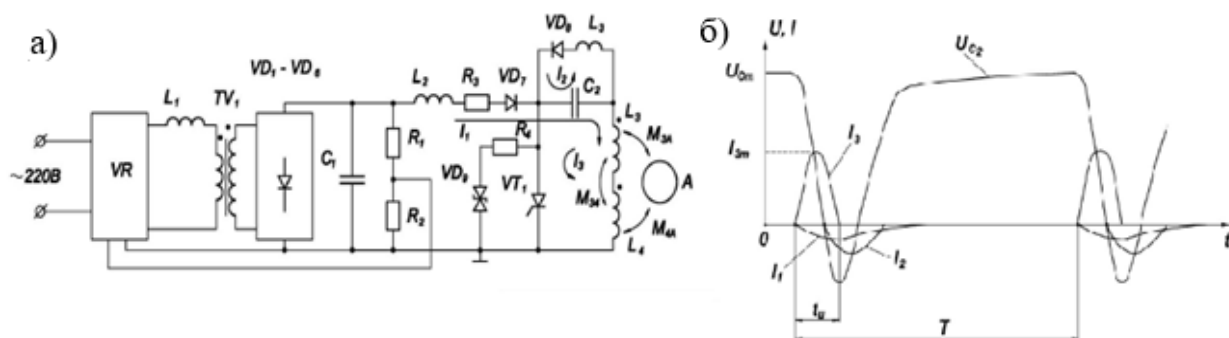
1 – коллектор, 2 – постоянные магниты, 3 – магнитопровод, 4 – диафрагма

Рисунок 19 – Схема (а) и внешний вид (б) КЦФ

Внешний вид КЦФ с магнитной отсечкой электронов представлен на рисунке 19 (б). Основной регистрирующей аппаратурой, применявшейся в ходе выполнения экспериментов, были скоростные 2-х, 4-х каналные осциллографы «Tektronix» 3052В и «Tektronix» 2024 с временным разрешением (500–200)МГц.

2.3 Источник питания катушек магнитного поля

Для обеспечения магнитной изоляции ионного диода был использован источник импульсного питания катушек магнитного поля [28]. Электрическая схема источника и эюры токов и напряжений приведены на рисунок 20.



TV₁ – сетевой трансформатор, L₂ и C₁ – фильтр напряжения, VD₁ – VD₆ мостовой выпрямитель напряжения по схеме Ларионова, R₁ и R₂ – делитель напряжения, L₁ – зарядная индуктивность, VD₇ – обратный диод, C₂ – емкостной накопитель энергии, L₂ и VD₈ – цепь рекуперации энергии, VT₁ и VT₂ – коммутирующие тиристоры, VD₉ и VD₁₀ – ограничители напряжения, R₄ – токоограничивающий резистор, L₃ и L₄ – катушки магнитного поля, А – анод ионного диода

Рисунок 20 – Принципиальная электрическая схема питания катушек магнитного поля МИД (а) и эюры токов и напряжений (б)

Основными элементами схемы являются емкостной накопитель C₂, согласно включенные катушки магнитного поля 3 и 4, анод А ионного диода и коммутирующий тиристор VT₁.

Энергия емкостного накопителя C₂ используется для создания радиального магнитного поля определенной конфигурации в А-К зазоре ионного диода. Конфигурация наводимого катушками 3 и 4 магнитного поля определяется геометрией А-К зазора и положением катушек относительно анода А, и их параметрами. Емкостной накопитель C₂ заряжается от трехфазной сети переменного тока через мостовой выпрямитель (диоды VD₁-VD₆), фильтр

напряжения L_1 и C_1 до напряжения U_{cm} (ток I_1). Напряжение заряда U_{cm} емкостного накопителя C_2 задается регулятором напряжения VR в диапазоне (0,3– 3) кВ. Запасаемая энергия в емкостном накопителе C_2 достигает 900 Дж.

Дроссель L_1 исключает режим короткого замыкания в первый момент времени при заряде C_1 и ограничивает скорость нарастания тока I_1 . Регулятор напряжения VR стабилизирует напряжение на конденсаторе фильтра C_1 по сигналу обратной связи с делителя напряжения R_1 и R_2 . С приходом запускающего импульса включается тиристор VT_1 , и начинается разряд емкостного накопителя C_2 (ток I_3). Для защиты тиристора от импульсных перенапряжений при разряде C_2 служат ограничитель напряжения VD_9 и токоограничивающий резистор R_4 . Перезаряд C_2 осуществляется через цепь рекуперации энергии: индуктивность L_2 , диод VD_8 (ток I_2). Диод VD_7 препятствует прохождению обратной полуволны тока разряда C_2 в зарядную цепь улучшая процесс рекуперации энергии.

Магнитное поле формируется на первой полуволне тока разряда I_3 емкостного накопителя C_2 . При достижении током I_3 максимального значения I_{3m} к диоду прикладывается импульс ускоряющего напряжения, длительность которого на полувывсоте составляет 100 нс (рисунок 21).

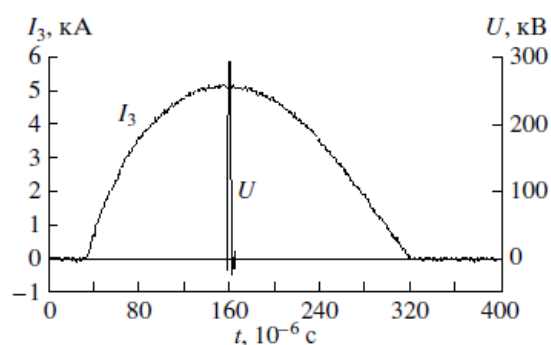


Рисунок 21 – Полуволна тока разряда I_3 емкостного накопителя и ускоряющее напряжение U

В ионном Vr -диоде с внешним магнитным полем во время действия биполярного импульса напряжения магнитное поле остается постоянным, так как импульс тока в катушках магнитного поля многократно превышает

длительность напряжения. В момент достижения тока в катушках магнитного поля максимального значения к диоду прикладывается импульс ускоряющего напряжения. В течении данного импульса ускоряющего напряжения ток в катушках магнитного поля, а, следовательно, и индукция внешнего магнитного поля в А-К зазоре диода, остаются постоянными.

При частоте следования импульсов тока источника питания 10 имп/с эффективный ток в катушках равен $I_{3\text{эфф}}=187,6$ А. Для обеспечения условия отбора примерно постоянной мощности от питающей сети постоянная времени зарядной цепи (R_2, L_1, C_2, L_3, L_4) меньше периода следования импульсов и составляет 20 мс. Энергия импульсного магнитного поля составляет 750 Дж. Эффективность преобразования электрической энергии емкостного накопителя C_2 в энергию магнитного поля составляет 83%, мощность источника питания 9 кВт.

2.4 Измерение плотности энергии с помощью калориметра

Для расчета распределения энергии пучков заряженных частиц в поперечном сечении широко используют калориметрические методы. Впервые калориметрический метод для расчета параметров МИП был использован в 1976 году в работе английских ученых С.Е. Christodoulides и J.H. Freeman [29].

Калориметрия – это совокупность методов и средств измерения тепловых эффектов, включающие различные физические, химические и биологические процессы. Физическая суть метода заключается в изменении сопротивления терморезисторов или термопары в результате нагрева поглощенной энергией пучка. Энергия пучка равна:

$$E=c \cdot m \cdot (T_1 - T_2), \text{ Дж} \quad (3)$$

где c -теплоемкость материала приемного коллектора пучка;

m - масса коллектора;

T_1 и T_2 – температура до и после попадания МИП на коллектор калориметра.

Калориметр – это специальный прибор, который определяет количества выделившейся (поглотившейся) теплоты в том или ином процессе.

Совокупность частей калориметра, между которыми распределяется все тепло, подлежащее измерению, называют калориметрической системой. Обычно калориметрические измерения состоят в наблюдении за изменением температуры калориметрической системы во время опыта. Термин «калориметрическая система» в целях сокращения условно заменяют термином «калориметр», который, таким образом, употребляется в двух смыслах.

Коллектор обычно делают из меди, которая имеет высокую теплоемкость и теплопроводность. Внешний вид калориметра представлена на рисунке 22.



Рисунок 22 – Медный калориметр

Перед проведением опыта была произведена калибровка калориметра. Калибровка проводилась по нагреву медной пластины. В зависимости от увеличения температуры пластины, регистрировались величины сопротивления. По полученным результатам калибровки была построена кривая зависимости величины сопротивления R терморезистора от температуры T (рисунок 23).

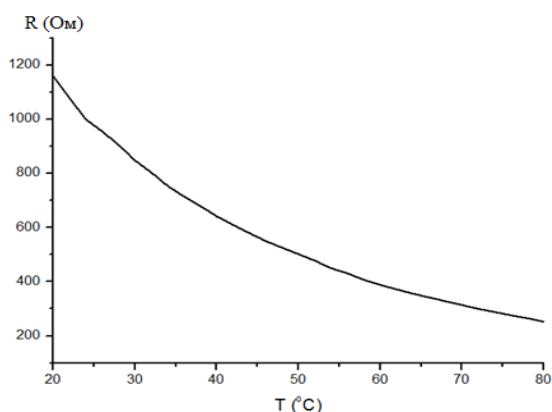


Рисунок 23 – График зависимости величины сопротивления R терморезистора от температуры T

3 Расчет параметров и разработка конструкции ионного V_r -диода

3.1 Расчет параметров ионного V_r -диода

Исходные данные для расчета параметров ионного диода (таблица 1) определены с учетом характеристик ускорителя ТЕМП-4М. В ходе расчета необходимо определить плотность тока и энергии ионного пучка, параметры магнитного поля, размеры и конструкцию ионного диода.

Таблица 1 - Исходные данные для расчета параметров ионного диода

Параметр	Значение
Импеданс диода Z , Ом	12
Ускоряющее напряжение U , кВ	350
Энергия, подаваемая на диод W , Дж	300
КПД диода η , %	60
Анод - катодный зазор d , мм	5
Массовый состав пучка, % (эмиссионное покрытие анода - полиэтилен)	Протоны 70%, ионы углерода 30%
Угол схождения пучка α°	45

Ток и напряжение ионного диода подчиняются закону Чайлда – Ленгмюра [30]. Данный закон задает вольт-амперную характеристику идеального диода – зависимость тока от напряжения в режиме ограничения тока пространственным зарядом. Плотность тока в диоде на основании данного закона записывается как:

$$j = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e \cdot K_i}{m}} \cdot \frac{U^{3/2}}{d^2}, \quad (4)$$

где ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость;

e и K_i – заряд электрона и кратность ионизации для ионов;

m – масса ускоряемой частицы;

U – потенциал анода, d – анод – катодное расстояние.

При использовании диэлектрика в качестве эмиссионного покрытия ионный ток состоит из протонов H^+ и однократно C^+ и двукратно C^{2+} ионизованных ионов углерода. В расчетах примем, что доля ионов углерода C^{2+} пренебрежимо мала в сравнении с ионами C^+ . На основании формулы (4) определим плотность тока ионов на поверхности анода. Для протонов H^+ :

$$j_{H^+} = \frac{4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{9} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1}{1,67 \cdot 10^{-27}}} \cdot \frac{(3,5 \cdot 10^5)^{3/2}}{(5 \cdot 10^{-3})^2} = 45 \text{ А/см}^2,$$

для ионов углерода C^+ :

$$j_{C^+} = \frac{4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{9} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1}{1,8 \cdot 10^{-26}}} \cdot \frac{(3,5 \cdot 10^5)^{3/2}}{(5 \cdot 10^{-3})^2} = 13,7 \text{ А/см}^2.$$

С поверхности кольцевого анода с эмиссионной поверхностью, ограниченной радиусами R_1 и R_2 , ток диода I в интегральном выражении записывается как:

$$I = B_{e,i} \frac{S}{d^2} U^{3/2}, \text{ кА} \quad (5)$$

где $B_{e,i}$ – коэффициент, который зависит от сорта заряженной частицы. Для электронов $B_e=2,33$, для протонов $B_p=5,3 \cdot 10^{-2}$, для ионов углерода $B_{C^+}=1,5 \cdot 10^{-2}$, для ионов $B_{C^{++}}=2,1 \cdot 10^{-2}$.

U – потенциал анода в МВ

Преобразовав уравнение (5), получим выражения для площади эмиссионной поверхности анода S :

$$S = \frac{I \cdot d^2}{B_{e,i} \cdot U^{3/2}} \quad (6)$$

Полный ток диода I включает ток электронов и ток ионов. На основании закона Ома ток диода I равен:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{350 \cdot 10^3}{12} = 30 \text{ кА}. \quad (7)$$

Площадь эмиссионной поверхности анода определим для каждой компоненты ионного тока. Для протонов H^+ :

$$S_{H^+} = \frac{0,7 \cdot 30 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{5,3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,35^2} = 47,7 \text{ см}^2, \quad (8)$$

для ионов углерода C^+ :

$$S_{C^+} = \frac{0,3 \cdot 30 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{1,5 \cdot 10^{-2} \cdot (0,35)^2} = 72,5 \text{ см}^2. \quad (9)$$

Общая площадь эмиссионной поверхности анода будет равна сумме площадей S_{H^+} и S_{C^+} :

$$S = S_{H^+} + S_{C^+} = 47,7 + 72,5 = 120,2 \text{ см}^2 \quad (10)$$

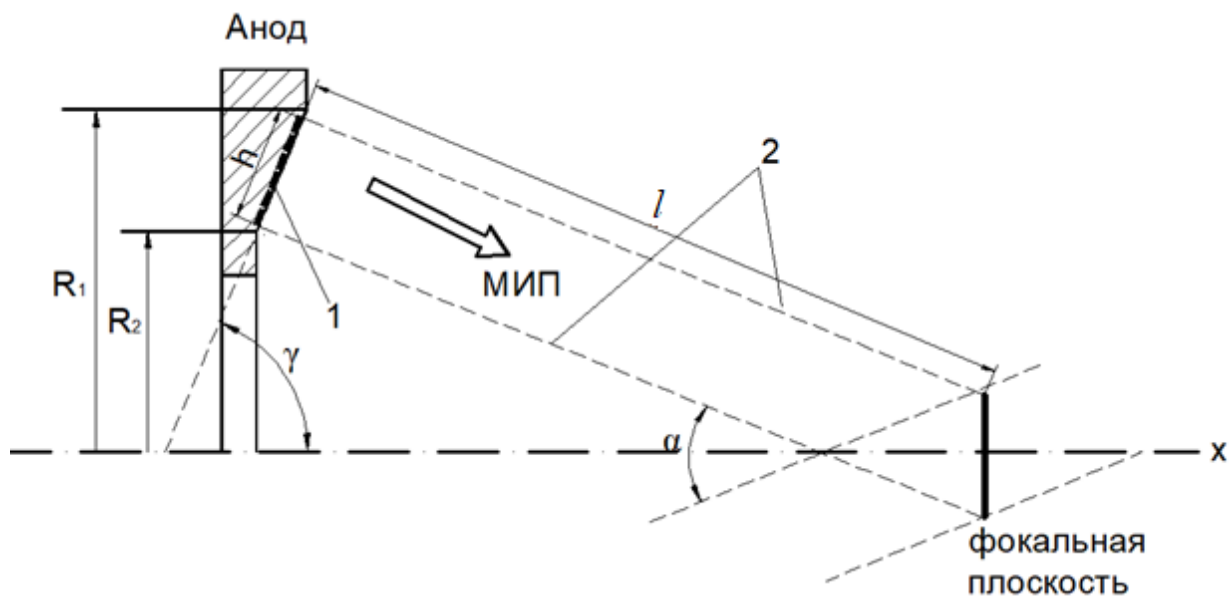
При формировании магнитного поля в А-К области диода имеет значение материал анода. Как правило, анод выполняется из хорошо проводящего немагнитного материала: алюминий или медь, для того, чтобы получить требуемое распределение магнитного поля, которое служит для замагничения потока электронов, эмитирующие с кромки катода.

Эмиссионная поверхность анода покрывается материалом, содержащим требуемый сорт атомов – будущих ионов пучка. В случае протонного пучка его эмиссионная поверхность покрывается водородосодержащим диэлектриком, залитым в кольцевые канавки, например, полиэтиленом или эпоксидным компаундом. Для получения ионов углерода анод покрывается графитом или С-тканью.

При расчете магнитного поля имеет значение выбор ширины эмиссионной поверхности анода (рисунок 24), так как от этого зависит расположение катушек магнитного поля относительно анода, и соответственно конфигурация магнитного поля. Экспериментально установлено, что ширина эмиссионной поверхности анода должна лежать в диапазоне $h \leq 20-25$ мм. В этом случае индукция магнитного поля с уменьшением радиуса анода равномерно возрастает. При ширине эмиссионной поверхности анода $h \geq 25$ мм в центральной области анода появляется «провал» магнитного поля, т. е. индукция уменьшается. Это приводит к нарушению магнитной изоляции анод – катодной области.

Конструкция анода показана на рисунке 24. Для обеспечения баллистической фокусировки ионного пучка эмиссионная поверхность анода имеет наклон к оси γ . При использовании полиэтилена в качестве эмиссионного

покрытия анод имеет канавки, которые заполняются диэлектриком. Глубина канавок составляет, как правило, (1–1,5) мм, ширина – (4–5) мм.

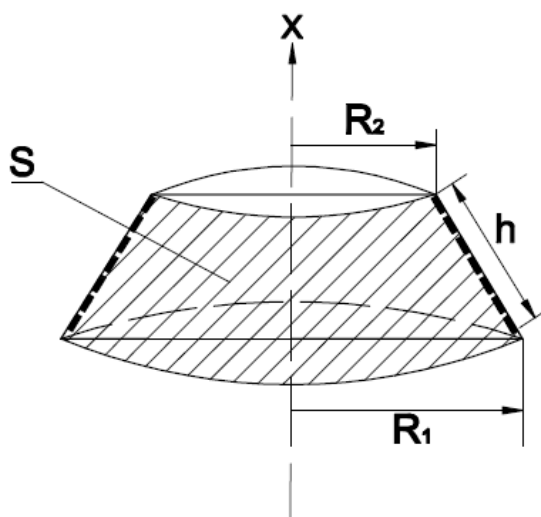


1 – эмиссионная поверхность анода, 2 – расчетная траектория ионов, h – ширина эмиссионной поверхности анода, R_1 – внешний радиус анода, R_2 – внутренний радиус анода, l – длина участка транспортировки ионов, α – угол схождения ионного пучка, γ – угол наклона эмиссионной поверхности анода к оси X

Рисунок 24 – Конструкция анода V_r -диода

В исследованиях по воздействию ионного пучка угол наклона эмиссионной поверхности γ определяет угол схождения пучка α и расстояние транспортировки ионного пучка до мишени L . В расчетах был выбран угол схождения пучка $\alpha = 45^\circ$, так как при величине угла $\alpha \ll 45^\circ$ расстояние между диодом и фокальной плоскостью будет недостаточным, чтобы установить между ними мишень. Когда угол $\alpha \gg 45^\circ$ увеличивается длина транспортировки ионного пучка, и в результате рассеяния пучка плотность тока на мишени будет значительно снижаться.

При расчете радиусов R_1 и R_2 площади эмиссионной поверхности S анод можно представить в виде усеченного конуса (рисунок 25).



R_1 – внешний радиус анода, R_2 – внутренний радиус анода, S – площадь эмиссионной поверхности анода, h – ширина эмитирующей поверхности

Рисунок 25 – Анод в виде усеченного конуса

Площадь эмиссионной поверхности анода:

$$S = \pi \cdot h \cdot (R_1 + R_2). \quad (11)$$

Ширину эмиссионной поверхности анода h зададим равной 22 мм. Преобразовав уравнение (10), можно определить внутренний радиус анода:

$$R_2 = \frac{S}{\pi \cdot h} - R_1, \text{ Ом} \quad (12)$$

При величине внешнего радиуса $R_1 = 100$ мм, величина внутреннего радиуса анода R_2 составит 80 мм.

Размер фокального области диода фактически определяется шириной эмиссионной поверхности анода h . Исходя из величины угла α и размеров анода можно определить длину участка L (теорема синусов):

$$l = \frac{R_1 - \frac{h}{2}}{\sin(22,5^\circ)}, \text{ мм} \quad (13)$$

Длина участка l составляет 230 мм. Диаметр фокальной области (без учета рассеяния пучка) составляет $\text{Ø}35$ мм, его площадь $S_\phi = 9,62 \text{ см}^2$. Коэффициент баллистической фокусировки K определяется отношением площади эмиссионной поверхности анода S к площади фокальной области S_ϕ :

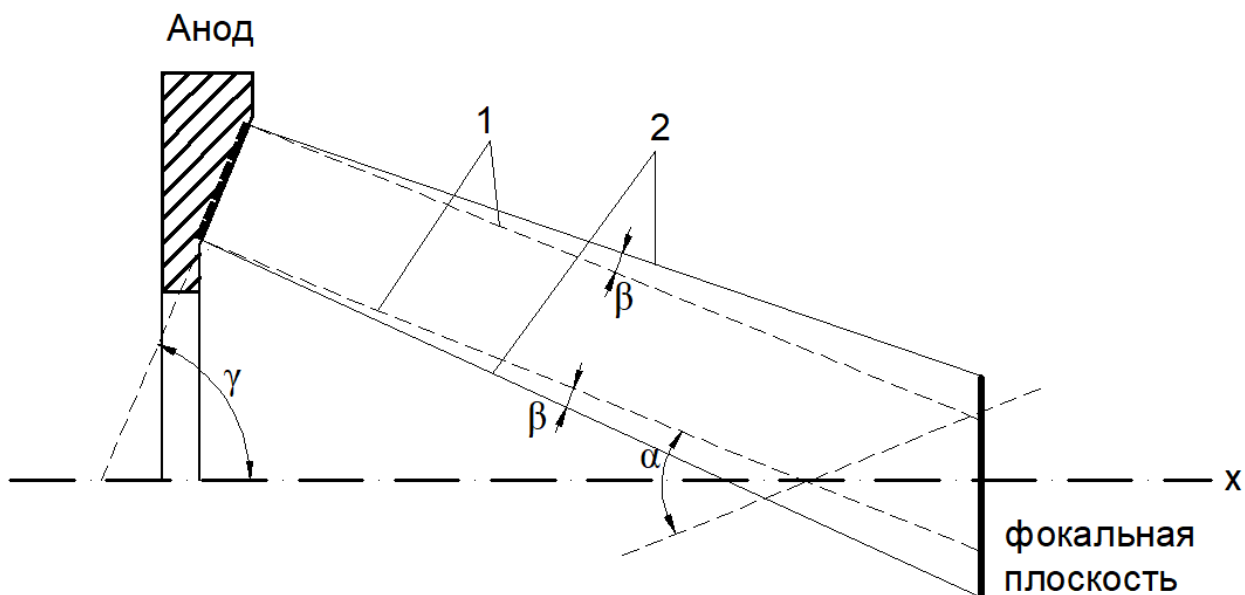
$$K = \frac{S}{S_\phi} = \frac{120,2 \cdot 10^{-4}}{9,62 \cdot 10^{-4}} = 12,5 \quad (14)$$

Необходимо отметить, что при рассеянии ионного пучка [24] площадь фокального пятна увеличивается. Поэтому реальная величина коэффициента баллистической фокусировки K , как правило, составляет 8–10. С учетом баллистической фокусировки пучка плотность тока ионов в фокальной области может достигать величин $j_{H^+} = 562,5 \text{ А/см}^2$ и $j_{C^+} = 171,2 \text{ А/см}^2$.

Исходя из величины коэффициента полезного действия диода $\eta = 60\%$ энергия ионного пучка должна быть равна $W_{\text{п}} = 0,6 \cdot 300 = 180 \text{ Дж}$. Средняя величина плотности энергии по сечению пучка в фокальной области составит $w_{\text{п}} = 180/9,62 = 18,7 \text{ Дж/см}^2$.

Известно, что на участке транспортировки ионного пучка происходит его рассеяние, которое обусловлено несколькими факторами. Во-первых, рассеяние происходит под действием не скомпенсированного магнитного потока на выходе ионного диода. Во-вторых, заряд ионного пучка не скомпенсирован на 100% зарядом электронов, что так же приводит к рассеянию ионного пучка. В-третьих, рассеяние ионного пучка так же обусловлено угловым расхождением ионов на поверхности анода [11].

Минимальный угол рассеяния ионного пучка в результате не скомпенсированного заряда ионов и не скомпенсированного магнитного потока на выходе ионного диода [11] составляет от 3° до 6° . Поэтому с учетом рассеяния ионного пучка необходимо скорректировать расчет плотности тока, энергии ионного пучка и размеров фокальной области. В расчетах примем угол рассеяния пучка $\beta = 3^\circ$ (рисунок 26).



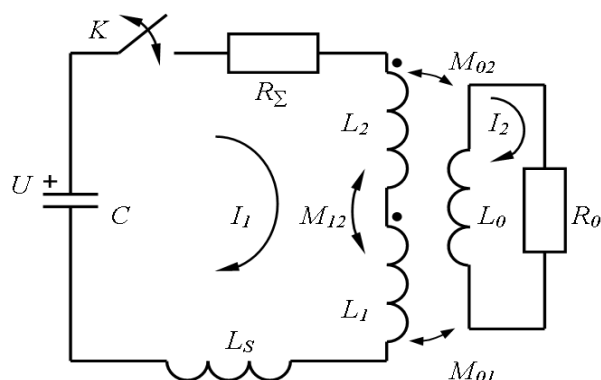
1 – расчетная траектория пучка; 2 – траектория пучка с учетом рассеивания; α – угол схождения ионного пучка; γ – угол наклона эмиссионной поверхности анода к оси X ; β – угол рассеяния пучка

Рисунок 26 – Схематичное изображение рассеяния ионного пучка на участке транспортировки

В результате рассеяния ионного пучка на угол β диаметр фокальной области увеличивается до $\varnothing 50$ мм, а площадь возрастает до $S_{\text{ф}}=19,62$ см². Коэффициент баллистической фокусировки уменьшается до $K=6$. С учетом этого средняя плотности энергии по сечению пучка составит $180 \text{ Дж}/19,62=9$ Дж/см², а максимальная плотность тока ионов в фокальной плоскости составит $j_{\text{H}^+}=270 \text{ А/см}^2$ и $j_{\text{C}^+}=82,2 \text{ А/см}^2$.

3.2 Расчет магнитной изоляции ионного В_r-диода

Внешнее магнитное поле для изоляции ионного В_r-диода создается двумя последовательно соединенными катушками и током, наведенным в поверхностном слое анода. Эквивалентная схема источника магнитного поля приведена на рисунок 27.



L_1, L_2 – внешняя и внутренняя катушки магнитного поля; R_Σ – активные сопротивления катушек L_1, L_2 ; R_0 – активное сопротивление анодного кольца; L_0 – индуктивность анодного кольца; L_s – внешняя индуктивность контура; C – конденсаторная батарея

Рисунок 27 – Эквивалентная электрическая схема источника магнитного поля

Энергия заряженной конденсаторной батареи используется для создания внешнего радиального магнитного поля в зазоре диода. Внешнее радиальное магнитное поле, перпендикулярное электрическому, подавляет прохождение электронной компоненты тока через диод, возжигающийся при взрывной эмиссии с острых кромок катодов.

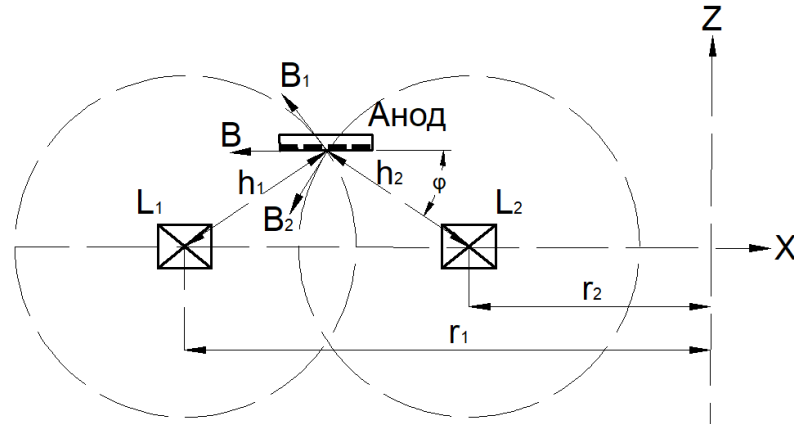
Общим критерием, определяющим возникновение магнитно-изолированного потока электронов независимо от геометрии А-К зазора диода, является критическое магнитное поле $B_{кр}$. Индукция $B_{кр}$ зависит от формы электродов МИД, приложенной разности потенциалов к А-К зазору, пространственного распределения изолирующего магнитного потока.

Критическая величина индукции магнитного поля определяется исходя из формулы (1), описанной в 1 главе:

$$B_{кр} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 350 \cdot 10^3 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 + (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 350 \cdot 10^3)^2}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 0,92 \text{ Тл}$$

Критическая величина индукции магнитного поля составила $B_{кр}=0,92$ Тл. Магнитная изоляция электронного тока наступает при величине магнитного поля в А-К зазоре превышающей критическое значение индукции магнитного

поля $B/B_{кр} \geq 1,5 \div 2$, следовательно, минимальная величина индукции магнитного поля в катушках должна составлять $B = 1,38$ Тл. Результирующее магнитное поле B образовано сложением магнитных полей катушек L_1 и L_2 (рисунок 28).



B_1 и B_2 – индукция магнитного поля создаваемое внутренним L_1 и внешним L_2 катушками, B – результирующая индукция магнитного поля; ϕ – угол между поверхностью анода и центров витка катушек; h_1, h_2 – расстояние от центра витков до поверхности анода, r_1, r_2 – радиус внешней и внутренней катушки, соответственно

Рисунок 28 – Магнитное поле, создаваемое катушками L_1 и L_2

Радиусы внешней и внутренней катушки выбирается исходя из положения анода, угол наклона и траектории ионного пучка к фокальной плоскости. Внутренний радиус r_1 100 см, внешний радиус r_1 60 см. При расчете результирующей индукции магнитного поля катушки L_1 и L_2 были представлены как одиночные проводники с током. Угол ϕ составила 36° . Напряженность магнитного поля каждой катушки рассчитывается как [31]:

$$H(t) = \frac{i(t) \cdot r^2}{4 \cdot h^3} \cdot (2 \cdot \cos\alpha + \sin\alpha), \quad (15)$$

где $i(t)$ – ток катушки;

h – расстояние от оси катушки до точки, где рассчитывается индукция магнитного поля;

r – радиус катушки.

Индукция магнитного поля для каждой из катушек рассчитывается как:

$$B(t) = \mu \cdot \mu_0 \cdot H(t), \quad (16)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная. На основании формул (15) и (16) ток в катушке рассчитывается как [31]:

$$I_{\text{кат}} = \frac{4 \cdot B \cdot h^3}{\mu_0 \cdot r^2 (2 \cos \alpha + \sin \alpha)}. \quad (17)$$

Ток в каждой из катушек будет равен $I_{\text{кат}} = 5,2$ кВ. Результирующая индукция магнитного поля рассчитывается как:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}, \text{ Тл} \quad (18)$$

где B_1 – магнитное поле, создаваемое внешней катушкой;

B_2 – магнитное поле, создаваемое внутренней катушкой. Магнитное поле, создаваемое внешней катушкой составляет $B_1 = 1,3$ Тл, внутренней катушкой $B_2 = 0,44$ Тл. Индуктивность каждой катушки определяется как [32]:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 r \Phi, \text{ мкГн} \quad (19)$$

где N – количество витков в катушке;

r – диаметр катушки;

Φ – коэффициент; зависящий от соотношения толщины обмотки от его диаметра. Для внешней катушки коэффициент $\Phi = 15$, для внутренней катушки $\Phi = 18$ [32].

Магнитное поле требуемой конфигурации в зазоре диода получается, если потенциал обмоток L_1 и L_2 на оси X будет одинаковым. Это выполняется, когда число витков и радиусы центров витков катушек связаны соотношением:

$$N_1 \cdot R_1 = N_2 \cdot R_2, \quad (20)$$

Принимаем, что количество витков внутренней катушки будет 15 витков, то тогда для внешней катушки необходимо принять 9 витков.

Индуктивность внутренней катушки составила $L_2 = 41,8$ мкГн, внешней катушки $L_1 = 30,92$ мкГн.

Результирующая индуктивность L_{Σ} с учетом взаимоиндуктивных связей катушек L_1 и L_2 будет рассчитываться:

$$L_{\Sigma} = L_1 + L_2 + M_{12} = 94,6 \text{ мкГн} \quad (21)$$

где M_{12} – взаимное индуктивность катушек L_1 и L_2 .

Минимальная величина емкостного накопителя энергии рассчитывается:

$$C = \sqrt{\frac{L_{\Sigma} \cdot I_{\text{кат}}^2}{U}} = 22 \text{ мкФ} \quad (22)$$

где U – напряжение источника питания катушек, которое составляет 5 кВ.

Энергия импульсного магнитного поля рассчитывается как:

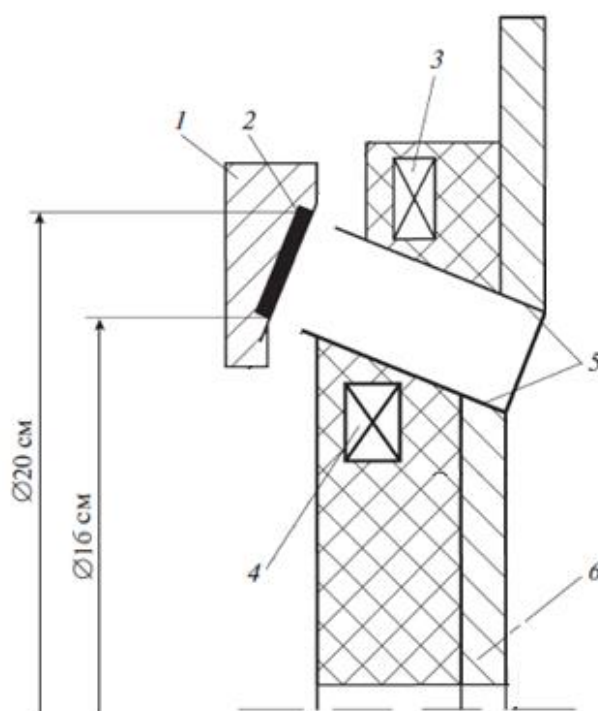
$$W = \frac{L_{\Sigma} \cdot I_{\text{кат}}^2}{2} = 1,27 \text{ кДж} \quad (23)$$

Длительность импульса тока определяется:

$$t_{\text{имп}} = \pi \sqrt{L_{\Sigma} \cdot C} = 143,2 \text{ мкс} \quad (24)$$

3.3 Разработка конструкции ионного V_r -диода

На основании вышеуказанных расчетных и конструктивных решения был разработан ионный V_r -диод с внешним магнитным полем. Конструкция ионного V_r -диода показана на рисунке 29. Диод включает кольцевой анод, катушки магнитного поля и систему катодов, имеющих коническую форму. Анод выполнен из материала с низким удельным электрическим сопротивлением – алюминия и его сплавов, чтобы демпфировать импульсное магнитное поле в области ускорения ионного пучка. Рабочая поверхность анода имеет кольцевые канавки, которые заполняются диэлектриком, содержащим требуемый сорт атомов – будущих ионов пучка. В случае протонного пучка канавки заполняются водородосодержащим диэлектриком – полиэтиленом, либо эпоксидной смолой.



1 – анод; 2 – графитовая вставка; 3 и 4 – внешняя и внутренняя катушки магнитного поля; 5 – система катодов; 6 – опорный диск

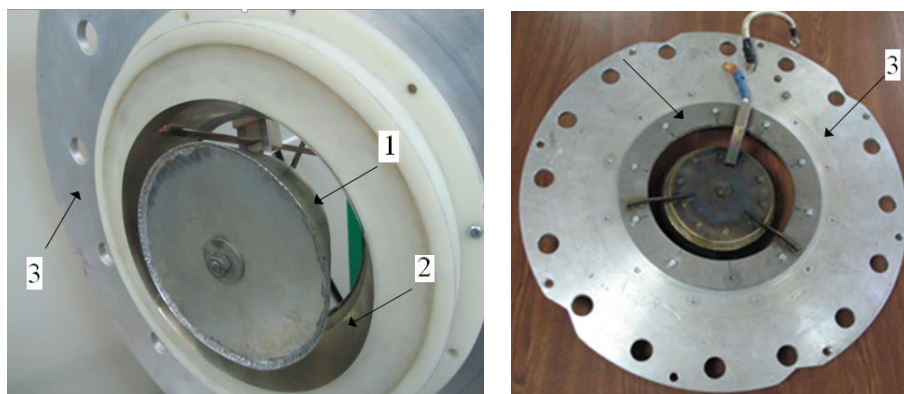
Рисунок 29 – Конструкция импульсного V_g -диода с внешним магнитным полем

Для получения ионов углерода анод покрывается графитом или С-тканью. Для исследований в качестве эмиссионного покрытия анода использовался графит. В данном диоде эмиссия ионов осуществляется из предварительно созданной плазмы на отрицательной полярности. Состав пучка в основном состоит из ионов углерода. Внешний диаметр графитовой вставки 20 см, толщина 0,3 см.



Рисунок 30 – Кольцевой анод МИДа

Кольцевые катоды выполнены тонкостенными (толщина 0.4 мм) из немагнитного материала (титан, нержавеющая сталь) с низкой электрической проводимостью, с целью исключить демпфирование переменного магнитного потока катушек магнитного поля в области ускорения. Внутренний катод центрируется относительно внешнего шпильками, в одной из которых происходит вывод питания внутренней обмотки. Внешняя обмотка последовательно соединена с внутренней, а другим выводом подключается к импульсному источнику питания.



1,2 – внутренний и внешний катод, соответственно; 3 – опорный диск

Рисунок 31 – Внешний вид катодного узла

Кромка внешнего катода располагается наиболее близко к поверхности анода, так как внешний слой пучка по сравнению с внутренним испытывает наибольшее отклонение от направления с поверхности диода. Катоды и каркасы катушек крепятся на опорном диске. Опорный диск изготавливается из материала с высокой проводимостью, чтобы демпировать магнитное поле катушек. В область, где индукция магнитного поля $B \rightarrow 0$, с учётом выпучивания силовых линий магнитного поля катушек катоды продолжены электродами.

Для увеличения плотности ионного тока на мишени используется баллистическая (или геометрическая) фокусировка ионного пучка, угол схождения составляет 45° . Кроме того, увеличение плотности тока ионного пучка возможно за счет сокращения ускоряющего зазора d при заданном ускоряющем напряжении U . При этом минимальное значение d должно

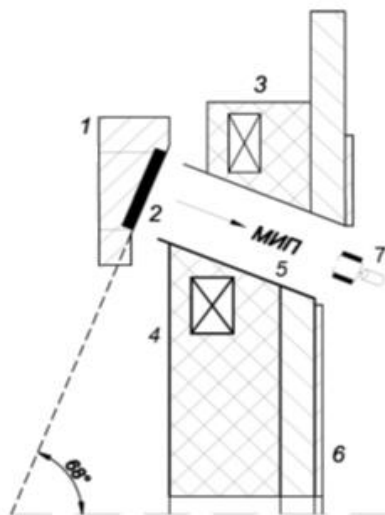
исключать завершение вакуумного пробоя в течении ускоряющего импульса напряжения. Площадь рабочей поверхности анода составляет 120 см^2 , геометрический фокус расположен на расстоянии 23 см от поверхности анода. Расчетный диаметр ионного пучка в фокусе составляет $3,5 \text{ мм}$, его площадь – $9,62 \text{ см}^2$.

4 Исследование параметров ионного V_r -диода

4.1 Генерация ионного пучка различного массового состава

Известно, что диэлектрическое эмиссионное покрытие анода подвергается разрушению при формировании МИП. Для увеличения ресурса работы ионного диода необходимо использовать другие типы эмиссионных покрытий анода, например графит, который используется в ионных диодах с самоизоляцией.

Для сравнения в исследованиях в качестве эмиссионного покрытия использовался графит и С-ткань. Использование С-ткани обуславливает получение только ионов углеродов. Данный материал может выдерживает до 3000°C (вакуум), хорошо пропитывается различными веществами (смолы, клей, масло, органика, неорганика и т.д.), легко режется и сшивается, что обеспечивает простоту нанесения на кольцевую поверхность анода. В одноимпульсном режиме работы были сделаны измерения плотности тока МИП на выходе ионного диода, конструкция которого показана на рисунке 32.



1 – анод; 2 – графит; 3 и 4 – внешняя и внутренняя катушки магнитного поля; 5 – внешний и внутренний катоды; 6 – опорный диск; 7 – коллимированный цилиндр Фарадея (КЦФ)

Рисунок 32 – Конструкция ионного V_r -диода с изоляцией внешним магнитным полем

Источником плазмы в диоде является графитовая вставка толщиной 3 мм и площадью 120 см², которая была установлена в кольцевой паз на поверхности анода. Поверхность графита была плоской и не имела дополнительных центров усиления электрического поля. Катодный узел диода включает два тонкостенных полых конусообразных катода. Кромка внешнего катода располагается наиболее близко к поверхности анода, расстояние до поверхности анода в исследованиях составляло 6–8 мм.

В одноимпульсном режиме работы ионного диода были получены импульсы ионного тока для двух покрытий (рисунок 33).

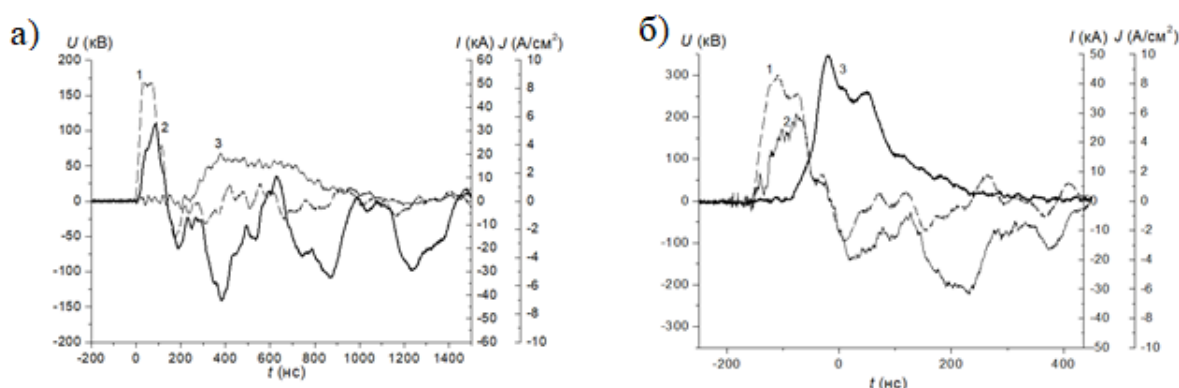
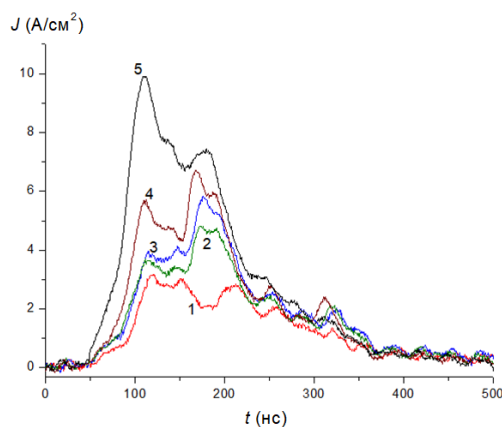


Рисунок 33 – Напряжение(1) ток (2) и плотности тока (3) ионного диода с графитовым (а) покрытием и С-тканью (б)

При работе ионного диода с покрытием С-ткань плотность ионного тока на выходе диода выше чем при использовании графитового покрытия (4 А/см²) и составляет 10 А/см². Поскольку плазмообразование в диоде с С-тканью идет более интенсивно, и при более низких напряженностях электрического поля (отсутствие задержки плазмообразования).

Ионный В_r-диод с внешним магнитным полем работал в одноимпульсном режиме. Расстояние до поверхности анода составляло 8 мм. Величина индукции внешнего источника поля В_{ист} изменялась от 0,7 Тл до 1,2 Тл (рисунок 34). При проведении эксперимента эмиссионная поверхность анода работала не полностью.

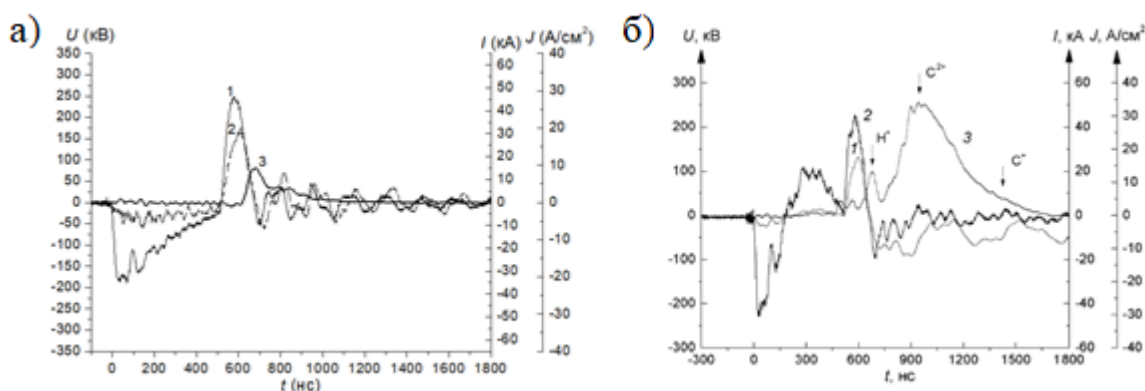


1 – источник поля $B_{ист}=0,7$ Тл; 2 – $B_{ист}=0,8$ Тл; 3 – $B_{ист}=0,9$ Тл; 4 – $B_{ист}=1,0$ Тл;
5 – $B_{ист}=1,2$ Тл

Рисунок 34 – Плотность тока МИП на выходе ионного диода с С-тканью

Увеличение величины индукции магнитного поля обеспечивает высокие плотности тока МИП.

Исследования работы диода в двухимпульсном режиме с графитовой вставкой показали, что при предварительном плазмообразовании происходит увеличение плотности ионного тока до 10-12 А/см². Результаты исследования показаны на рисунке 35.



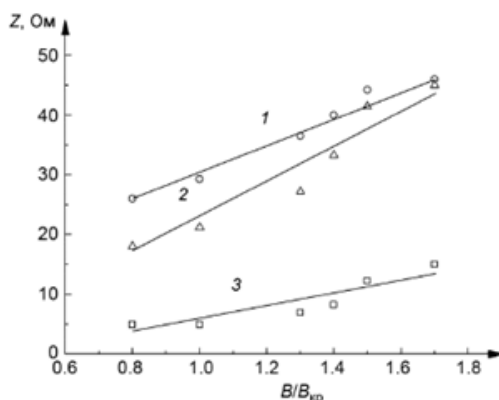
1 – полный ток диода; 2 – ускоряющего напряжения; 3 – плотности ионного тока в фокальной плоскости диода

Рисунок 35 – Параметры ионного диода на выходе диода (а) и в фокальной плоскости (б)

Плотность тока МИП на расстояние 170 см в фокальной плоскости составила 35-50 А/см². Для оценки эффективности работы диода в данном

режиме были проведены исследования зависимости параметров ионного диода от величины индукции магнитного поля в А-К области. В отличие от ионного диода с самоизоляции [33], в В-г-диоде во время действия биполярного импульса напряжения магнитное поле остается постоянным, так как импульс тока в катушках магнитного поля многократно превышает длительность напряжения.

Магнитная изоляция диода обеспечивается при значении индукции, превышающей критическую величину $V_{кр}$ [34]. Для данной геометрии диода величина $V_{кр}$ определена для импульса положительного напряжения и составляет 0.21 Тл. Интервал изменения индукции ограничен режимами короткого замыкания и холостого хода ионного диода на положительном импульсе напряжения. Результаты исследований импеданса диода в интервале изменения индукции от $0.8V_{кр}$ до $1.7V_{кр}$ показаны на рисунок 37.



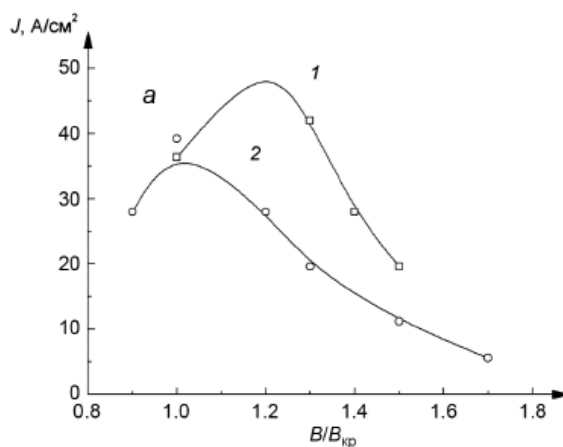
1 – во время действия отрицательного импульса напряжения; 2 – в паузе между импульсами; 3 – в течение положительного импульса

Рисунок 36 – Зависимость импеданса ионного диода от индукции магнитного поля

В течение отрицательного (1) и положительного (3) импульсов напряжения импеданс диода непрерывно нарастает. Наименьшее значение импеданс имеет в течение положительного импульса напряжения и при величине поля $0.8V_{кр}$ существенно превышает волновое сопротивление двойной формирующей линии (ДФЛ) ускорителя [35]. В результате рассогласования в диод поступает только часть энергии, запасенной в ДФЛ, и на спаде

отрицательного импульса напряжения появляется отраженный импульс. По мере заполнения А-К-области диода плазмой и формирования эмиссионной поверхности к приходу положительного импульса напряжения импеданс диода снижается. Рассогласование диода и ДФЛ также наблюдается и в течение паузы между импульсами напряжения. При достижении индукцией значения $1.7B_{кр}$ импеданс диода имеет максимальное значение в паузе между импульсами и при отрицательном напряжении, и фактически диод переходит в режим холостого хода.

Согласование ионного диода и ДФЛ происходит на положительном импульсе напряжения при величине поля $1.2B_{кр}$. В этом случае плотности тока МИП имеют максимальные значения (рисунок 37).



1 – величина А-К-зазора 6 мм; 2 – величина А-К-зазора 8 мм

Рисунок 37 – Плотность тока МИП в фокальной плоскости диода

Однако затраты энергии на генерацию плазмы в диоде максимальны при наименьшей величине магнитного поля $0,8B_{кр}$. В этом случае диод работает в режиме, близком к короткому замыканию. С увеличением индукции магнитного поля подводимая к диоду энергия монотонно снижается.

Сравнение режимов работы показало, что предварительное плазмообразование влияет на согласованный режим работы ионного диода и ДФЛ. В диоде выделяется гораздо больше энергии, чем при работе диода в режиме одиночных импульсов. Исследование плотности тока МИП в области внешнего и внутреннего катодов в непосредственной близости от поверхности

анода показало (рисунок 36), что плазмообразование в диоде идет неравномерно. Импульс тока МИП в области внутреннего катода имеет некоторую задержку относительно тока МИП в области внешнего катода. Это связано с тем, что образование плазмы в диоде преимущественно идет в области внешнего катода, поскольку величина А-К-зазора в этой области наименьшая.

4.2 Фокусировка ионного пучка

Для увеличения плотности тока и энергии МИП в фокусе диода, был проведен эксперимент с фокусировкой МИП. Данное исследование основано на явлении ионно-электронной эмиссии. Ионно-электронная эмиссия – это явление, при котором происходит испускание электронов твёрдым телом при бомбардировке его ионами.

В исследованиях на участке транспортировки МИП к мишени устанавливались металлические электроды. Электроды были выполнены в виде двух медных конусов, которые крепились к опорному диску на продолжении катодов. Схема эксперимента показана на рисунке 38. Эксперимент проводился на ускорителе ТЕМП-4М в одноимпульсном режиме.

При выводе МИП из диода вследствие неполной зарядовой нейтрализации, не скомпенсированного магнитного потока на выходе диода и плохой юстировки А-К зазора происходило его рассеяние. При рассеянии МИП реальная траектория пучка отличалась от расчетной. Траектория МИП была исследована с помощью дозиметрической пленки. Дозиметрическая пленка устанавливалась между опорным диском диода и мишенью перпендикулярно опорному диску (рисунок 39). В виде мишени использовался КЦФ, поверхность которого была покрыта лавсаном, с целью определения диаметра отпечатка пучка.

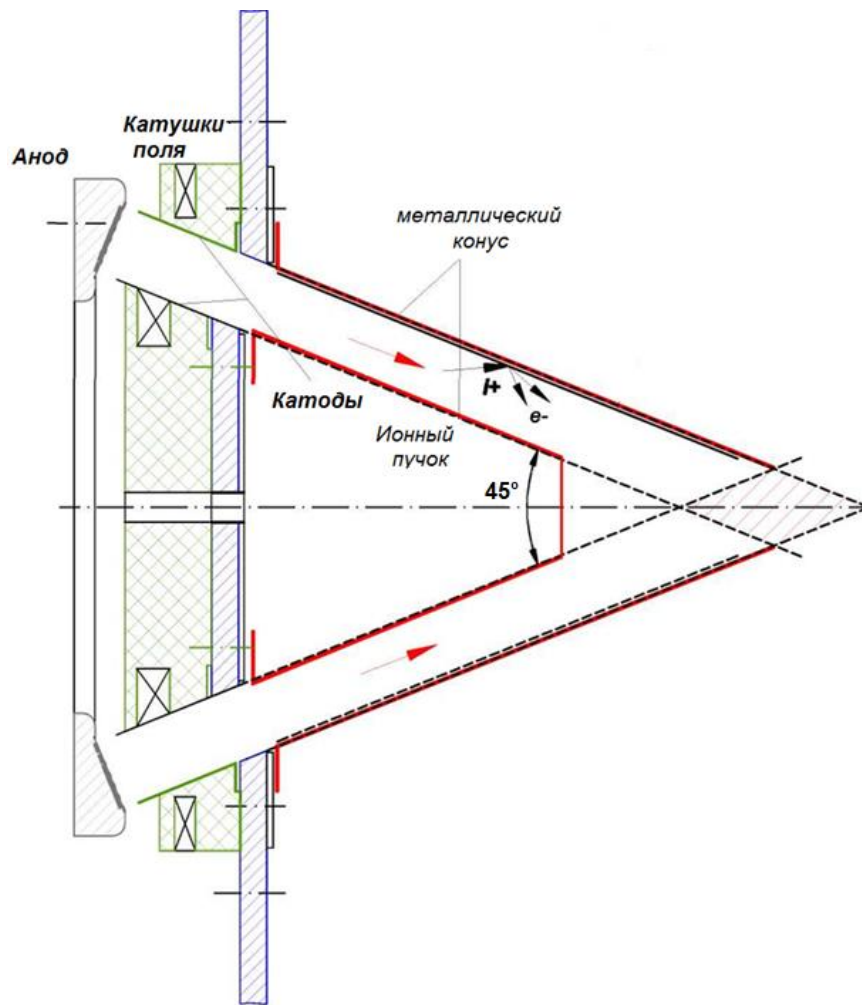


Рисунок 38 – Схема эксперимента фокусировки пучка

Для определения положения фокальной плоскости были сделаны измерения плотности тока МИП на оси диода с помощью КЦФ на расстояниях от 5 см до 20 см от опорного диска. В ходе опытов было определено, что максимальная величина плотности тока МИП, находится на расстоянии 185 мм от опорного диска, диаметр отпечатка пучка на дозиметрической пленке составил $\varnothing = 90$ мм, площадь 63 см^2 . Угол рассеивания пучка составил 9° .

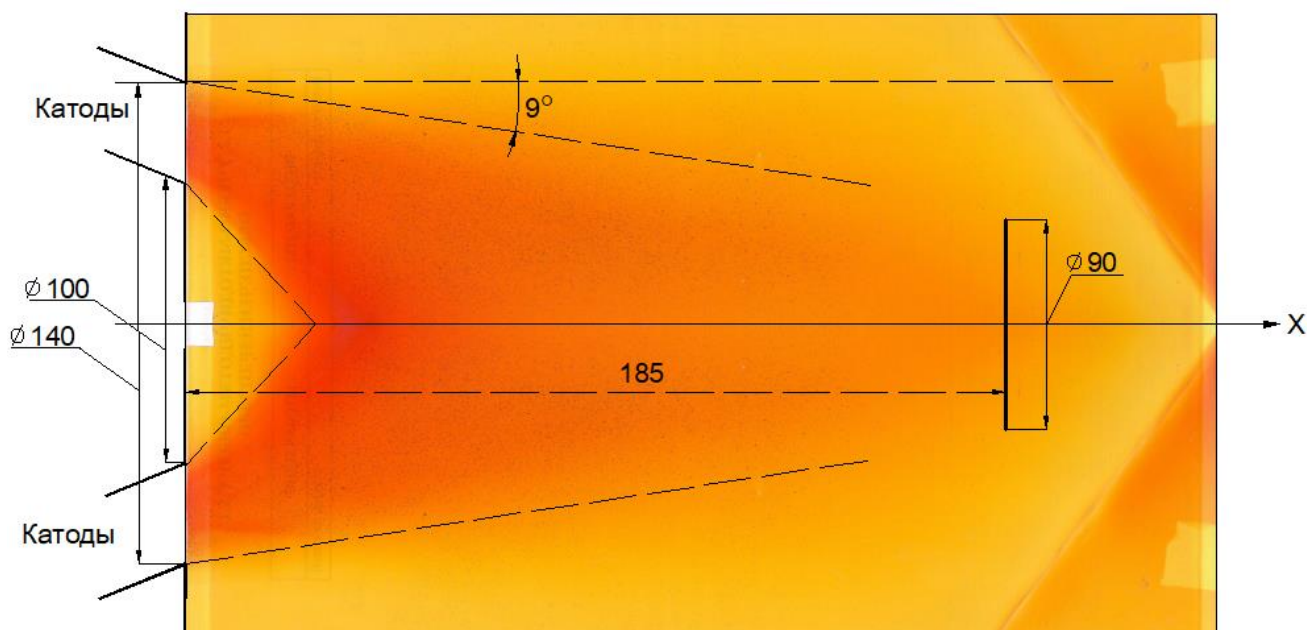


Рисунок 39 – Траектория пучка, проиллюстрированная дозиметрической пленкой

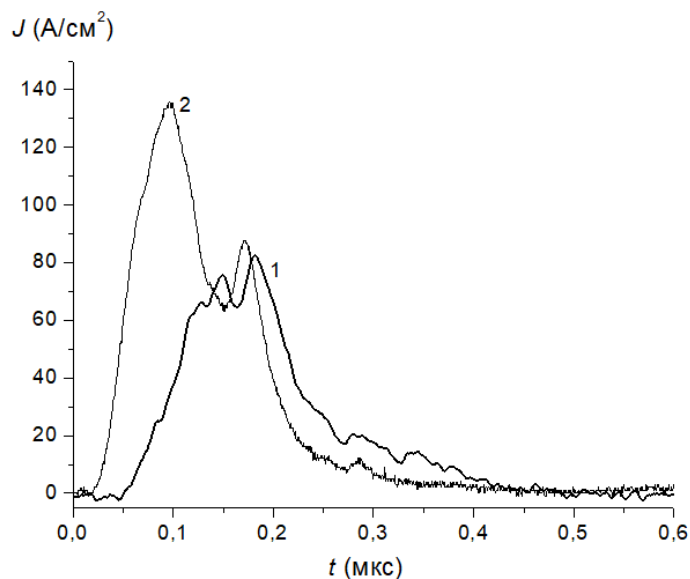
На выходе диода отпечаток МИП представлял собой кольцо, внешний \varnothing_1 и внутренний \varnothing_2 диаметры которого были определены конструкцией диода и составили: $\varnothing_1 = 140$ мм и $\varnothing_2 = 100$ мм. Площадь отпечатка кольца составила $S_{\varnothing_1} = 75,5$ см².

Угол наклона медных конусов соответствовал углу наклона катодов и составлял 45° . Длина внутреннего конуса составляла $h_1 = 190$ мм, внешнего конуса - $h_2 = 220$ мм. Медные конусы имели нулевой потенциал, расположение конусов показано на рисунке 40.



Рисунок 40 – Диодный узел с медными конусами на участке транспортировки МИП

Плотность ионного тока МИП на оси диода без использования дополнительной фокусировки составила 80 А/см^2 . При установке медных конусов плотность тока МИП возросла до 140 А/см^2 (рисунок 41).



1 — диод без металлических конусов, 2 — с металлическими конусами

Рисунок 41 — Плотность тока МИП

Использование медных конусов привело к увеличению плотности тока в 1,75 раз.

Был получен отпечаток МИП в фокальной плоскости диода при использовании медных конусов. В виде мишени использовалась медная фольга толщиной 100 мкм. Отпечаток ионного пучка на фольге показан на рисунке 42.



Рисунок 42 — Поверхность медной фольги после излучения

Отпечаток пучка имел форму окружности. Вследствие разогрева медной фольги ионным пучком происходило оплавление поверхностного слоя. Диаметр отпечатка МИП составил $\varnothing 30$ мм, его площадь $S_{\phi} = 7,1$ см².

Для измерения полной энергии МИП использовался калориметрический метод. В опыте калориметр был установлен на выходе диода и на расстоянии 220 мм. Измерение температуры ΔT калориметра производилось сразу после его облучения. Тепловая энергия W ионного пучка рассчитывалась по формуле [25]:

$$W = c \cdot m \cdot \Delta T, \text{ Дж} \quad (25)$$

где $c = 381$ Дж/кг·град – удельная теплоемкость меди при 20 °С [13],

$m = 125$ г – масса медной пластины.

Использовался график зависимости величины сопротивления терморезистора от температуры медной пластины калориметра (глава 2, рисунок 23).

Начальная температура медной пластины калориметра составляла $T=20,7$ °С при сопротивлении терморезистора $R_{\text{нач}}=1131$ Ом. Учитывая площадь отпечатка МИП на фольге $S_{\phi} = 7,1$ см², плотность энергии w по сечению пучка рассчитывалась как:

$$w = \frac{W}{S_{\phi}}, \text{ Дж/см}^2 \quad (26)$$

Результаты измерений энергии приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерения энергии МИП и расчеты плотности энергии

№	Число импульсов, N	R, Ом		T ₁ -T ₂ , С ⁰	ΔT, С ⁰	W, Дж/им п.	w, Дж/см ²
		До	после				
1	1	1131	1111	21,1905-20,7	0,49	23,36	3,34
2	1	1107	1087	21,7839-21,2766	0,507	24,16	3,4
3	3	1087	1034	23,1341-21,7839	1,35	21,4	3

В таблице 4 приведены данные измерения энергии МИП без использования дополнительной фокусировки МИП с помощью медных конусов.

Таблица 4 – Результаты эксперимента

№	Положение калориметра	W, Дж	S, см ²	w, Дж/см ²
1	на выходе диода	80	75,5	1,1
2	170 мм от опорного диска	75	63	1,2

Таким образом, использование медных электродов в виде конусов на участке транспортировки МИП позволяет улучшить его фокусировку. В результате выбивания электронов с поверхности электродов ионами происходит нейтрализация заряда МИП и уменьшение его расхождения. При этом часть энергии МИП расходуется на нагрев медных конусов. Не смотря на это, происходит локальное увеличение плотности тока и энергии МИП в фокусе диода.

4.3 Анализ полученных результатов

Работа ионного V_r -диода с покрытиями на основе углерода и С-ткани показал высокий ресурс плазмообразования таких покрытий. Однако параметры ионного пучка, полученные с помощью таких покрытия меньше, чем у диэлектриков.

Эффективность генерации ионного пучка будет высокой в двухимпульсном режиме работы диода. Сравнение режимов работы показало, что предварительное плазмообразование влияет на согласованный режим работы ионного диода и ДФЛ. В диоде выделяется гораздо больше энергии, чем при работе диода в режиме одиночных импульсов. Согласование ионного диода и ДФЛ происходит на положительном импульсе напряжения при величине поля $1,2V_{кр}$.

Фокусировка ионного пучка на основе ионно-электронной эмиссии обеспечила увеличение параметров работы ионного V_r -диода. Площадь отпечатка пучка на фокальной расстоянии уменьшилась от 63 см² до 7,1 см².

Данный способ фокусировки обеспечил локальное увеличение плотности тока в фокусе на 1,75 раз. Однако, на пути транспортировки ионы бомбардируют поверхность медных конус, выбивая электроны, что приводит к потерям энергии. Потеря энергии пучка компенсируется относительно высокой плотностью энергии, за счет уменьшения диаметра отпечатка пучка в фокусе. Дозиметрическая пленка показала реальную траекторию пучка. По полученному снимку видно, что рассеивание пучка в данном диоде больше по сравнению с другими подобными V_r -диодами.

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

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Рысбаева Каныш Жолболсынулы

Школа	Новых производственных технологий	ООП	Техника и физика высоких напряжений
Уровень образования	магистратура	Направление	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>При проведении научно-исследовательского проекта используется лаборатория №1 ИШНПТ ТПУ; в исследовании задействованы два человека: руководитель проекта и студент-дипломник;</i>
<i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Определение концепции проекта, факторов микро- и макросреды, анализ рынка продукта, экспертная оценка эффективности, SWOT-анализ</i>
<i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Проект выполняется в рамках магистерской диссертации, устав не требуется.</i>
<i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Распланировано управление научно-техническим проектом; отмечены контрольные события проекта; рассчитан бюджет научного исследования;</i>
<i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Анализ финансовой эффективности, ресурсоэффективности и сравнения эффективностей</i>
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	

Матрица SWOT

Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Старикова Екатерина Васильевна	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рысбаев Каныш Жолболсынулы		

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

В текущем разделе рассматривается перспективность научно-технического проекта, которая определяется высокотехнологичностью, ресурсоэффективностью, ресурсосбережением и коммерческой ценностью.

Научно-исследовательская работа заключается в исследовании характеристик ионного V_r -диода направлены на повышение эффективности диодной системы и увеличение плотности тока и энергии ионного пучка. Научный проект осуществлялся на ионном ускорителе ТЕМП-4М в лаборатории №1 инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

При облучении пучком ионов происходит изменение физических и химических свойств материалов. С помощью облучения твердого тела пучками можно получить новые материалы, которые имеют широкое применение в жизни, в науке, в промышленности.

Актуальность работы состоит в том, что ионный диод с V_r -магнитным полем широко используются для генерации мощных ионных пучков. Для эффективной генерации ионных пучков необходимо произвести анализ изменения величины полной энергии и плотности энергии пучка, формируемого ионным диодом с V_r -магнитным полем, при изменении его характеристик и геометрических параметров.

Целью данного раздела ВКР является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Задачи раздела:

– разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;

- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

5.1 Потенциальные потребители результатов НТИ

Потенциальными потребителями данного научно технического исследования являются относятся научные сотрудники, студенты, специалисты в области ускорительной техники и физики заряженных частиц.

Таблица 5.1 – Карта сегментирования рынка

		Отрасли, занимающиеся ускорением заряженных частиц		
		Научные институты	Научно-исследовательские лаборатории	Заводы по производству ускорителей
Сфера деятельности по применению ионных пучков	Облучение материалов	x	x	x
	Изучение свойств ионных пучков	x	x	
	Анализ характеристик ионных пучков	x	x	
	Использование пучков заряженных частиц в промышленных целях и медицине			x

Как видно из карты сегментирования, основным сегментом данного рынка являются научные институты, научно-исследовательские лаборатории, которые занимаются изучением свойств и характеристик ионных пучков. Заводы-изготовители занимаются больше коммерческой деятельностью, обеспечивая применение пучков заряженных частиц в промышленности и медицине.

5.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Поскольку рынки пребывают в постоянном движении, необходимо систематически проводить детальный анализ существующих конкурирующих разработок.

Благодаря такому анализу можно вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим конкурентам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения проводится с помощью оценочной карты, приведенной в 5.2.

Таблица 5.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бф	Бк	Кф	Кк
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Безопасность	0,1	2	2	0,2	0,2
Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,2	5	3	1	0,3
Качество конечного продукта	0,1	5	3	0,5	0,3
Сокращение времени	0,1	5	4	0,5	0,4

Повышение производительности	0,2	4	3	0,8	0,6
Экономические критерии оценки эффективности					
Конкурентоспособность продукта	0,1	5	3	0,5	0,3
Финансирование научной разработки	0,1	4	4	0,4	0,4
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	4	0,5	0,4
Итого	1	35	26	4,4	2,9

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в Таблица 5.2, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Данная разработка сравнивается с традиционными технологиями, такими как облучение мишени мощным электронным пучком.

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

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле (17):

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

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Анализ показал, что как технические, так и экономические критерии данного проекта на нынешний момент развития могут заинтересовать потенциальных покупателей, среди которых научные исследовательские институты, технические ВУЗы и узконаправленные компании. Так же получилось определить критерии, которые нуждаются в дальнейшей проработке для наилучшего внедрения на рынок.

5.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Он проводится в несколько этапов.

Описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта приведены в таблице 4.3.

Таблица 5.3 – SWOT-анализ

1	2	3
	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Улучшения характеристик ионного диода за счет эффективной работы диодной системы.</p> <p>С2. Проведение экспериментов на готовом лабораторном стенде</p> <p>С3. Получение новых материалов с уникальными свойствами.</p> <p>С4. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Большие габаритные параметры установки.</p> <p>Сл2. Дороговизна использования такого вида облучения материалов.</p> <p>Сл3. Не разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки.</p> <p>Сл4. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с разработкой</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Научное сотрудничество с другими ВУЗами и НИИ.</p> <p>В2. Применение для собственных нужд лаборатории №1 ИШНПТ.</p>	<p>При совмещении сильных сторон и возможностей НИР улучшается энергоэффективность и производительность установки.</p>	<p>Для проведения исследований и экспериментов необходим персонал с определенным уровнем подготовки, знаний и квалификации.</p>

1	2	3
ВЗ. Публикации актуальных статей в научных журналах		
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Развитая конкуренция технологий получения ионных пучков. У3. Возможность создания новой, более улучшенный тип диодной системы	Монтаж и эксплуатация установки не требуют значительных затрат, так как используется готовая установка.	В случае отсутствия квалификационных кадров и бизнес-плана будет затруднительно проводить эксперименты на ускорителе ТЕМП-4М в этой тематике.

Таким образом, в ходе SWOT-анализа удалось выявить наиболее важные проблемы, которые необходимо разрешить в процессе выполнения проекта. Анализ показал, что использование данной технологии значительно увеличивает энергоэффективность. Так как установка работает с высоким напряжением проведение экспериментов возможно только в лабораторных условиях. Результаты проведенного SWOT-анализа будут учтены при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

5.4 Планирование комплекса работ на создание проекта

Определение трудоемкости и продолжительности работ осуществляется на основе отраслевых нормативов, типовых норм на разработку конструкторской документации, а для работ, обладающих большой неопределенностью на основе вероятностных (экспертных) методов, широко используемых в СПУ (Таблица).

Таблица 5.4 – Перечень работ и распределение исполнителей

№ работы	Содержание работ	Должность исполнителя
1	Составление и утверждение темы и задания НИР	РП, СД
2	Изучение поставленной задачи и литературный поиск материалов по теме	СД
3	Определение последовательности этапов исследования	РП, СД
4	Описание установки и методики исследования	РП, СД
5	Календарное планирование работ	РП, СД
6	Проведение необходимых экспериментов на установке для осуществления НИР	РП, СД
7	Диагностика и анализ полученных результатов	РП, СД
8	Составление отчета	СД

РП – руководителя проекта, СД – студент-дипломник. На основании перечисленных работ для удобства был построен календарный план-график (Рисунок) с длительность этапов в календарных днях.

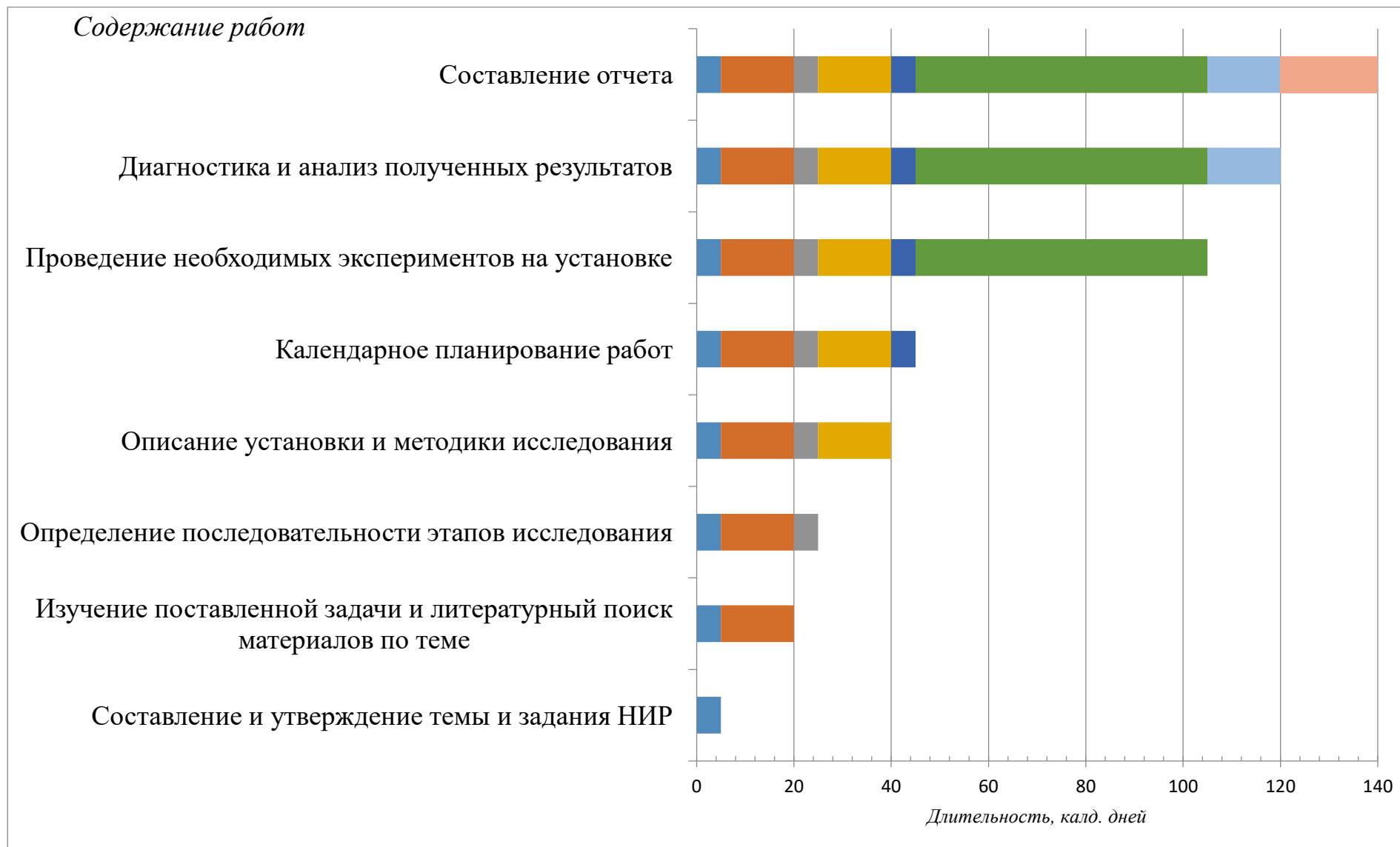


Рисунок 5.1 – Линейный план-график реализации НИТ

5.5 Определение трудоемкости работ

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле (5.2):

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (5.2)$$

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения работы, чел.-дн.;

t_{min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы чел.-дн.;

t_{max} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы чел.-дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу (5.3):

$$t_p = \frac{t_{ож}}{Ч}, \quad (5.3)$$

где T_p – продолжительность одной работы, раб. дн.;

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

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

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле (5.4):

$$T_k = T_p \cdot k, \quad (5.4)$$

где T_k – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

T_p – продолжительность одной работы, раб. дн.;

k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле (5.5):

$$k = \frac{T_{\text{КГ}}}{T_{\text{КГ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} \quad (5.5)$$

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

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

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

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k = \frac{T_{\text{КГ}}}{T_{\text{КГ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} = \frac{365}{365 - 104 - 10} = 1,45,$$

тогда длительность этапов в рабочих днях, следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ $T_{\text{к}}$ нужно округлить до целых чисел.

Результаты расчетов приведены в Таблица .

Таблица 5.5 – Временные показатели проведения ВКР

№раб.	Исполнители					
		t_{min} чел-дн	t_{max} чел-дн	$t_{\text{ож}}$ чел-дн	$T_{\text{р}}$ раб.дн	$T_{\text{к}}$ кал.дн
1	РП, СД	4	10	4,4	2,2	3
2	СД	14	20	16,4	16,4	24
3	РП, СД	4	10	4,4	2,2	3
4	РП, СД	14	20	16,4	8,2	12
5	РП, СД	4	10	4,4	2,2	3
6	РП, СД	50	65	46,7	23,35	34
7	РП, СД	14	20	16,4	8,2	12
8	СД	19	25	21,4	21,4	31
Итого						122

Таким образом, в проектной деятельности участвуют двое сотрудников: руководитель проекта и студент-дипломник.

5.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости на выполнение данной разработки производится по следующим статьям затрат: основная заработная плата; отчисления во внебюджетные фонды; расходы на электроэнергию; накладные расходы.

5.6.1 Расчет основной заработной платы

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

Данные для расчета:

1) Оклад: научного руководителя – 23100 руб. (рк), научно-технического работника – 2400 руб. (рк).

2) Плановый фонд рабочего времени за месяц – 176 часов (22 дня);

3) Дополнительная заработная плата.

4) Районный коэффициент (1,3).

Часовая тарифная ставка ($C_{ч}$) определяется:

$$C_{ч} = \frac{\text{Оклад}}{\Phi_{рв}} \quad (5.6)$$

где $\Phi_{рв}$ – плановый фонд рабочего времени за месяц у научно-технического работника, из расчета 22 рабочих дня по 8 часов.

Определяем заработную плату за час для научно-технического работника:

$$C_{ч} = \frac{2400}{176} = 13,63 \text{ руб. в час}$$

Основная заработная плата научно-технического работника за месяц составит:

$$ЗП_{осн} = C_{ч} \cdot t \quad (5.7)$$

$$ЗП_{осн} = 13,63 \cdot (22 \cdot 8) = 12,5 \cdot 176 = 2400 \text{ руб}$$

Дополнительная заработная плата:

$$ЗП_{доп} = \frac{ЗП_{осн} \cdot 15}{100} \quad (5.8)$$

$$ЗП_{доп} = \frac{2400 \cdot 15}{100} = 360 \text{ руб}$$

Итого затраты на оплату труда:

$$З_{общ} = ЗП_{осн} + ЗП_{доп} \quad (5.9)$$

$$З_{общ} = 2400 + 360 = 2760 \text{ руб}$$

Теперь рассчитаем заработную плату научного руководителя:

Часовая тарифная ставка ($C_{ч}$):

$$C_{ч} = \frac{23100}{176} = 131,25 \text{ руб. в час}$$

где $\Phi_{рв}$ – плановый фонд рабочего времени за месяц у руководителя, из расчета 22 рабочих дня по 8 часов.

Основная заработная плата за проект у руководителя составит:

$$З_{осн} = 131,25 \cdot (22 \cdot 8) = 23100 \text{ руб};$$

Дополнительная заработная плата:

$$З_{доп} = \frac{23100 \cdot 15}{100} = 3465 \text{ руб}$$

Итого затраты на оплату труда:

$$З_{общ1} = 23100 + 3465 = 26565 \text{ руб.}$$

Тогда, общая сумма заработных плат составит (Таблица):

$$Z_{\text{общ}} = 26565 + 2760 = 29325 \text{ руб.}$$

Таблица 5.6 – Расчета заработной платы участников проекта

Исполнитель	Оклад (руб.)	Часовая тарифная ставка (руб./час.)	Основная заработная плата (руб.)	Дополнительная заработная плата (руб.)
Руководитель	23100	131,25	23100	3465
Студен – дипломник	2400	13,63	2400	360
Итого				29325 руб.

5.6.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

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

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 30% от затрат на заработную плату и включает в себя:

- 1) отчисления в пенсионный фонд;
- 2) на социальное страхование;
- 3) на медицинское страхование.

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 29325 = 8797,5 \text{ руб.}$$

5.6.3 Затраты электроэнергии

Затраты на электроэнергию в денежном выражении рассчитывается по формуле (5.11) и представлены в Таблица :

$$C_{\text{эл}} = W_{\text{сил эн}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (5.11)$$

где $C_{\text{эл}}$ – стоимость одного кВт·часа электроэнергии;

C_3 - одноставочный тариф на потребляемую электроэнергию составляет 4,6 руб/кВт·ч для ТПУ.

Таблица 5.7 – Затраты электроэнергии

Наименование статьи	Затраты электроэнергии, кВт·ч.	Тариф электроэнергии, руб/кВт·ч	Затраты на электроэнергию, руб.
Монтажные работы	50	4,6	230
Пуско-наладочные работы	10	4,6	46
Освещение рабочего места	160	4,6	736
Использование диагностического оборудования	85	4,6	391
Итого			1403

5.6.4 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

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

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

$$C_{накл} = 0,7 \cdot 29325 = 20527,5 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НТИ по форме, приведенной в Таблица.

Таблица 5.8 – Расчет бюджета затрат НТИ

№	Наименование статьи	Сумма, руб.
1	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	29325
2	Отчисления во внебюджетные фонды	8797,5
3	Накладные расходы	20527,5
4	Затраты электроэнергии	1403
5	Бюджет затрат НТИ	60053

Выводы по разделу

В текущем разделе был выполнен следующий алгоритм:

- анализ и оценка научно-технического уровня проекта, который показал, что данный проект имеет среднюю значимость теоретического и практического уровня.

- SWOT-анализ выявил наиболее важные проблемы, которые необходимо разрешить в процессе выполнения проекта.

- разработан календарный план проекта (Таблица) и построен календарный план-график (Рисунок). В проектной деятельности участвуют двое сотрудников: руководитель проекта и студент-дипломник.

- определена трудоемкость работ, которая составила 122 календарных дней (Таблица)

- рассчитана смета затрат на научное исследование, таким образом, расходы на научно-технический проект составили 60053 руб.

Следует отметить важность для проекта в целом проведенных в данной главе исследований, которые позволили объективно оценить эффективность проводимых научно-технических исследований. К внутренним и внешним заинтересованным сторонам проекта, которые будут взаимодействовать, и влиять на общий результат научного проекта относятся научные сотрудники, студенты лаборатории, которым предстоит работать с усовершенствованной разработкой.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Рысбаева Каныш Жолболсынулы

Школа	Новых производственных технологий	ООП	Техника и физика высоких напряжений
Уровень образования	магистратура	Направление	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования является ионный V_{Γ}-диод. Исследования проводились в лаборатории №1 ТПУ на ускорителе ТЕМП-4М. Ионный V_{Γ}-диод применяется в научных институтах и в исследовательских лабораториях, в которых проводятся прикладные исследования, по изучению воздействия импульсных мощных ионных пучков на материалы.</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 в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); <p>электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты)</p>	<p>Условия труда работающих характеризуются возможностью воздействия на них следующих вредных производственных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>повышенный уровень шума</i> Уровень шума на рабочем месте составляет около 70 дБ, Уровень шума и звукового давления не должен превышать 65 дБ. В лаборатории для снижения воздействия шума используют индивидуальные средства защиты, в виде наушников. Также во время эксперимента персонал находится в пультовой комнате, огражденная металлической дверью металлическая дверь, отделяющая пультовую и помещение с ускорителем. • <i>неблагоприятные условия микроклимата</i> Исследовательская работа относится к работе средней тяжести (категория Па), микроклиматические условия на рабочих местах должны соответствовать следующим требованиям: в теплый сезон года температура воздуха в помещении – 19-21 °С, относительная влажность воздуха – 40-60 %, скорость движения воздуха не превышает 0,2 м/сек; в холодный сезон года температура воздуха в помещении – 17-19 °С, относительная влажность воздуха – 40-60 %, скорость движения воздуха не превышает 0,2 м/сек. • <i>электромагнитное поле</i> Энергетическая экспозиция излучения в диапазоне частот 30 кГц – 3 МГц согласно СанПиНу 2.2.4.1191-03: $\dot{E}_E=4800 (В/м)^2 \cdot ч$, по ПДУ $\dot{E}_E = 20000 (В/м)^2 \cdot ч$. $\dot{E}_H=320 (В/м)^2 \cdot ч$, по ПДУ $\dot{E}_E = 200 (А/м)^2 \cdot ч$.
---	--

	<p>Для защиты персонал во время работы находится в пультовой за закрытой металлической дверью, также используют экранирование от источников излучения.</p> <p>Средства защиты: экранирование, во время работы установки персонал находится в пультовой.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>недостаточная освещенность рабочего места</i> <p>Освещенность в лаборатории согласно нормам СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 составляет 400 лк, достигается с помощью искусственного освещения.</p> <p>Анализ опасных факторов производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>источник термической опасности</i> <p>При выполнении данной работы имеется один очаг термической опасности – это печь паромасляного насоса для откачки камеры с ионным диодом. Температура печи при работе может достигать от 200-300°C. При необходимости соприкосновения с печью для выполнения каких-либо работ (ремонт или наладка), печи изначально дают остыть, после остывания до допустимых значений температуры, приступают к выполнению работы.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>повышенное значение напряжения до 400 кВ, электрический ток до 45 кА.</i> <p>Используемые меры и средства защиты: выравнивание потенциалов, электрическое разделение сети, зануление, система защитных проводов, защитное заземление, защитное отключение и средства индивидуальной защиты;</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>статическое электричество</i> <p>Основной опасностью при электризации различных материалов является возможность возникновения искрового разряда, как с диэлектрической наэлектризованной поверхности, так и с изолированного проводящего объекта.</p> <p>Для предупреждения образования статического электричества на элементах металлических конструкций, трубопроводах разного назначения, расположенных на расстоянии менее 10см параллельно друг друга, применяются замкнутые контуры, создаваемые с помощью устанавливаемых между ними металлических заземленных переключек через каждые 20 м и менее. Для непрерывного снятия электростатических зарядов с человека используются электропроводящие полы, заземленные зоны или рабочие площадки, оборудование, трапы, а также средства индивидуальной защиты в виде антиэлектростатических халатов и обуви, с кожаной подошвой или подошвой из электропроводной резины.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>повышенный уровень ионизирующих излучений</i> <p>При проведении экспериментов в помещении, где располагается ускоритель, доза радиации не превышает 5 мкЗв в час (120 мЗв в год при 1700 рабочих часах). Во избежание облучения при работе используется средство коллективной защиты: защищенное место от воздействия радиационного излучения, где рабочий персонал находится в пультовой, отделенной от установки толстой бетонной стеной и металлической дверью, не пропускающих рентгеновское тормозное излучение, в которой доза радиации не превышает 1мЗв в час.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); 	<p>Селитебная зона ускорителя находится на территории лаборатории №1 №1 ИШНПТ.</p> <p>Воздействий на гидросферу и литосферу ускоритель не оказывает, т.к. отсутствуют сбросы в гидросферу и литосферу. Ускоритель ТЕМП 4-М имеет систему с</p>

<ul style="list-style-type: none"> - анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); - анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); - разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>принудительной конвекцией паромасляного насоса, в качестве охлаждающей жидкости используется техническая вода. Однако загрязнения воды и канализационных выбросов при работе не происходит. При работе ускорителя исключено загрязнение тяжелыми металлами, вредными химическими веществами Т.к. никаких опасных веществ при проведении экспериментов не используются.</p> <p>Экологическая безопасность отражена в документе СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ".</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> - перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; - выбор наиболее типичной ЧС; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Возможные ЧС на объекте: пожар, короткое замыкание электрической цепи.</p> <p>В качестве наиболее типичной ситуации рассматривается пожар.</p> <p>Превентивные меры по предупреждению возгораний: следить за состоянием электрической проводки, не оставлять без присмотра включенные электронагревательные приборы (паяльник).</p> <p>При возгорании в срочном порядке необходимо сообщить о пожаре по телефону 01, дать сигнал тревоги, принять меры по эвакуации людей. В срочном порядке покинуть помещение. При возможности приступить к устранению пожара с помощью имеющихся средств пожаротушения.</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Правовые и организационные вопросы изложены в документе СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ". Основные положения и требования регламентируются данным документом.</p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение контроля и диагностики, профессор	Ахмеджанов Рафик Равильевич	доктор биологических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рысбаев Каныш Жолболсынулы		

6 Социальная ответственность

Введение

В данном разделе рассмотрим экологичность и безопасность научно-исследовательской работы, которая была лаборатории ТПУ.

При облучении пучком ионов происходит изменение физических и химических свойств материалов. С помощью облучения твердого тела пучками можно получить новые материалы, которые имеют широкое применение в жизни, в науке, в промышленности.

Актуальность работы состоит в том, что ионный диод с B_r -магнитным полем широко используются для генерации мощных ионных пучков. Для эффективной генерации ионных пучков необходимо произвести анализ изменения величины полной энергии и плотности энергии пучка, формируемого ионным диодом с B_r -магнитным полем, при изменении его характеристик и геометрических параметров.

Описание рабочего места

Опасные и мешающие факторы будут рассмотрены на примере ионного ускорителя ТЕМП-4М. Установка состоит из генератора импульсного напряжения (источника высокого напряжения), двойной формирующей линии и вакуумной камеры с откачивающими насосами. Соответственно в процессе работы можно столкнуться с рядом вредных факторов: шумы и вибрации вследствие работы насосов, электромагнитное поле вследствие работы генератора.

Также присутствуют и опасные факторы: высокое напряжение (генератор), опасность возникновения пожара (повышенные температуры). Опасность поражения электрическим током является наиболее вероятным проявление чрезвычайной ситуации техногенного характера.

6.1 Производственная безопасность

6.1.1 Анализ вредных факторов производственной среды

При выполнении научно-исследовательской работы существует вероятность воздействия следующих производственных факторов: шум, недостаточная освещенность, работа при высоких температурах, физические и эмоциональные перегрузки.

К физическим факторам можно отнести опасность поражения электрическим током, поскольку работать приходится с оборудованием, питающимся от сети -220В 50Гц.

Таблица 6.1 Опасные и вредные факторы при выполнении работ на ионном ускорителе ТЕМП-4М

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) подготовка ускорителя ТЕМП-4М для проведения экспериментов; 2) сборка диодной системы; 3) эксперименты непосредственно с ионном В _r -диоде на ускорителе ТЕМП-4М.	повышенный уровень шума; неблагоприятные условия микроклимата; повышенный уровень электромагнитные излучения; недостаточная освещенность рабочего места.	источник термической опасности; электрический ток; статическое электричество повышенный уровень ионизирующих излучений	1. ГОСТ 12.1.003 - 83* «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности»; 2. Нормы искусственного освещения устанавливаются СП 52.13330.2011; 3. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электро-магнитные поля в производственных условиях» 4.ГОСТ 12.1.045-84 «ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля» 5.СанПиН 2.2.4.548-96 устанавливает гигиенические требования к микроклимату производственных помещений; 6.СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ". 7.СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 устанавливает гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы;

На производительность труда влияют следующие вредные производственные факторы:

- повышенный уровень шума;
- неблагоприятные условия микроклимата;
- повышенный уровень электромагнитного излучения;
- недостаточная освещенность рабочего места.

Повышенный уровень шума

Шум – совокупность аperiодических звуков различной интенсивности и частоты. С физиологической точки зрения шум – это всякий неблагоприятный воспринимаемый звук [36].

Источником шума является любой процесс, вызывающий местное изменение давления или механические колебания в твердых, жидких и газообразных средах. Шум имеет определенную частоту, или спектр, выражаемый в герцах, и интенсивность — уровень звукового давления, измеряемый в децибелах. Для человека область слышимых звуков определяется в интервале от 16 до 20 000 Гц.

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются, насосы, вытяжка, генератор импульсного напряжения.

Шум оказывает на организм человека неблагоприятное воздействие и может вызвать различного рода болезненные состояния, в том числе тугоухость и глухоту. Длительное воздействие шума оказывает вредное влияние на ЦНС и психику человека. В результате воздействия шума у человека появляются симптомы переутомления и истощения нервной системы. Со стороны психики наблюдается подавленное настроение, понижение внимания, задерживаются интеллектуальные процессы, повышается нервная возбудимость. Шум снижает работоспособность и производительность труда.

При выполнении экспериментов в лаборатории уровень шума составляет около 70 дБА. Для обеспечения гигиенической нормы шума при выполнении экспериментов в лабораториях необходимо пользоваться ГОСТ 12.1.003 - 83*

«ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» и СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий» согласно данным нормативным документам уровень шума в лабораториях не должен превышать 65 дБА [37].

В лаборатории для снижения воздействия шума используют индивидуальные средства защиты, в виде наушников. Также во время эксперимента персонал находится в пультовой комнате, огражденная металлической дверью металлическая дверь, отделяющая пультовую и помещение с ускорителем. Для снижения шума от генератора импульсного напряжения в лаборатории используется шкаф, в котором установлен генератор.

Неблагоприятные условия микроклимата

Независимо от состояния природных метеорологических условий в производственных помещениях и на рабочих местах должны быть созданы климатические условия, безопасные для человека и наиболее благоприятные для выполнения работы [38].

Под микроклиматом понимаются метеорологические условия внутренней среды рабочего помещения, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха и теплового излучения.

Согласно СанПину 2.2.4.548-96 [39] на любом рабочем месте должен осуществляться надзор по соблюдению санитарных правил. Исследовательская работа относится к работе средней тяжести (категория Па), микроклиматические условия на рабочих местах должны соответствовать требованиям, указанным в Таблица 2.

Таблица 6.2 – Оптимальные метеорологические условия для рабочей зоны согласно ГОСТ 12.1.005

Параметр.	Сезон года.	
	Холодный.	Тёплый.
	Оптим.	Оптим.
Температура, °С.	17-19	19-21
Влажность, %.	60-40	60-40
Скорость воздуха, м/с	0,2	0,2

При обеспечении допустимых показателей микроклимата температура внутренних поверхностей конструкции, ограждающих рабочую зону (стен, потолка, пола) не должна превышать предел допустимых величин температуры воздуха.

В холодный период года следует применять средства защиты рабочего места от радиационного охлаждения от остекленных поверхностей оконных проемов, в теплый период от попадания прямых солнечных лучей.

Интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей оборудования, осветительных приборов не должна превышать 70Вт/м при величине облучения поверхности от 25 % до 50 % на постоянных рабочих местах [40].

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

Повышенный уровень электромагнитного излучения

Электромагнитное поле при длительном воздействии на организм человека ухудшает работоспособность (повышается утомляемость, снижается качество выполняемых работ, возникают психологические расстройства).

Как и любая электроустановка, ионный ускоритель способен создавать электромагнитные поля. Предельно-допустимые значения электромагнитного поля регламентируются в специальном документе - СанПиН 2.2.4.1191-03 [41]. Существуют следующие нормы при разных частотах:

- 30–300 кГц — это напряжённость поля 25 В/м;

- 0,3–3 мГц — 15 В/м;
- 3–30 мГц — 10 В/м;
- 30–300 МГц — 3 В/м;
- от 300 мГц 300 ГГц — 10 мкВт/см².

В случае превышения данных показателей могут возникнуть различные проблемы со здоровьем человека. Самое опасное в электромагнитном поле это то, что его невозможно ощутить. Тем самым эффект (ухудшение здоровья) накапливается незаметно.

Для минимизации воздействия электромагнитного поля ускоритель находится в металлическом корпусе, являющимся защитным экраном от электромагнитного излучения.

Недостаточная освещенность рабочего месте

Свет является естественным условием жизни человека, необходимым для здоровья и высокой производительности труда, основанной на работе зрительного анализатора, самого тонкого и универсального органа чувств. Обеспечивая непосредственную связь организма с окружающим миром, свет является сигнальным раздражителем для органа зрения и организма в целом. Достаточное освещение действует тонизирующе, улучшает протекание основных процессов высшей нервной деятельности, стимулирует обменные и иммунобиологические процессы, оказывает влияние на формирование суточного ритма физиологических функций человека [42].

Предельно-допустимые значения освещения на рабочем месте нормируются в специальном документе – СП 52.13330.2011. Нормы освещенности рабочих помещений представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Нормы освещенности производственных помещений [43]

	Характеристики зрительной работы	Наименьший размер или объект различения	Разряд зрительной работы	Под-разряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристики фона	Освещенность, лк

Рабочее место в пультовой	Средней точности	Свыше 0.5 до 1.0	$\overline{\text{IV}}$	г	Средний, большой	Светлый, средний	200
Рабочее место в кабинете	Высокой точности	От 0.3 до 0.5	$\overline{\text{III}}$	в	Малый, средний, большой	Светлый, средний, темный	200

Для улучшения показателей освещения, необходимо использовать искусственное освещение в виде светильников, дополнительного внешнего освещения. Освещенность рабочего места от искусственного освещения соответствует характеристике зрительной работы, наименьшему размеру объекта различения, разряду зрительной работы, контрасту объектов с фоном, а также характеристике фона как мы видим в таблице 6.3.

6.1.2 Анализ опасных факторов производственной среды

Источник термической опасности

Термической опасности – это опасность, возникающая при горении, повышенной температуре поверхности и повышенной температуры вдыхаемого газа.

Термические опасности могут приводить к:

- ожогам и ошпариванию из-за соприкосновения с предметами или материалами, имеющими чрезвычайно высокую или низкую температуру, вызванную, например, пламенем или взрывом, а также излучением источников тепла;
- ущерб здоровью из-за воздействия высокой или низкой температуры окружающей производственной среды.

В данной выпускной квалификационной работе имеется один очаг термической опасности – это печь паромасляного насоса для откачки камеры с ионным диодом. Температура печи при работе может достигать от 200-300°C, данная температура опасна при соприкосновении и может привести к ожогам так и ошпариванию мягкой ткани человека.

Работа печи осуществляется в закрытом корпусе и рабочему персоналу сложно подобраться к месту излучение тепла. При необходимости соприкосновения с печью для выполнения каких-либо работ (ремонт или наладка), печи изначально дают остыть, после остывания до допустимых значений температуры, приступают к выполнению работы.

Электрический ток

Поражение электрическим током возникает при соприкосновении с электрической цепью, в которой присутствуют источники напряжения и/или источники тока, способные вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела. Обычно чувствительным для человека является пропускание тока силой более 1 мА [44].

Одной из особенностей поражения электрическим током является отсутствие внешних признаков, грозящих опасности, которые человек мог бы заблаговременно обнаружить с помощью органов чувств.

Ток приводит к серьезным повреждениям центральной нервной системы таких жизненно важных органов как сердце и легкие. Поэтому второй особенностью воздействия тока на человека является тяжесть поражения.

Третья особенность поражения человека электрическим током заключается в том, что токи промышленной частоты силой в (10-15)мА способны вызвать резко интенсивные судороги мышц.

Окружающая среда (влажность и температура воздуха, наличие заземленных металлических конструкций и полов, токопроводящей пыли и др.) оказывает дополнительное влияние на условия электробезопасности. Степень поражения электрическим током во многом зависит от плотности и площади контакта человека с токоведущими частями.

Безопасность эксплуатации при нормальном режиме работы установок обеспечивается следующими защитными мерами:

- применение изоляции;
- недоступность токоведущих частей;
- изоляция электрических частей от земли.

В отношении опасности поражения людей электрическим током различаются [45]:

1 Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность;

2 Помещения с повышенной опасностью, характеризующиеся наличием в них одного или следующих условий, создающих повышенную опасность:

а) сырости или токопроводящей пыли;

б) токопроводящих полов (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.);

в) высокой температуры;

г) возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, - с другой.

3 Особо опасные помещения, характеризующиеся наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:

а) особой сырости;

б) химически активной или органической среды;

в) одновременно двух или более условий повышенной опасности;

4 Территории размещения наружных электроустановок. В отношении опасности поражения людей электрическим током эти территории приравниваются к особо опасным помещениям.

Рабочее помещение лаборатория в отношении опасности поражения людей электрическим током относится к 1 группе, т.е. без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность. Рабочее место удовлетворяет всем требованиям безопасности жизнедеятельности: нет доступа к токоведущим частям, все источники питания пронумерованы.

Статическое электричество

Статическое электричество - это совокупность явлений, связанных с возникновением, сохранением и релаксацией свободного электрического заряда на поверхности, или в объеме диэлектриков, или на изолированных проводниках (ГОСТ 12.1.018). Образование и накопление зарядов на перерабатываемом материале связано с двумя следующими условиями:

Заряды статического электричества могут накапливаться и на теле человека (при работе или контакте с наэлектризованными материалами и изделиями). Высокое поверхностное сопротивление тканей человека затрудняет отекание зарядов, и человек может длительное время находиться под большим потенциалом [46].

Основной опасностью при электризации различных материалов является возможность возникновения искрового разряда, как с диэлектрической наэлектризованной поверхности, так и с изолированного проводящего объекта.

Для предупреждения образования статического электричества на элементах металлических конструкций, трубопроводах разного назначения, расположенных на расстоянии менее 10см параллельно друг друга, применяются замкнутые контуры, создаваемые с помощью устанавливаемых между ними металлических заземленных перемычек через каждые 20 м и менее. Для непрерывного снятия электростатических зарядов с человека используются электропроводящие полы, заземленные зоны или рабочие площадки, оборудование, трапы, а также средства индивидуальной защиты в виде антиэлектростатических халатов и обуви, с кожаной подошвой или подошвой из электропроводной резины.

Повышенный уровень ионизирующих излучений

При выполнении работы также нужно учитывать радиационное излучение, обусловленное возможностью облучения персонала тормозным излучением, возникающим при попадании ионного пучка на катод диода и мишень.

Радиационное излучение оказывает сильнейшее ионизирующее действие на человека. Механизм разрушительного действия гамма-квантов заключается в следующем:

1 Благодаря огромной проникающей способности «энергичные» гамма-кванты легко проникают в живые клетки, вызывая их повреждение и отравление.

2 По пути своего движения они оставляют разрушенные ими молекулы (ионы). Эти повреждённые частицы ионизируют новую порцию молекул.

3 Такая трансформация клеток вызывает сильнейшие изменения в её различных структурах. А изменившиеся или разрушенные составные части облучённых клеток разлагаются и начинают действовать как яды.

4 Заключительным этапом является рождение новых, но дефектных клеток, которые не могут выполнять необходимые функции.

Опасность гамма-излучения усугубляется отсутствием у человека механизма способного ощутить это воздействие вплоть до смертельных доз. Особая опасность гамма-излучения заключается в его способности накапливаться в организме, а также наличие скрытого периода воздействия.

Нормами радиационной безопасности СП.2.6.25.23-09 (НРБ-99/2009) устанавливаются следующие категории облучаемых лиц[47]:

персонал:

1 лица, работающие с техногенными источниками (группа А);

2 лица, по условиям работы находящиеся в сфере воздействия источников (группа Б).

население – все население, включая лиц из персонала вне сферы и условий их производственной деятельности (студенты относятся к группе население).

Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни группы Б, не должны превышать $\frac{1}{4}$ значения для персонала группы А.

Таблица 6.4 – Основные пределы доз[47]

Нормируемые величины	Дозовые пределы	
	Персонал группы А	население

Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год.	1,0 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5,0 мЗв в год.
Эквивалентная доза за год		
- в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
- в коже	500 мЗв	50 мЗв
- кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

Радиационная защита ускорителей элементарных частиц выполняется так, чтобы обеспечить суммарную дозу облучения для персонала и населения не превышающую 20 мЗв в год для персонала группы А, и 5 мЗв в год для персонала группы Б, и 1 мЗв в год для населения. Все эти данные регламентируются документом НРБ-99/2009. Также следует учитывать время, в течении которого ускоритель будет работать с коэффициентом запас равным 2. Расчет радиационной защиты производится с помощью СанПин 2.6.1.2573-10.

При проведении экспериментов в помещении, где располагается ускоритель, доза радиации не превышает 5 мкЗв в час (120 мЗв в год при 1700 рабочих часах). Во избежание облучения при работе используется средство коллективной защиты: защищенное место от воздействия радиационного излучения, где рабочий персонал находится в пультовой, отделенной от установки толстой бетонной стеной и металлической дверью, не пропускающих рентгеновское тормозное излучение, в которой доза радиации не превышает 1 мЗв в час.

6.2 Экологическая безопасность

Ускоритель ТЕМП 4-М имеет систему с принудительной конвекцией паромасляного насоса, в качестве охлаждающей жидкости используется техническая вода. Однако загрязнения воды и канализационных выбросов при работе не происходит. Также в лаборатории в процессе работы образуются такие вещества как пыль, и аэрозоли. Для их удаления применяют вытяжную

вентиляцию, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяют фильтры. Данный фильтр обеспечит задержку частиц меньше 0,1 микрона и защитит окружающую среду от радиоактивной пыли и аэрозольных примесей. В результате выполнения работы, наличие отходов не планируется.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Среди возможных ЧС наиболее вероятным является возникновение пожара. Пожар может произойти вследствие перегрева электродов или проблем с изоляцией. На ускорителе ТЕМП-4М используется баллон с азотом в работе при основных и газовых разрядниках. Имеется инструкция по технике безопасности для работников, использующих при работе баллонов со сжатыми и сжиженными газами.

На рабочем месте баллоны должны находиться в металлических шкафах или в специально оборудованных местах, обеспечивающих их защиту от воздействия солнечных лучей, осадков, нагревания, механического воздействия и падения. В свою очередь баллоны должны быть надежно укреплены с помощью хомутов, цепочки или троса. Расстояние от ближайшего радиатора или отопительного прибора до баллона должно быть не менее 1 м, от газовых горелок – не менее 1,5 м, от печей и других источников тепла с открытым пламенем – не менее 5 м. Работа с газами, находящимися в баллонах, опасна и требует большой осторожности, внимания и соблюдения установленных правил и инструкций.

Помещение лаборатории имеет категорию В [Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"[48].

Для предотвращения возникновения пожара применяются следующие шаги: проверка персонала на предмет знаний пожарной безопасности, выполнение работ в соответствии с правилами, плановый осмотр установок.

Экспериментальная установка устойчива к возникновению пожара, т.к., все токоведущие части надежно изолированы и проверяются согласно плану. Если все же возникнет пожар, персонал будет действовать в следующем порядке:

- Вызвать пожарный расчет;
- Отключить все электроустановки;
- Закрыть окна и двери, чтобы убрать сквозняк и доступ кислорода для горения;
- Воспользоваться первичными средствами пожаротушения (огнетушитель ОУ-5-ВСЕ). При невозможности - начать эвакуацию.

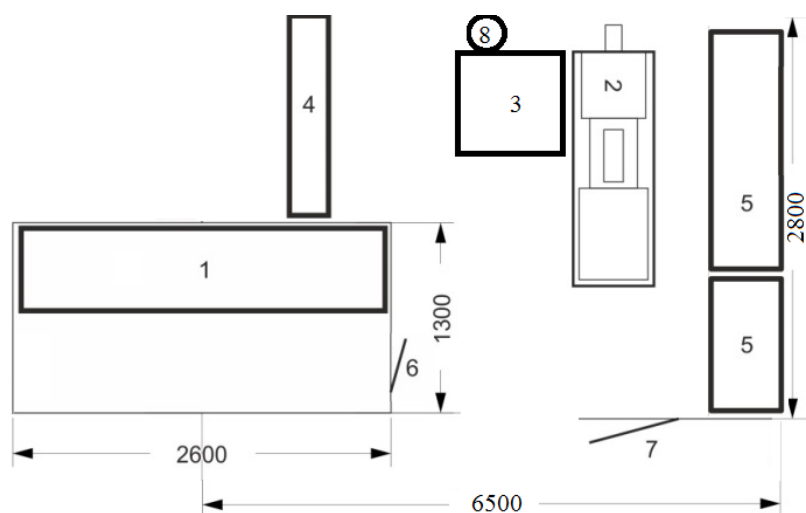
6.4 Правовые и организационные мероприятия обеспечения безопасности

Рабочее место - это часть пространства, в котором инженер (работник) осуществляет трудовую деятельность, и проводит большую часть рабочего времени. Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности инженера, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера обеспечивает ему удобное положение при работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

При правильной организации рабочего места, возрастает производительность труда инженера (работника).

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы.

Расположение и компоновка рабочего места пультовой представлена на рисунке 6.1.



1 – рабочее место, оборудованное управлением и мониторинга ускорителя;
 2 – импульсный ионный ускоритель ТЕМП-4М; 3 – ГИН (генератор импульсных напряжений); 4 – стеллаж с запасными частями; 5 – стол для выполнения работ; 6 – металлическая дверь, отделяющая пультовую и помещение с ускорителем; 7 – входная металлическая дверь; 8 – Баллон сжатым газом (азот)

Рисунок 6.1 – компоновка рабочего места пультовой

Размерные характеристики рабочего места, требования к размещению органов управления и требования к расположению средств отображения информации соответствуют требованиям ГОСТ 12.2.032-78 на рабочем месте [49].

Заключение

По результатам проделанной работы были получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Выполнен расчет параметров и геометрии ионного V_r -диода. Определены основные параметры МИП с учетом его расходимости обусловленной различными факторами. Проведены исследования изменения плотности тока и энергии ионного пучка, и его геометрии при транспортировке к мишени. Определен угол расходимости пучка и изменение размеров отпечатка пучка.

2. Разработан анодный узел с эмиссионными покрытиями на основе графита и С-ткани. В ходе работы исследованы параметры МИП при использовании данных покрытий в ионном V_r -диоде. Показано, что использование графита в качестве эмиссионного покрытия анода позволит повысить ресурс работы ионного V_r -диода. Выполнен сравнительный анализ параметров МИП при использовании графита и С-ткани.

3. Выполнены исследования параметров МИП при предварительной наработке плазмы в А-К области ионного V_r -диода за счет приложения предварительного импульса напряжения отрицательной полярности относительно анода. Данный подход позволяет увеличить плотность ионного тока в фокальной плоскости ионного диода.

4. Выполнены исследования уменьшения расходимости МИП за счет ионно-электронной эмиссии. Разработана система металлических электродов в виде двух медных конусов, обеспечивающих повышение плотности тока и энергии МИП в фокальной плоскости диода. По результатам опытов, фокусировка с помощью данного метода привела к увеличению плотности тока в 1,75 раз.

Список публикаций студента

1. Рысбаев К.Ж., Степанов А.В., Шаманин В.И. Исследование генерации мощных ионных пучков в диоде с внешней магнитной изоляцией и взрывоэмиссионным источником плазмы // Известие вузов. Физики. – 2017. - Т. 60, № 12. – С. 53-56.

Список использованных источников

- 1 Ремнев Г. Е. Модификация материалов с использованием мощных ионных пучков / Г. Е. Ремнев // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. - 2000. - Т. 303, вып. 2: Радиационная физика твердого тела и радиационные технологии. —С. 59-70.
- 2 Пушкарев А.И., Исакова Ю. И., Сазонов Р.В., Холодная Г.Е. Генерация пучков заряженных частиц в диодах со взрывоэмиссионным катодом. – М.: Физматлит, 2013. – 240 С.
- 3 Быстрицкий В. М., Диденко А. Н. Мощные ионные пучки – М., Энергоатомиздат. – 1988. – С. 152.
- 4 Humphries S.. Pulsed plasma guns for intense ion beam injectors // Review of Scientific Instruments. – 1981. – Vol.52. - №2. – P. 162-171.
- 5 Усов Ю. П., Логачев Е. И., Ремнев Г. Е. Ускорение ионов из взрывоэмиссионной плазмы // Письма в журнал технической физики. – 1980. – Т. 6. – В. 22. – С. 1404-1406.
- 6 Stephen A., David B. Magnetic insulation of extraction Applied-B ion diodes // Journal of Applied Physics. – 1986. – Vol. 59. – P. 2685.
- 7 Johnson D. J., Quintenz J. P. Anode plasma behavior in a magnetically insulated ion diode// Journal of Applied Physics. – 1985. – Vol. 52. – P. 168.
- 8 Deichuli P. P., Fedorov V. M. Intense ion beams generation in MID with H_r - field// The 8th international conference on high-power particle beams. –Russia, Novosibirsk. – 1990. – Vol. 1. – P. [469-474].
- 9 Timothy J. Renk et al. // Institute of Electrical and Electronics Engineers, - 2004. - Vol. 92, P. 785.
- 10 Быстрицкий В. М., Бойко В. И., Красик Я. Е. и др. Генерация и фокусировка мощного ионного пучка в магнитоизолированном диоде // Физика плазмы. – 1989. – Т.15. – Вып.11. – С. 1337.

- 11 Фурман Э.Г., Лопатин В. С., Степанов А. В., Ремнев Г.Е., Макеев В.А. Ионный диод с внешней магнитной изоляцией // Приборы и техника эксперимента. – 2004. - №4. –С. 70-75.
- 12 Petrov A., Polkovnikova N., Tolmacheva V., Matvienko V., Shlapakovski A. Formation of high power ion beams in the magnetically insulated diode with the induction gas Breakdown based anode plasma source // The 6th Int. Conf. Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Russia. – Tomsk. – 2002. – Vol. 65. - № 3. – P.147 – 178.
- 13 Bitteker L. J., Wood B. P., Davis H. A., and Waganaar W. J. Development of the Los Alamos continuous high average – power microsecond pulser ion accelerator // Review of Scientific Instruments. – 2000. – Vol. 71. - № 10. – P.3677 – 3683.
- 14 Welch D. R., Olson C. L., Mehlhorn T. A. Gas Breakdown effects in the generation and transport of light ion beams for fusion // Physics plasma. – 1996. – Vol.3. - №5. – P. 2113-2121.
- 15 Winterberg F. // In: Physics of High Energy.—N.Y.: Academic Press, 1971, P. 370.
- 16 Desjarlais M. P., et al. Evolution and Control of Ion-Beam Divergence in Applied-B Diodes // Physics Review Letters. – 1991. – Vol. 67. – P. 3094.
- 17 Werner Z., Piekoszanski J., Szymczyk W. Application of high intensity pulsed ion and plasma beams in modification of materials // Vacuum. – 2001. – Vol. 63. – P. 701-708.
- 18 P. P. Deichuli, V. M. Fedorov // The 6th Symposium on High Current Electronics. – 1986. – Vol. 17 – P.166.
- 19 Stepanov A. V., Remnev G. E. The magnetic field distribution in acceleration gap of magnetically insulated ion diode // 17th International Conference on High-Power Particle Beams. – Xi'an, China – 2008. – P.[423-426].
- 20 Timothy J. Renk // 42th International Conference on High-Power Particle Beams, Tomsk – 2004. –Vol. 92, – P. 785.
- 21 G. E. Remnev // Surface and Coatings Technology – 1999. V. 12. – P.206.

- 22 M. Kaikanov, K. Baigarin, A. Tikhonov, A Urazbayev, J W Kwan, E Henestroza, G Remnev, B Shubin, A Stepanov, V Shamanin, W L Waldron. An accelerator facility for WDM, HEDP, and HIF investigations in Nazarbayev University// *Journal of Physics: Conference Series*. – GBR. – 2016.– Vol. 9. – P. 469-474.
- 23 Вюрц Г., Вязьменова Г.А., Кузнецов В.С., Энгелько В.И. Фокусировка компенсированного протонного пучка с высоким коэффициентом компрессии// *Журнал технической физики*. – 1997. – Т.67, № 5. – [С. 73-80].
- 24 Nakagawa Y, Tamotsu E. Compression and propagation of an intense ion beam in a strong magnetic field// *Plasma Physics*, 1986, v. 11, P. 470.
- 25 Remnev G.E., I.F. Isakov, M.S. Opekounov, et al. High-power Ion Sources for Industrial Application // *Surface and Coatings Technology* – 1997. – vol. 96. – [С. 103–109].
- 26 Усов Ю. П., Логачев Е. И., Ремнев Г. Е. Ускорение ионов из взрывоземиссионной плазмы // *Письма в журнал технической физики*. – 1980. – Т. 6. – В. 22. – [С. 1404-1406].
- 27 Усов Ю. П., Логачев Е. И., Ремнев Г. Е. Ускоритель тяжелых ионов // *Приборы и техника эксперимента*. – 1983. - № 1. –С. 21-23.
- 28 Фурман Э. Г., Степанов А. В., Макеев В. А. Импульсная система питания катушек магнитного поля ионного диода // *Приборы и техника эксперимента*. – 2007. - № 2. –С. 107-111.
- 29 С.Е. Christodoulides and J.H. Freeman. Ion beam studies Part II: A calorimetric method for ion beam studies// *Nuclear Instruments and Methods*. Vol. 135. – 1976. – P. 13-19.
- 30 Langmuir I. // *Physical Review*.– 1913. Vol. 2. – P. 450.
- 31 В. В. Никольский, Т. И. Никольская. *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.: Наука., 1989. - 544 с.
- 32 П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. *Расчет индуктивностей*. Справочная книга. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

- 33 Xin J.P., Zhu X.P., and Lei M. K. // *Physics of Plasmas*– 2008. – V. 15 (123108). – P. 1–8.
- 34 Johnson D. J., Quintenz J. P. , and Sweeney M. A.// *Journal of Applied Physics*.– 1985. – V. 57. – No. 3. – P. 794– 805.
- 35 Remnev G. E., Isakov I. F., Opekounov M. S., et al. // *Surface and Coatings Technology*– 1997. – V. 96. – P. 103–109.
- 36 Дубовцев В.А. Безопасность жизнедеятельности. /Учеб. пособие для дипломников. - Киров: изд. КирПИ, 1992. – 468.
- 37 ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
- 38 Безопасность жизнедеятельности: Учебник/Под ред. проф. Э.А. Арустамова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2006.
- 39 СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещениях» от 1 октября 1996г. №21.
- 40 ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
- 41 СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. М.: Министерство юстиции, 2003.
- 42 СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещениях» от 1 октября 1996г. №21.
- 43 СНиП 23 – 05 –95*. Нормы проектирования. Естественное и искусственное освещение. М.: Минстрой России, 2011.
- 44 ГОСТ 12.1.002 – 84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.
- 45 ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
- 46 ГОСТ 12.1.018-93 ССБТ. Пожаровзрывобезопасность статического электричества.

47 СП 2.6.1–758–99. Нормы радиационной безопасности, НРБ–99. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999.

48 Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности". Статья 19. Классификация взрывоопасных зон.

49 ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

Приложение А

(обязательное)

Chapter 1

Ionic Br-diode for generating a high-intensity pulsed ion beam

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рысбаев К.Ж.		

Руководитель ВКР:

Должность	Ф.И.О.	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИШФВП	Степанов А.В.	Кандидат технических наук		

Консультант - лингвист отделения иностранных языков:

Должность	Ф.И.О.	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение иностранных языков, старший преподаватель	Квашнина О.С.			

A.1 Ionic B_r -diode for generating a high-intensity pulsed ion beam

A.1.1 Magnetic insulation of B_r -ion diode with external magnetic field

The idea of using magnetic isolation in ion diodes was first proposed by Winterberg. The essence of magnetic insulation consists in imposing an external (or intrinsic) magnetic field (perpendicular to the electric field) on the anode-cathode (A-C) gap region of such a magnitude that it suppresses the passage through diode of the electronic component of the current (Figure A.1).

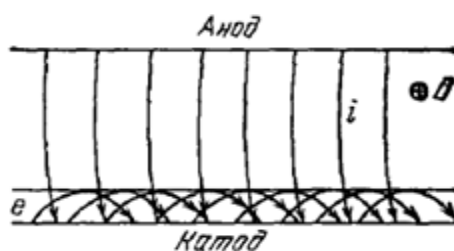


Figure A.1 – Schematic diagram of drift electron (e) and ion fluxes (i) in a magnetically isolated diode

The electron fluxes are limited in the near-cathode layer, the thickness of which depends on the external parameters - the potential difference, magnitude of A-C gap and magnetic field. Owing to much larger mass, ions that cross A-C gap experience only a slight deviation in the transverse magnetic field.

The role of the magnetic field is to limit the flow of electrons in the near-cathode region and to form a virtual cathode. The mode of operation of the magnetically isolated diode (MID) and the parameters of the ion beam depend on the configuration of the magnetic field in the region of A-C gap. High efficiency of ion current generation in MID is achieved when several conditions are fulfilled:

- strict parallelism of the force magnetic lines in A-C gap to the surfaces of electrodes, otherwise there are inhomogeneities of the ion flux and local fluctuations in its density,
- absence within the A-C gap of the lines of force crossing both the anode and the cathode, or the formation of the maximum possible extension of the lines of force crossing both the electrodes and the metal parts of their holders, and the

minimum magnetic field strength on the cathode surface in the region of intersection with these lines,

– closure of the drift trajectories inside A-C gap in the crossed electromagnetic fields ($E \times B$) of the electron beam, non-closed drift leads to a local accumulation of the electron charge and its disruption to the anode.

In addition, to ensure the transportation and focusing of ion beam, the configuration of magnetic fields and the design of the diode must provide shielding of the insulating magnetic field in the output section of the beam of ions from the diode.

A common criterion determining the occurrence of a magnetically isolated flow from a diode independent of A-C gap geometry is the critical magnetic field B_{cr} . The critical value of the magnetic field depends on the geometry of MID itself and the applied potential difference, the geometry of the insulating magnetic flux, its conservation in the A-C gap, the time of its inclusion, and the nature of the increase.

Magnetic isolation of the electron current occurs when the magnetic field in the AK gap exceeds the critical value of the magnetic field induction $B > B_{cr}$.

Magnetic isolation of the electron current occurs when the magnetic field in the AK gap exceeds the critical value of the magnetic field induction $B > B_{cr}$. For ion B_r -diodes with closed electron drift, the critical value of the magnetic field induction B_{cr} is not a well-defined function of the magnitude of the A-K gap of the diode and the accelerating voltage [1]. The critical value of magnetic field induction is defined as:

$$B_{kp} = \left(\frac{r_f}{r_i}\right) \cdot [2eUmc^2 + (eU)^2]^{1/2} / edc, \quad (1)$$

where r_i – initial radius of the electron in m,

r_f – radius of electron, which hits the anode in m,

U – voltage at the anode in volts,

c – speed of light in m/s,

m and e – mass and charge of an electron, respectively, in kg and in K,

d – value of the AK gap in m.

When electrons are removed from the anode using a magnetic field, depending on the state in which the ion beam generation process takes place. The efficiency of high-intensity pulsed ion beam (HIPIB) generation depends on the nature of the drift of the electron beam in the crossed electric and magnetic fields in A-C gap and the general theory of electronic leakage. The latter become dominant when there are lines of force in AK-gap that cross both electrodes at the same time, which is due to the flow of an electron current loading diode along them. The drift along open trajectories leads to the detachment of the near-cathode electron flux at the edge of the cathode, accompanied by local oscillations of the electron density and microwave generation. This high conductivity along magnetic lines of force in vacuum for plasma or cold electrons ensures the creation of a pseudocathode surface along them. In connection with this, the nonparallelism of the surfaces of MFA electrodes to magnetic lines of force can lead to a disruption of the homogeneity of the ion flux and to local oscillations of its density by a factor of 2-5 [2].

The mechanism of the ion diode is based on the creation of an electron cloud (e.o.), which serves as the cathode in a diode. Accumulation of charge in e.o. occurs in crossed electric and magnetic fields. Accumulated charge carriers perform a closed azimuthal drift motion along the cycloid at the anode surface, which is provided by radially converging lines of magnetic induction of two windings, with a slight radial drift along the radius along the anode surface. The trajectories of electrons in the radial direction are slowly curled spirals.

According to [3], the magnitude of the ion current is determined by the difference in the magnetic field pressure at anode and cathode, which is determined by the direction of the drift of the electron current in the A-C gap. The drift motion of electrons changes the configuration of the magnetic field in the A-C gap by amplifying the field near the anode surface B_A and weakening the magnetic field B_C at the edges of the cathodes (Figure A.2).

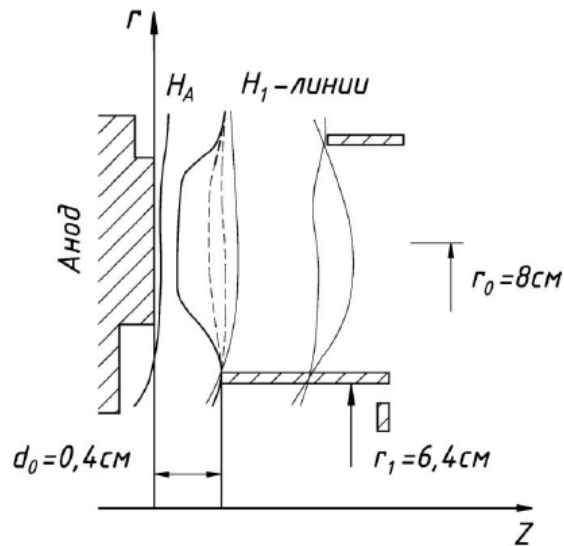


Figure A.2 – Change in the magnetic field due to the electron drift current in the MID with a hollow cathode

The difference in the cathode-anode magnetic pressure is balanced by the momentum of the ion flow to the cathode.

In work [4] investigated the dependence of the ion current density J_i on the ratio of the magnetic field strengths at the internal and external cathode B_1/B_2 (Figure A.3).

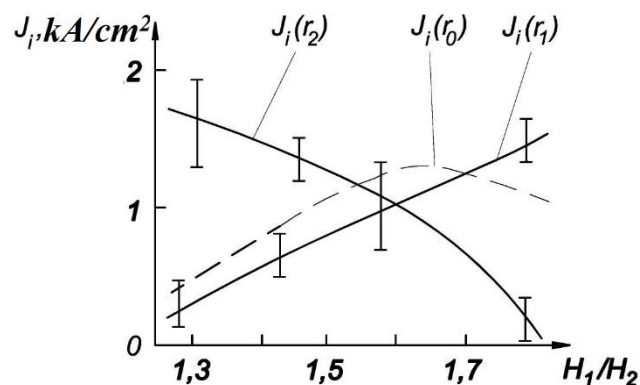


Figure A.3 – Profiles of the current density distribution of MIP J_i at a distance of 1.5 cm from the anode: $J_i(r_2)$ is the current density of the MIP in the outer cathode, $J_i(r_1)$ is the current density of the MIP at the inner cathode, $J_i(r_0)$ is the current density of the MIP at the midpoint between cathodes

The value of B_1/B_2 was determined by the ratio of the currents in the magnetic field coils at a given ratio of the diode d_1/d_2 gaps A-K, where d_1 is the gap between the anode and the edge of the inner cathode, d_2 is the gap between the anode and the edge

of the outer cathode (Figure A.3). According to this dependence, the radial distribution of the ion current density $J_i(r_0)$ has a maximum value $J_i = 1300 \text{ A/cm}^2$ at a ratio of $B_1/B_2 = 1.6$. In the range of variation $B_1/B_2 = 1.3-1.6$, the dependence of the ion current density J_i is shallow, in this case the emitter is the edge of the outer cathode. With an increase in the ratio $B_1/B_2 > 1.6$, the electron emission mainly comes from the edge of the inner cathode. The optimal ratio B_1/B_2 , at the maximum current density of the MIS J_1 depends on the ratio d_1/d_2 . In these experiments, a better uniformity of the ion beam was obtained, when the electron emitter was the edge of the inner cathode.

The influence of the configuration of the magnetic field in the A-K gap on the parameters of the ion B_r -diode is investigated in the work [5]. The configuration of the magnetic field at the surface of the anode was determined, including the position of the magnetic field coils and the ratio of their ampere turns, while maintaining the magnetic flux constant. The ratio of the ampere-turns of the magnetic field coils varied in the range:

$$0,44 < IN_1 / IN_2 < 0,56, \quad (2)$$

where N_1 - number of turns of the outer coil;

N_2 - number of turns of the inner coil;

I - coil current. The number of turns of the external coil N_1 varied from 11 to 14, the number of turns of the inner coil remained constant $N_2 = 25$.

Distribution of the induction of the magnetic field along the surface of the anode and the edges of the outer and inner cathodes is shown in figure A.4. At a given position of the magnetic field coils, the change in the ratio of ampere turns influenced the distribution of the induction along the surface of the anode to a greater extent, and the distribution of the induction of the magnetic field did not change significantly in the cathode region. At a ratio of ampere-turns $IN_1 / IN_2 = 0.56$, the "surface" of the magnetic field formed at the anode surface, which was caused by the effect of an induced eddy current in the surface layer of the anode.

Due to the heterogeneity of the magnetic field distribution at the anode surface, the magnetic isolation of the electrons was violated in this region. Therefore, the

formation of a plasma layer on the surface of the anode was not effective, i.e., the area of the emission surface decreased.

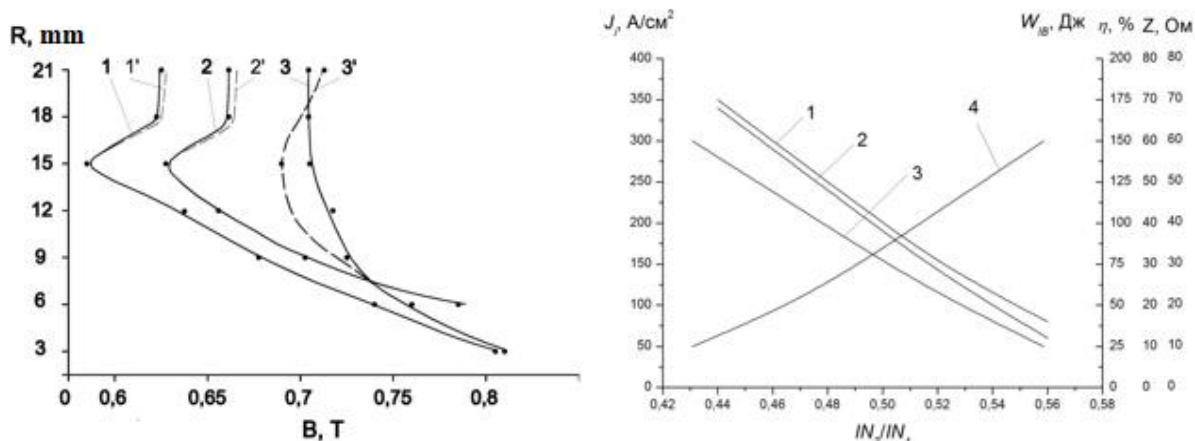


Figure A.4 – The distribution of the induction B of the magnetic field in the region AB of the gap (a): 1 and 1' for the emission edges of the inner cathode, 2 and 2' for the emission edges of the outer cathode, 3 and 3' for the anode surface; dependence of the parameters of the ion diode on the ratio of ampere-turns (b): 1 - ion current density, 2 - ion beam energy, 3 - energy conversion efficiency, 4 - diode impedance

In the case of a uniform increase in the induction of the magnetic field along the surface of the anode with decreasing radius (curve 4, figure A.4), the diode impedance corresponded to 10Ω , and the efficiency of the energy conversion by the diode reached 60% (curve 3, figure A.4). The current density of the ion beam in the focal plane of the diode was maximal and amounted to 350 A/cm^2 , the energy of the ion beam reached 150 J. An average energy value of 1.4 J/cm^2 per unit area of the anode-working surface.

A.1.2 Transportation of a high intense pulsed ion beam to a target

One of the most important problems associated with the use of both electron and ionic high-current beams is the problem of their focusing and transport.

The high density of high-current ion beams 10^{11} - 10^{13} ion/cm^3 leads to the fact that if the beams are not neutralized, the potential sag in them can reach hundreds and thousands of kilovolts, and the corresponding field intensities of 10^5 - 10^6 V/cm cause

the scattering of such a beam on lengths of the order of its transverse dimensions. This necessitates the complete neutralization of ion beams in charge for their removal from the diode systems. It must also be taken into account that all ion beams produced in diodes have an intrinsic temperature due to the temperature of the generating plasma, which leads to an additional expansion of the drifting beam. Experimentally established temperatures of the anode plasma, depending on the method of its formation, lie in the range of units - tens of electron volts.

Alternative ways of neutralizing high intense pulsed ion beam (HIPIB) is the ionization of the residual gas in the drift region or the preliminary creation of plasma. This method is very effective for the derivation of HIPIB from a pinch-diode, in which large intrinsic magnetic fields can lead to current decompensation of the HIPIB.

The authors [6] was carried out an experiment to study the effect of beam neutralization by plasma. An experiment was carried out on TEMP-4 single-gap accelerator by the next parametr: current of proton beam 10 kA, energy of the beam 370 keV and a pulse length of <100 ns. Figure A.5 shows the experimental layout.

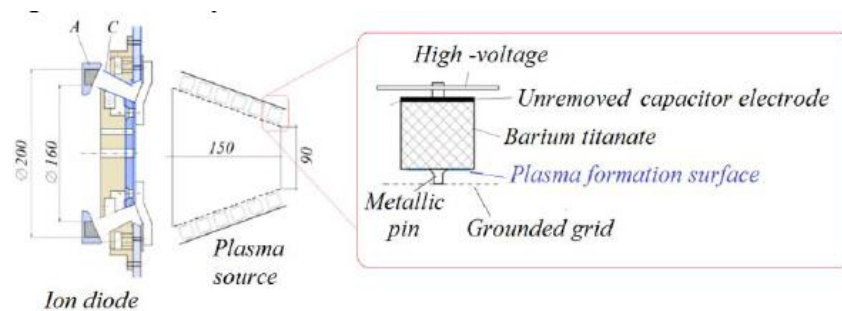


Figure A.5 – Experiment layout of the Neutralized Transport Experiment

A plasma source was developed for the experiment (Figure A.6). The plasma source is a hollow cone made of an array of barium titanate ceramic capacitors with relative permittivity $\epsilon = 900-1000$. High voltage (17 kV, 4 μ s) is applied to the outer electrode and a grid on the inner surface connects all capacitors to ground. Flashover discharge, starting at the triple points of metal-ceramic-vacuum contact, is formed on the ceramic surface and the generated plasma flows through the grounded grid to fill the inner region of the conical plasma source.

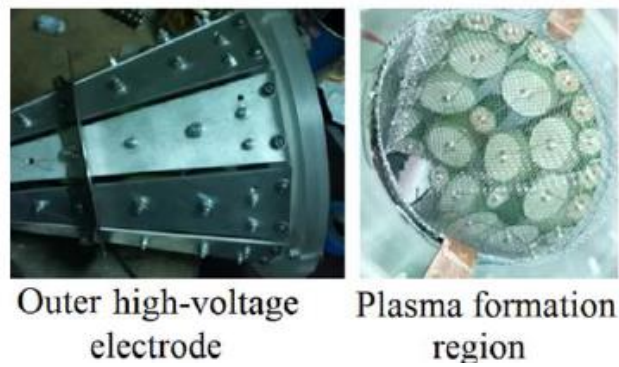


Figure A.6 – Conical Plasma Source

By using a biased Faraday cup we estimated the plasma density to be $> 10^{10}$ cm^{-3} near the grounded grid of the plasma source, where the beam is expected to be transported. 1.5 cm diameter copper target was used as a calorimeter to measure the total energy of the ion beam at different distances from the cathode (5, 8, and 11 cm). The results showed that the ion beam had been neutralized, thus affecting the beam focus. The energy density of the ion beam at the focal spot increased by a factor of 2, with corresponding radiosensitive film confirming similar results as shown in Figure A.7.

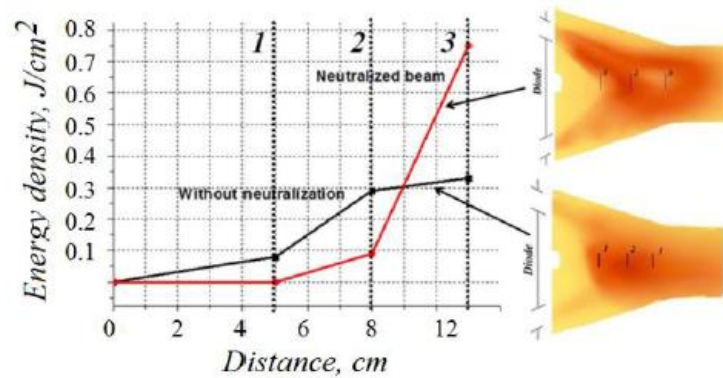


Figure A.7– Result of the Neutralized Transport Experiment

There is also a ballistic focusing during transporting a high-intensity ion beam to the target. The use of ballistic focusing in magnetically isolated diodes (MID) is attractive because of the possibility of forming the necessary plasma, considering the divergence of the HIPIB due to the Coulomb repulsion in the anode-cathode (A-C) gap and the beam deflection during passage through the cathode windows. This possibility is based on the use of fast magnetic fields whose duration of diffusion

inside the conductive electrodes of the system significantly exceeds the pulse duration. A similar magnetic "cushion" can be created by passing a current generating an insulating magnetic field through the diode electrodes or in diodes with self-isolation. The use of fast magnetic fields limited by the A-C gap makes it possible to increase the degree of ballistic focusing of the ion beam by a factor of $r_a/2d$ compared to the case of fields penetrating into the cathode space. This is due to a significant decrease in the transport length of the ion beam in a transverse magnetic field.

The authors [7] carried out a research of the HIPIB focusing on an ion diode with a passive plasma source at the anode. Experiments were performed on the accelerator "VERA". Accelerator parameters in the coordinated mode of operation: the anode voltage is 0.5 MB, the voltage pulse duration is 80 ns, the impedance of the double forming line (DFL). Authors measured the direction of the HIPIB trajectories by means of a pinhole camera that were installed at three different distances from the anode (12 cm, 15 cm, 19 cm), which provided average angles of convergence of the beams to the focus in the range from 35° to 15° for the inner and outer regions of the transverse section of the beam. According to the measurement results, it is revealed that the outer layer of the beam experiences the greatest deviation from the diode surface direction. The authors state that the main part of the beam ions is focused in the focal plane \varnothing 50 mm at a distance of 15 cm from the anode.

The authors indicated that the possible reasons for the poor focusing of ion beams are: the charge undercompensation of the HIPIB, poor alignment of the A-C gap, the temperature of the HIPIB at the exit from the B_r -diode (including the initial plasma temperature), the residual magnetic flux on the HIPIB path to the focus, and the incomplete current compensation of the HIPIB. Uncompensated HIPIB charge has approximately a half contribution to the resulting beam divergence. The remaining half is due to the inaccuracy of the alignment, the high HIPIB temperature and the final magnetic flux intersected by the ions. Elimination of the main causes, in addition to the plasma temperature, will significantly increase the density of HIPIB in the focal plane.

The compression of an ion beam by a strong magnetic field is effective for focusing a high-density ion beam, since it is a charged neutralized high-density ion

beam. Even if the ion beam has a relatively large divergence angle and a large energy spread, it is assumed that a strong magnetic field can compress an ion beam in the same way it compresses plasma with a high density. An intense pulsed ion beam injected axially into a magnetic field behaves differently than a conventional low-density ion beam, since it has a high density with accompanying electrons.

In [8], in order to achieve the required power density on the target, a combined method of focusing was used: due to ballistic focusing and magnetic compression. In the experiment a diode with a multi-point explosive emission cathode and a desorption anode was used. The authors carried out experiments on beam focusing in the presence and absence of an external magnetic field. It was proved that the presence of an external magnetic field improves beam focusing in the ballistic region. Figure A.8 shows the current density distribution over the cross section of the ballistic crossover. Results of the experiment revealed that the energy density increased from 1.3 A/cm² to 2.1 A/cm².

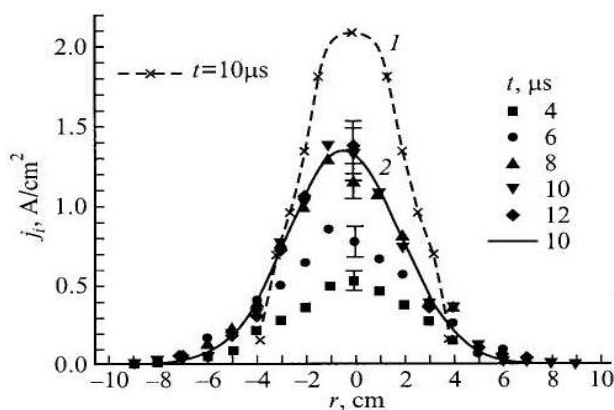


Figure A.8 – Current density distribution in the ballistic focus plane (1) with and (2) without the external magnetic field

The authors [9] considered a scheme for the formation of a proton beam with the following parameters: proton energy 10-30 keV, pulse duration greater than 10 μs, power density 10MV/cm², current density 0.3-1 kA/cm². A combined beam focusing method was chosen, including ballistic focusing and magnetic compression. The beam was injected along the convergent magnetic field force lines; the configuration was as close as possible to the trajectory of the protons (Figure A.9). Protons are not magnetized in the first section of L₁. Due to the increase in magnetic

induction, at the end of the first segment the protons became magnetized. In the second section of L_2 , magnetic field increased adiabatically.

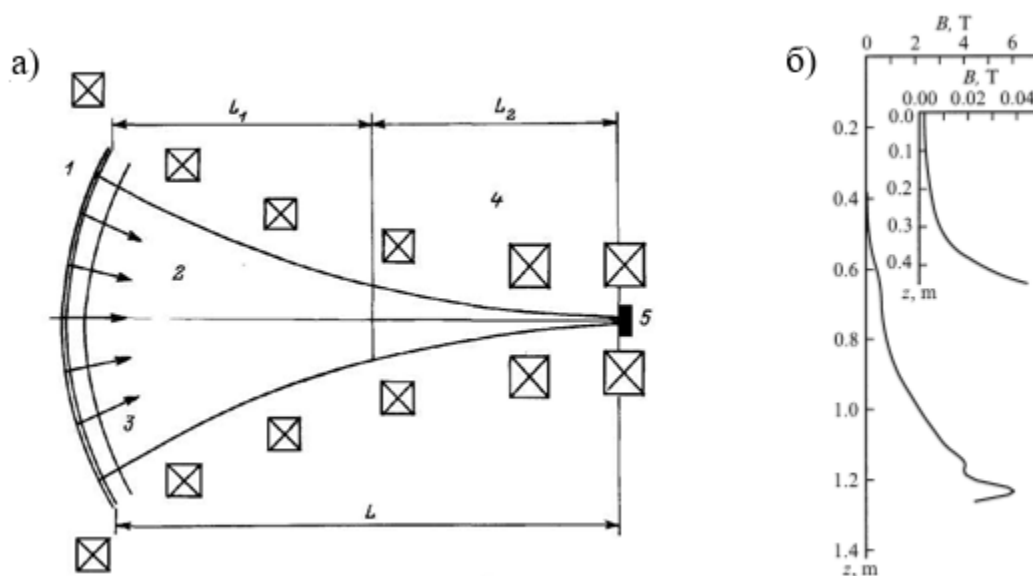


Figure A.9 – The proton beam focusing layout. a – trajectory layout: 1 – anode, 2 – protons, 3 – cathode, 4 – magnets, 5 – target; б – trajectory of an proton with an energy of 15 keV in a two-conical magnetic field at $\Delta r'_0 = 0$

In [6] focusing of the ion beam was realized only due to compression by a magnetic field. Experimental results concerning the behavior of an intense pulsed ion beam (50 keV, 80 A/cm², and a pulse length of 400 ns) injected axially into a strong magnetic field (up to 2.2 T) are described. This long pulse, high-density proton beam was efficiently guided and compressed ($2r=6$ cm to $2r=2$ cm) by a magnetic field. The current density at the center of the beam and the field maximum (40 cm from the diode) increased by a factor of 4 (up to 320 A/cm²). The beam radius determined by the snow-plow model indicated that a more effective compression could be achieved by a strong magnetic field under ideal conditions. By applying a magnetic field larger than 0.8 T, the ion beam propagated 50 cm without loss. The installation is shown in Figure A.10.

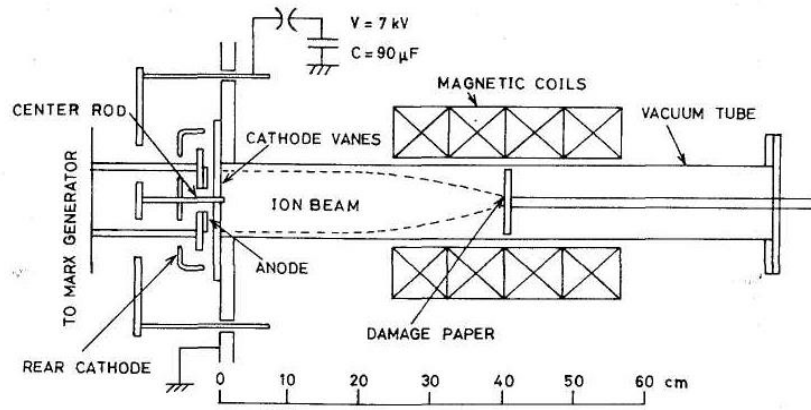


Figure A.10 – The installation of the experiment

A Marx generator consisted of four low inductance capacitors ($2 \mu\text{F}$, 50 kV max) and its output impedance was about 3Ω . A positive high voltage was supplied to an anode made of acrylate with copper pins (inner and outer diameters of 3.6 and 9.0 cm , respectively). For the insulation of the diode gap (10 mm), an azimuthal magnetic field was produced around the center rod by a 50 kA approximate current flowing in the center rod. The anode plasma was produced by a surface discharge on the anode. Protons extracted from the anode plasma were injected into the drift tube through 24 cathode vanes. The rear cathode was used to reduce the electron leakage current into the anode. The drift tube was a thin (0.3 mm thickness and 93 mm inner diameter) stainless-steel tube inserted inside a glass vacuum tube (100 mm outside diameter) and grounded. Four magnetic coils (14 cm inside diameter, 24 cm outside diameter, 5.5 cm long, and 80 turns each) were energized by a capacitor bank and produced a strong magnetic field (up to 2.2 T). Its rise time was 3 or 4 ms . The distance between the field maximum and the diode was 40 cm . The vacuum chamber was evacuated down to $5 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$. The divergence angle of the beam was between 3° and 6° .

Damage patterns at different axial positions are shown in Figure A.11 for a magnetic field of $B_{coil} = 1.6 \text{ T}$. Damage patterns remain on a film when it is covered by the beam attenuator (two meshes and one fine stainless-steel mesh). A diameter of its wire were 0.19 and 0.04 mm , a transparency of the mesh was 78% and 39% , respectively.

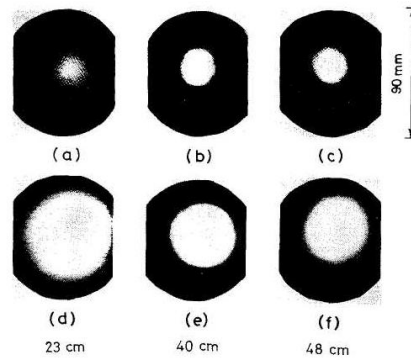


Figure A.11 – Damage patterns on film at different positions from diode (23.40.48 cm) when magnetic field 1.6 T was applied: (a-c) - meshes were applied to the film, (d) - (f) – no mesh was used

From the damage patterns remaining on the film covered by the beam attenuator (Figure A.11 (a-c)), it is apparent that the ion beam current at the beam center increases along with the penetration of the beam into the magnetic field. Although it is observed that the diameter of the white circle is almost the same at $Z = 30$ cm, 40 cm and 48 cm, the ion current density was peaked at the field maximum. This result indicates that the current increase at the center of the beam is not due to focusing of the ions in the solenoidal magnetic field but due to a compression of the beam by the magnetic pressure. The damage patterns taken without the beam attenuator (Figure A.11 (d-f)) show that the beam diameter decreases from 6.5 to 4.5 cm over a propagation distance of 17 cm.

When the magnetic field $B_{\text{coil}} = 1.6$ T is applied, the ion current density increases 3 times.

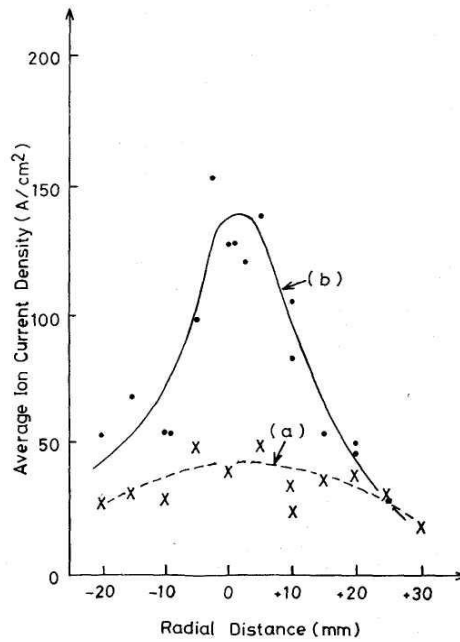


Figure A.12 – Radial distributions of the average ion current density (a) when a magnetic field was not applied and (b) when a magnetic field $B_{\text{coil}} = 1.6 \text{ T}$ was applied

An almost flat ion beam distribution was obtained at zero magnetic field average ion current density was 40 A/cm^2 . When an axial magnetic field of 1.6 T was applied, the average ion current density increased to 130 A/cm^2 at the peak of the distribution. The ion current density increased at the periphery of the distribution as well as at the beam center. Figure A.13 shows the dependence of the ion current density on the magnetic field.

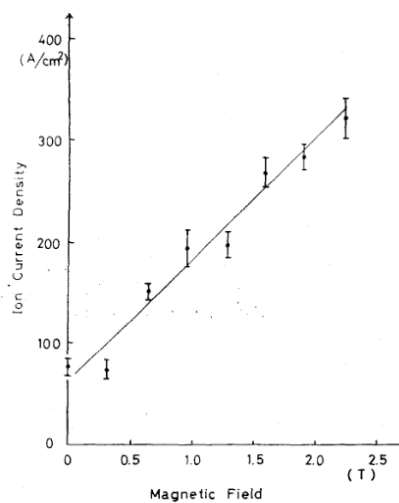


Figure A.13 – Dependence of the ion current density on the magnetic field at the center of the beam column at a distance of 40 cm from the diode

An ion current density at zero magnetic field (80 A/cm^2) was obtained because only the central section of the beam column was measured by this detector. This value can be compared to the 40 A/cm^2 obtained by the radially integrated measurement described in the previous subsection. The ion current density at the center of the beam column increased linearly (up to 320 A/cm^2) with an increasing magnetic field. The current density of the ion beam did not increase upon the application of a 0.4T magnetic field. This means that a weak magnetic field, compared with the perpendicular pressure of an ion beam, cannot compress a dense ion beam. This is consistent with beam compression by the magnetic field observed by the damage pattern.

In magnetically isolated diodes HIPIB transportation to the focus in a transverse magnetic field in the cathode space is associated with the problem of providing charge and current neutralization of the beam. In addition, final divergence and density of the MIP in focus are determined by other factors (temperature of the HIPIB, uncompensated magnetic flux, etc.), the study of which is relevant for reaching the limiting densities, especially in experiments on the beam and targets interaction.

References

- 1 Slutz S. A., David B. Magnetic insulation of extraction applied B-ion diodes // J. Appl. Phys. – 1986. – Vol. 59. - №8. – P. 2685-2688.
- 2 Humphries S., et al. Pulsed plasma guns for intense ion beam injectors // Rev. Sci. Instrum. – 1981. – Vol.52. - №2. – P. 162-171.
- 3 Deichuli P. P., Fedorov V. M. Intense ion beams generation in MID with Hr - field// The 8th international conference on high-power particle beams. –Russia, Novosibirsk. – 1990. – Vol. 1. – P.469-474.
- 4 P. P. Deichuli, V. M. Fedorov // The 6th Symp. on High Current Electronics.-1986. - Vol. - P.166.
- 5 Stepanov A. V., Remnev G. E. The magnetic field distribution in the acceleration gap of the magnetically insulated ion diode. 17th International Conference on High-Power Particle Beams. - Xi'an, China - 2008. - P. 423-426.
- 6 M.Kaikanov, K Baigarin, A Tikhonov, A Urazbayev, J W Kwan,E Henestroza, G Remnev, B Shubin, A Stepanov, V Shamanin, W L Waldron. An accelerator facility for WDM, HEDP, and HIF investigations in Nazarbayev University// Journal of Physics: Conference Series. – GBR. – 2016.
- 7 G Würz, G. Viazmenova, V. Kuznetsov, V. I. Engelko. Focusing of a compensated proton beam with a high compression ratio// Journal of Technical Physics, 1997, Vol 67, No. 5, P. 73-80.
- 8 V. I. Engelko, H. Giese, V. S. Kuznetsov, G. A. Viazmenova, and S. Schalk. Focusing of an Intense Neutralized Proton Beam// Journal of Technical Physics, 2002, Vol 72, No. 3. P. 350-356.
- 9 Nakagawa Y, Tamotsu E. Compression and propagation of an intense ion beam in a strong magnetic field// Plasma Phys., 1986, v. 11, P. 470.