

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 16.04.01 Техническая физика
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка масс-спектрометра с временной компрессией для определения массового и зарядового состояния плазмы

УДК 681.785:533.9.01

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Христенко Антон Анатольевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий лабораторией №1	Ремнёв Г.Е.	Д.Т.Н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения общих технических дисциплин	Винокурова Г.Ф.	к.т.н, доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель НОЦ Б.П. Вейнберга	Кривобоков В.П.	д.ф.-м.н., профессор		

**Результаты обучения магистров
направления 16.04.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критерии АИОР, и/или заинтересованных сторон
Р1	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОПК-1). СУОС ТПУ (УК 2, УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р3	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты	Требования ФГОС (ОПК-5, ОПК-7, ПК-5, ПК- 8). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р4	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ОПК-6, ПК-6, 7). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учётом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабаты-	Требования ФГОС (ПК-15, 16). СУОС ТПУ (УК 2, УК3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
	вать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	
P7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). СУОС ТПУ (УК 1, УК3, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Владеть приёмами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	Требования ФГОС (ОПК-3). СУОС ТПУ (УК 1, УК3). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 (п. 2.4) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоёмкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-5). СУОС ТПУ (УК 1, УК2). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять своё научное мировоззрение.	СУОС ТПУ (УК 6). Критерий 5 (п. 2.6) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения	Требования ФГОС (ОПК - 7). СУОС ТПУ (УК4, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.3). Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОПК,3 ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки – 16.04.01 Техническая физика
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Кривобоков В.П.
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации (магистерской диссертации)
--

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Христенко Антон Анатольевич

Тема работы:

Разработка масс-спектрометра с временной компрессией для определения массового и зарядового состояния плазмы
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Технические характеристики времяпролётного масс-спектрометра; приложение для составления таблиц и вычислений Microsoft Excel; приложение для математических и инженерных вычислений Mathcad; таблица Менделеева для определения молярной массы вещества.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор литературных источников по исследуемой тематике; выбор методик исследования; сравнение методики для определения масс-зарядовых состояний при постоянном импульсе напряжения и при нарастающем импульсе напряжения, закон идеального банчирования (временная компрессия ионных пучков); проведение теоретических расчётов; анализ полученных результатов; построение зависимости времени прихода ионов на коллектор (датчик) от времени старта с катода при постоянном импульсе напряжения и для растущего импульса напряжения; экономическая часть бакалаврской работы (Расчет себестоимости НИОКР); социальная ответственность.</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Титульный лист; 2. Обобщенная блок-схема масс-спектрометра; 3. Влияния разрешающей способности на форму спектров; 4. Определение разрешающей способности прибора; 5. Схема действия времяпролётного масс-анализатора; 6. Принцип действия пространственно-временной фокусировки; 7. Схема времяпролетного масс-спектрометра с рефлектроном; 8. Времяпролётный масс-спектрометр с временной компрессией; 9. Схематичное описание процесса «разрыва» плазмы; 10. Схема действия времяпролётного масс-анализатора с постоянным ускоряющим напряжением; 11. Результаты движения свойств ионов под действием постоянного ускоряющего напряжения; 12. Результаты движения свойств ионов с использованием закона идеального банчирования.
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ре-</p>	<p>Доцент ОСГН, к.ф.н., Меньшикова Е.В.</p>

сурсосбережение	
Социальная ответственность	Доцент ООД, к.т.н., Винокурова Г.Ф.
Иностранный язык	Старший преподаватель ОИЯ, Демидова О.М.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
Глава 1. Основные характеристики масс - спектрометров	
Глава 2. Времяпролётный масс-спектрометр для анализа z/m ионов плазмы	

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

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий лабораторией №1	Ремнёв Г.Е.	Д.Т.Н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Христенко Антон Анатольевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСО-
СБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Христенко Антону Анатольевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	– Зарботная плата (руководителя 49664 руб. в месяц, магистра 12663 руб. в месяц) – Бюджет затрат НИИ 211684 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Тариф на электроэнергию – 5.8 руб. за 1 кВт·ч
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	– Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 27.1 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	– Сравнение с другими схожими материалами
2. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет</i>	– Иерархическая структура работ; – SWOT-анализ; – определение трудоемкости работ.
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Бюджет научно-технического исследования: – расчет материальных затрат; – расчет основной платы исполнителей темы; – накладные расходы; – формирование бюджета затрат.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Календарный график проведения исследования в виде диаграммы Ганта
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Христенко А.А.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Христенко Антону Анатольевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Тема ВКР:

Разработка времяпролётного масс-спектрометра с временной компрессией для определения масс-зарядового состояния плазмы	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Достигнуть наилучшего энергетического разрешения спектрометра
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <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. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; – ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения; – ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> – вредные вещества; – шумы; – вибрации; – электромагнитные поля; – высокое напряжение; – использование средств индивидуальной и коллективной защиты; – соблюдение химической, электро- и пожаровзрывобезопасности.
3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> – попадания газа в окружающую атмосферу.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – поражение электрическим током; – пожар; – взрыв. – наиболее типичной чрезвычайной ситуацией является поражение электрическим током.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения общих технических дисциплин	Винокурова Г.Ф.	к.т.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Христенко Антона Анатольевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 100 с., 36 рис., 21 табл., 37 источников, 1 прил.

Ключевые слова: плазма, времяпролётный масс - спектрометрия, масс – зарядовое состояние z/m , скорость ионов, времяпролётная методика, коэффициент банчирования, компрессия ионов.

Объектом исследования является: свойства движения ионов под действием различных профилированных ускоряющих напряжений.

Цель работы – разработка времяпролётного масс-спектрометра на основе временной компрессии для определения масс-зарядового состояния z/m ионов плазмы

В процессе исследования было установлено условие «разрыва» плазмы в ускоряющем зазоре анализирующего диода спектрометра для создания ускоряющего промежутка, так же были проведены теоретические расчёты для свойств движения ионов в трубе дрейфа с использованием постоянного ускоряющего напряжения и при законе идеальной компрессии. Были построены графики для каждого случая зависимости времени прихода иона на датчик T от времени старта с катода t . Так же были построены графики изображающие зависимости времени прихода ионов на датчик T от ионного тока несущими ионами, другими словами, построение импульсов ионов. Были рассчитаны коэффициенты банчирования для всех случаев, так же были построены зависимости коэффициента банчирования K_b от промежуточной длины для того, чтобы посмотреть, как происходит промежуточное сжатие по времени и увеличение амплитуды по току.

Область применения: масс-спектрометрия охватывает широкую область применения, например, медицина, физика, химия, космическая промышленность, геология и т.д.

Экономическая эффективность/значимость работы на данный момент не установлена, так как предмет исследования находится в стадии теоретической проработки.

В будущем планируется проделать экспериментальные исследования на этом приборе, чтобы проверить корреляцию между теоретическими расчётами и экспериментальными данными. Так же в дальнейшем планируется разработать ещё одну методику для времяпролётного масс-анализатора, которая носит название: закон линейного ускоряющего напряжения для ионов.

Оглавление

Введение	14
1. Основные характеристики масс - спектрометров	18
2. Времяпролётный масс-спектрометр для анализа z/m ионов плазмы	20
2.1. Немного истории.....	23
2.1.1. Пространственно-временная фокусировка.....	23
2.1.2. Ионные зеркала (рефлектрон).....	24
3. Экспериментальное оборудование и обоснование предложенного нами метода. Времяпролётный масс-спектрометр на основе временной компрессии для анализа z/m ионов плазмы.....	26
3.1. Условие «разрыва» плазмы в ускоряющем зазоре анализирующего диода спектрометра.....	27
3.2. Определение масс-зарядовых состояний ионов азота ($\frac{1}{14}... \frac{7}{14}$) и углерода ($\frac{1}{12}... \frac{6}{12}$) при постоянной энергии ионов.	30
3.3. Определение масс-зарядовых состояний ионов азота ($\frac{1}{14}... \frac{7}{14}$) и углерода ($\frac{1}{12}... \frac{6}{12}$) при растущей энергии ионов, закон идеального банчирования (временная компрессия ионных пучков)	39
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	49
4.1. Потенциальные потребители результатов исследования	49
4.2. Анализ конкурентных технических решений	50
4.3. SWOT-анализ	52
4.4. Цели и результат проекта	55
4.5. Организационная структура проекта.	56
4.6. Планирование управления научно-техническим проектом.....	57

4.7. План проекта	58
4.8. Бюджет научного исследования.....	60
4.8.1. Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	60
4.8.2. Расчет материальных затрат НТИ.....	60
4.8.3. Основная заработная плата исполнителей темы.....	62
4.8.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы	65
4.8.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) ...	65
4.8.7. Формирование бюджета затрат НИП	67
5. Социальная ответственность	71
5.3. Экологическая безопасность	78
5.4. Электробезопасность	80
5.5. Пожарная и взрывная безопасность.....	82
Заключение	85
Список использованных источников	86
Список публикаций.....	89
Участие в грантах.....	89
Приложение А	90

Введение

Масс-спектрометрия – инструментальный метод регистраций различных молекул посредством перевода вещества в ионизированное состояние, разделения образующихся ионов по величинам отношения массы к заряду (m/z) и регистрации ионов каждого вида. Масс-спектрометрия является мощным инструментом исследования органических и элементарорганических соединений. Как и в любом другом методе анализа, аппаратура играет ключевую роль [1].

Масс - анализаторы разделяются на статические и динамические [2]. Динамические масс-спектрометры, как правило, уступают статическим по разрешающей способности [3]. Их преимущества, однако, связаны с малыми габаритами и массой, экономичностью, быстродействием. В статических масс – анализаторах ионы делятся, за время их движения, по массам, в постоянных или практически не изменяющимся магнитных и электрических полях. Например, магнитный/электростатический секторный масс – анализатор (ионы разделяются в магнитном поле за счёт их массы) [5].

В динамических анализаторах разделение ионов происходит под воздействием импульсных или радиочастотных электрических полей. Существуют следующие динамические масс – анализаторы [2]:

- Времяпролётные масс – анализаторы (ионы разделяются в бесполом пространстве трубы дрейфа, так же за счёт своей массы);
- квадрупольные (фильтры, ионные ловушки) масс – анализаторы (ионы разделяются по частоте колебаний).

Основные узлы масс-спектрометра представлены на блок - схеме рисунка 1 [7].

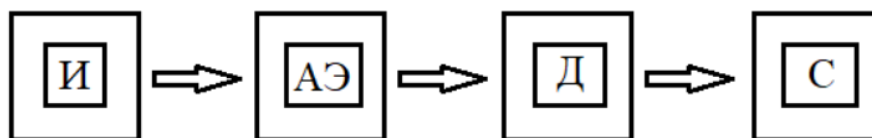


Рис. В.1. Обобщенная блок-схема масс-спектрометра. И - источник ионов. АЭ – анализирующие ионы, Д - детектор, С - система сбора и обработки данных.

Источник ионов – это область масс-спектрометра, где происходит ионизация молекул исследуемого вещества, либо уже ионизированные молекулы, например ионы плазмы, поступают в данную область масс-спектрометра. Существуют мягкие и жёсткие методы ионизации:

Мягкие:

- химическая ионизация (ХИ, CI);
- химическая ионизация при атмосферном давлении (ХИАД, АРСИ);
- матрично-активированная лазерная десорбция/ионизация (МАЛДИ, MALDI);
- ионизация электрораспылением (ИЭР, ESI);
- бомбардировка ускоренными ионами атомами (ББА, FAB);
- масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС, SIMS);
- десорбционная ионизация под действием электрораспыления (DESI) Прямой анализ в реальном времени (DART).

Жёсткие:

- Ионизация электронами (ИЭ, EI);
- ионизация индуктивно-связанной плазмой (ICP) [16].

В анализирующем элементе ионы при помощи различных видов электрических и магнитных полей разделяются по массам.

Детектор служит для фиксации ионов, прошедших анализирующий элемент. Существует многообразие детекторов и у каждого из них, есть свой принцип работы. Ниже приведены некоторые из них:

- фотопластины;
- цилиндр Фарадея;
- электронные умножители;
- фотоумножитель с преобразующим динодом;
- матричный детектор.

Люди, которые работают в сфере масс – спектрометрии знают, как работают вышеприведённые детекторы, поэтому их принцип работы не будет расписан, поэтому двигаемся дальше.

Система сбора и обработки данных обеспечивает управление экспериментом, регистрирует сигналы детекторов и выполняет первичную обработку данных [6].

Всем масс-спектрометрам нужен вакуум [22], чтобы ионы могли достичь детектора без столкновений с другими газообразными молекулами или атомами. Если такие столкновения случаются, прибор подвержен уменьшению разрешения и чувствительности. Высокие давления также могут вызывать разряд напряжений в землю, что может повредить прибор, его электронику или компьютерную систему, обслуживающую масс-спектрометр. Мощная утечка, и основанный на ней прорыв атмосферы внутрь прибора, может серьёзно повредить масс-спектрометр, уничтожив его составляющие [8]!

В современном мире без масс-спектрометрии невозможно обойтись. Масс-спектрометрия охватывает широкую область применения, например, медицина, физика, химия, космическая промышленность, геология и т.д. Тема выпускной работы, направлена на улучшения разрешающей способности времяпролётного масс-спектрометра, поскольку времяпролётные приборы имеют данный недостаток. Следовательно, в виду возросших требований по чувствительности, энергетическому разрешению, экспресс анализу и компактности прибора, методы, которые применяются для анализа, недостаточны. Поэтому разработка приборов или методов анализа z/m состояния ионов плазмы является актуальной задачей.

Для реализации предлагаемого нами метода, были поставлены задачи, которые нужно выполнить в данной работе для реализации ожидаемого результата:

1. определить условие «разрыва» плазмы в ускоряющем зазоре анализирующего диода спектрометра;

2. сравнить методики определения масс-зарядовых состояний для близких по массе ионов N^+ и C^+ при постоянном импульсе напряжения, нарастающем импульсе напряжения и при законе идеального банчирования (временная компрессия ионных пучков);

3. построить зависимости времени прихода ионов N^+ и C^+ на коллектор (датчик) от времени старта с катода при постоянном и при законе идеального банчирования (временная компрессия ионных пучков)

4. построить зависимость ионного тока, проходящего на датчик от времени пролёта ионов N^+ и C^+ в трубе дрейфа.

Непосредственно данный прибор в дальнейшем будет применяться для анализа ионов плазмы в ионной имплантации, нанесении покрытий и плазменных источников. Следовательно, нужна точная и быстрая диагностика ионов плазмы. Времяпролётный масс-спектрометр, является отличным кандидатом. Данный прибор по сравнению с приборами других принципов действия не требует абсолютной калибровки, имеет малые габариты, высокие скорости развертки спектра и очень удобен для отбора ионов из плазмы.

1. Основные характеристики масс - спектрометров

Разрешение (разрешающая способность) - способность масс - спектрометра различать ионы с разными массовыми числами [4].

Разрешение R характеризует возможность раздельной регистрации близких по массам ионов. Идеальный масс-спектр должен иметь разрешенные (раздельные) линии (узкие пики прямоугольной формы). Реально же в результате различного рода искажений ионного пучка, а также инерционности регистрирующей аппаратуры, в масс-спектре наблюдаются заостренные пики, которые отличаются друг от друга шириной по основанию и глубиной провала между пиками. Чем больше глубина провала, тем больше разрешающая способность прибора. Для ионов с массами m и $(m + \Delta m)$ разрешающая способность $R = m:\Delta m$. Экспериментально разрешающую способность определяют по масс-спектру. Величина Δm измеряется на уровне 10 или 50 % высоты пика [9].

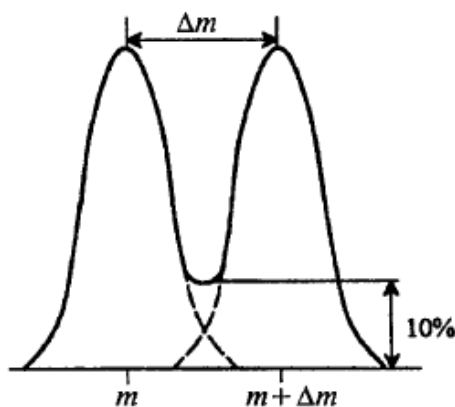


Рис. 1.1. Определение разрешающей способности прибора

Разрешение масс-спектрометра зависит от величины магнитного (электрического) поля, ускоряющей разности потенциалов (энергии ионов), давления в камере анализатора [23].

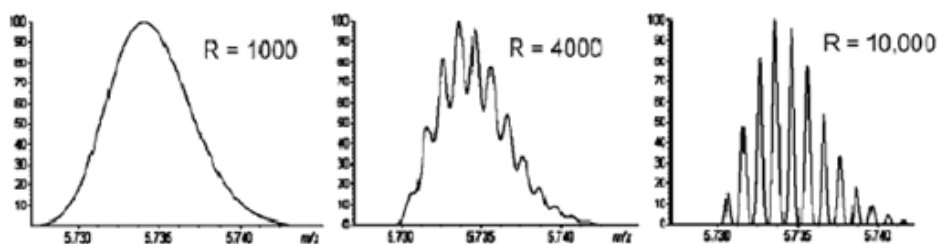


Рис. 1.2. Влияния разрешающей способности на форму спектров.

Из рисунка видно, чем больше разрешающая способность R , тем более точно происходит регистрация анализируемого вещества.

Чувствительность характеризуется минимальным количеством анализируемого вещества, при котором показания масс-спектрометра превышают уровень шумов не менее, чем в два раза.

Точность - способность анализатора давать точную информацию о z/m . Точность в большой степени зависит от устойчивости прибора и от разрешения.

Скорость сканирования показывает время, с которой анализатор сканирует конкретный диапазон масс. Большинству приборов необходимо несколько секунд для полного сканирования, однако это время может сильно различаться в зависимости от анализатора. Времяпролетные анализаторы, например, совершают анализ за время миллисекунды и менее.

2. Времяпролётный масс-спектрометр для анализа z/m ионов плазмы

Работа этого типа анализатора построена на простейшем принципе: спектрометр имеет ионный источник, в который помещают исследуемый материал, где в дальнейшем происходит ионизация последнего, мягкими или жёсткими методами. Далее ионы выталкиваются в анализирующий диод (область ускорения). После этого на диод подаётся импульс анализирующего напряжения, который имеет форму прямоугольника, то бишь имеет постоянную энергию во времени и сообщает всем ионам, которые имеют различные отношения массы к заряду (z/m) одинаковую энергию [22]. После прикладывания напряжения ионы под разностью потенциала вылетают в бесполовое (отсутствуют электрические и магнитные поля) пространства дрейфа, где ионы разделяются на группы в соответствии с их величиной z/m . Первыми достигают коллектора (детектора) самые легкие ионы, за ними - более тяжелые. Ионы, попадая на коллектор, создают в его цепи импульсный ток, амплитуда которого пропорциональна числу ионов в пакетах каждой группы и представляются в виде спектра на осциллографе. Чем уже пик ионов сходной массы, тем выше точность измерения массы.

Физический принцип работы времяпролётного масс-анализатора заключается в том, что разность потенциалов U ускоряет ионы в источнике ионов до скорости v согласно уравнению [10]:

$$q \cdot U = \frac{m \cdot V^2}{2},$$

где m_i – масса иона; q – заряд иона; V – скорость; U – разность потенциалов.

Откуда $V_i \cong \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m_i}}$. Скорость иона определяется отношением m/q .

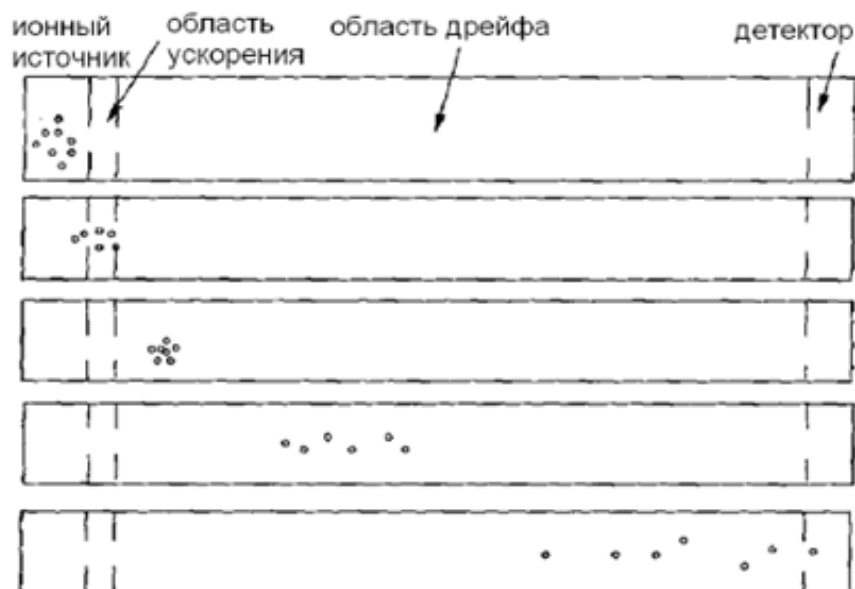


Рис. 1.3. Схема действия времяпролётного масс-анализатора

В случае времяпролетных масс-спектрометров разрешающая способность – это разделение двух близких по массе конгломератов, полученных в результате детектирования на две ширины импульса, либо, другими словами, определяется, как отношение общего времени пролёта по отношению к двум ширинам пиков во временных единицах [18].

$$R = \frac{m}{\Delta m} = \frac{T}{2t}, \quad (1.1)$$

где m – масса иона; Δm – разность масс между двумя разрешенными массами (пиками на спектре); T – общее время пролёта; t – длительность.

Времяпролётный масс-спектрометр по сравнению с приборами других принципов действия имеет:

Преимущества:

- Не требует абсолютной калибровки [14];
- теоретически неограниченный предел регистрируемых масс;
- имеет малые габариты;
- высокие скорости развертки спектра;
- очень удобен для отбора ионов из плазмы;

Недостатки:

- Наиболее подходит для импульсных методов ионизации, работа с непрерывными методами ионизации требует использования более сложных схем;
- внутри анализатора необходимо поддерживать очень высокий вакуум;
- низкая разрешающая способность.

Проблема низкого разрешения возникает из-за того, что ионы с одной и той же массой могут иметь разную скорость или разное положение в пространстве трубы дрейфа, ионы, выходящие из источника, находятся не на одной линии, а занимают конкретный объем. Это приводит к тому, что одни ионы запаздывают, другие – наоборот, убегают, в результате детектируемый сигнал размывается и теряется разрешение [15].

Разрешающую способность можно повысить несколькими способами:

1. *Сокращение длительности импульса на датчике.* Для этого используются устройства с *пространственно-временной фокусировкой* [17], которые уменьшают разброс по тепловым скоростям у ионов с одинаковыми z/m (работа ионного зеркала будет описана в подглаве 1.1.);

2. *увеличение времени пролёта ионов за счёт увеличения пути пролёта*, но этот способ уже не актуален, поскольку современные времяпролётные масс-спектрометры имеют длину прибора в 1 м. Приборы, которые имеют длину 1 м используют *ионные зеркала (электростатическое зеркало)*, которые значительно упрощают прибор по габаритам (работы ионного зеркала будет описана в подглаве 1.1.) [7];

Обратимся к некоторым историческим справкам развития времяпролётных масс-анализаторов.

2.1. Немного истории

2.1.1. Пространственно-временная фокусировка

Пространственно-временная фокусировка, или задержанная экстракция, была предложена Вили и Маклареном в 1955 году. Область ускорения в источнике была модифицирована из одностадийной в двухстадийную [20].



Рис. 2.1. Принцип действия пространственно-временной фокусировки.

Принцип действия пространственно-временной фокусировки. При десорбции ионов лазерным импульсом потенциал мишени равен потенциалу первой сетки. Следовательно, ионы (1) не испытывают влияния поля, а движутся с начальными скоростями v_0 . Спустя короткое время τ (\sim несколько сотен наносекунд) потенциал мишени возрастает и ионы внезапно подвергаются воздействию силы электрического поля (2). Медленные ионы (с небольшой v_0) оказываются ближе к мишени, а значит, в точке с большим потенциалом, чем ионы с большей скоростью v_0 , находящиеся дальше от мишени. Следовательно, медленные ионы приобретут большую кинетическую энергию и скорость при попадании в бесполовое пространство (3). По мере движения в бесполовом пространстве ионы с одинаковым m/z сближаются друг с другом (4) и при правильно подобранных напряжениях и времени задержки τ достигают детектора практически одновременно (5). С точно подобранным временем задержки включения поля и напряжения в источнике разброс ионов с одним и тем же z/m по времени пролета будет минимальным. То

есть будет получено лучшее разрешение. Пространственно-временная фокусировка может обеспечить:

- Компенсацию разброса начальных скоростей;
- минимизировать влияние пространственного разброса ионов;
- не снижает, а увеличивает разрешение и чувствительность прибора.

2.1.2. Ионные зеркала (рефлектрон)

Рефлектрон был изобретён Б.А. Мамыриным и его коллегами в 1973 году. В рефлектроне образованные ионы не летят напрямую к детектору, а отражаются более высоким напряжением по сравнению с ускоряющим.

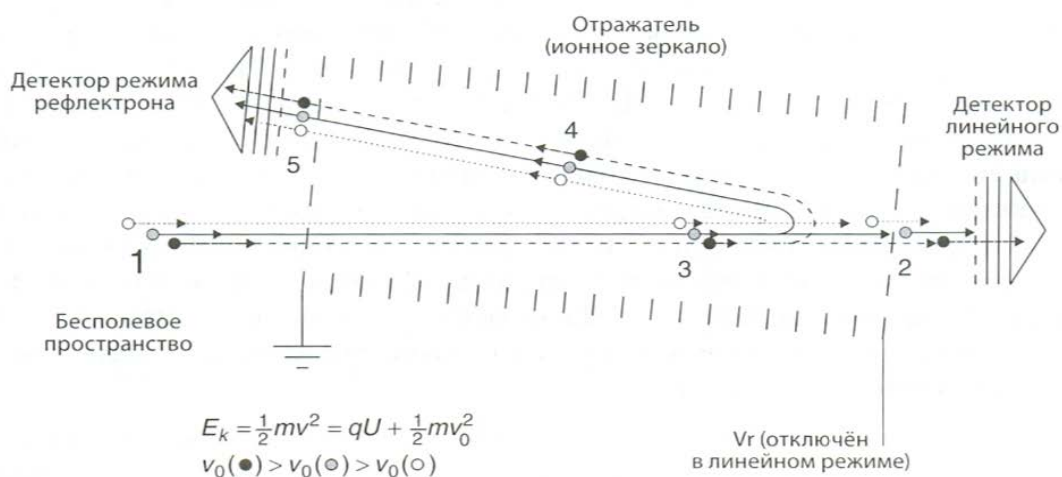


Рис. 2.2. Схема времяпролетного масс-спектрометра с рефлектроном

Принцип действия одностадийного ионного зеркала. Десорбированные ионы имеют различные аксиальные скорости v_0 . Следовательно, в некоторый момент времени ионы с одинаковым z/m занимают различное положение в пространстве (1). Без ионного зеркала эта разница будет возрастать, ведя к уширению пика в момент достижения ионами детектора линейного режима (2). Электрическое поле детектора замедляет ионы (3) и заставляет их повернуть назад (в неаксиальной конструкции зеркало слегка наклонено, поэтому

угол поворота составляет не 180° , а скорее 178°). Более быстрые ионы (с большей скоростью v_0) проникают в зеркало глубже, чем медленные ионы (с малой скоростью v_0). После разворота ионы снова набирают скорость, и при правильной настройке зеркала ионы с одинаковым z/m прибывают на детектор режима рефлектрона (режима ионного зеркала) с разбросом по времени, значительно меньшим, чем в случае их регистрации в линейном режиме [22].

И по сей день идёт гонка за улучшениями главных характеристик времяпролётных спектрометров это энергетическое разрешение и чувствительность, так как данный тип спектрометров является очень удобным для анализа из-за его вышеперечисленных достоинств.

3. Экспериментальное оборудование и обоснование предложенного нами метода. Времяпролётный масс-спектрометр на основе временной компрессии для анализа z/m ионов плазмы

Предлагаемый в данной работе импульсный времяпролётный масс-спектрометр, который адаптирован под нашу предлагаемую методику анализа



Рис. 3.1. Времяпролётный масс-спектрометр

масс-зарядовых (z/m) состояний ионов плазмы, будет использовать ускоряющие профилированные напряжения, которые будут подаваться на анализирующий диод спектрометра. Предлагаемая методика позволит многократно увеличить разрешающую способность масс-спектрометра, так же с использованием этого метода можно увеличить амплитуду тока в пучке и, следова-

тельно, мощность пучка. Такой ионный пучок, как инструмент с использованием данного подхода можно использовать для формирования ионных пучков сверхкороткой длительности, как физический инструмент для различных исследований, так и для создания сверхмощных импульсов нейтронного излучения, для генерации нейтральных пучков.

Их исследование даёт возможность, как для проведения различных физических исследований, так и для создания новых физических инструментов.

3.1. Условие «разрыва» плазмы в ускоряющем зазоре анализирующего диода спектрометра

Спектрометр имеет диодную ячейку для анализа плазмы, анод и катод которого представляют собой диафрагмы с соосными отверстиями. Спектрометр работает следующим образом. При поступлении плазмы в диод

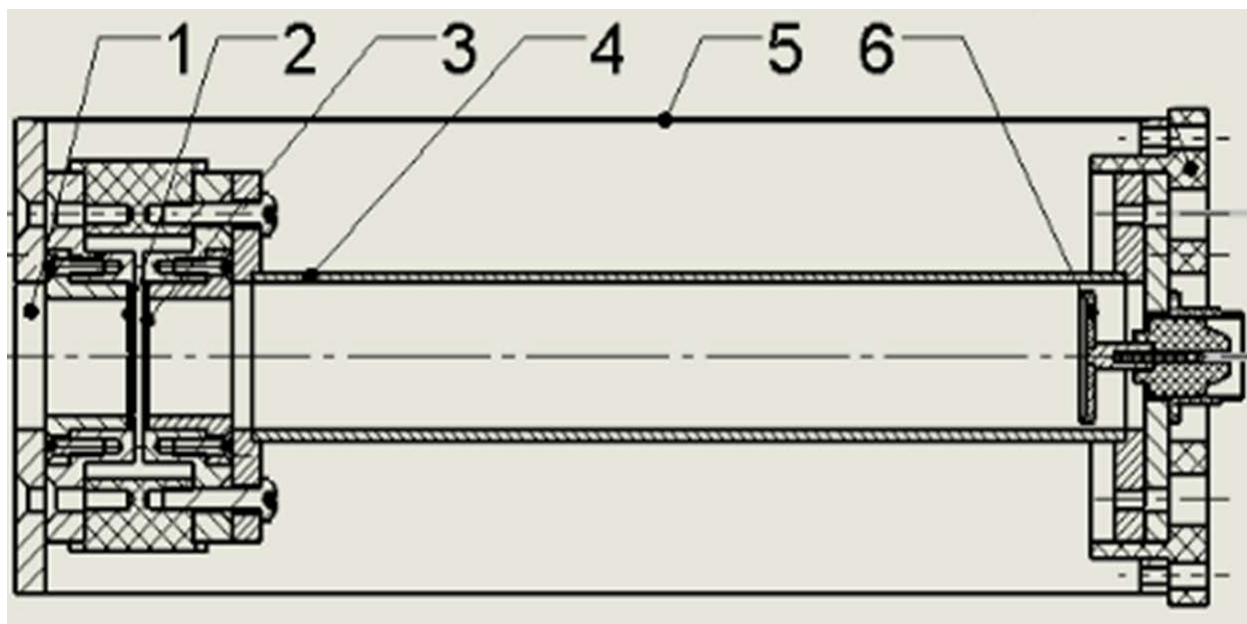


Рис. 3.2. Времяпролетный спектрометр для исследования масс - зарядового состояния плазмы.

1 – входной патрубок с диафрагмой; 2, 3 – анод и катод диода, соответственно; 4 – времяпролетная труба; 5 – экран; 6 – коллектор.

через отверстие заземленного анода на катод диода подается отрицательный импульс анализирующего напряжения от генератора. Вблизи катода образуется слой пространственного заряда. Рассмотрим подробный механизм «разрыва» плазмы. Перво-наперво плазма поступает через отверстия заземленного анода в промежуток между анодом и катодом. На данном этапе напряжение ещё не подано на электроды. После заполнения плазмы всего диодного промежутка, подаётся импульс анализирующего напряжения ($\tau=110$ нс). Наблюдается следующая картина. В момент приложения напряжения, первоначально начинает протекать ток, так как электроны лёгкие частицы и минимальное время реакции у них для плазмы равно электронно-плазменной частоте, то в первый момент времени электроны быстрее, чем ионы и они уходят на стенки.

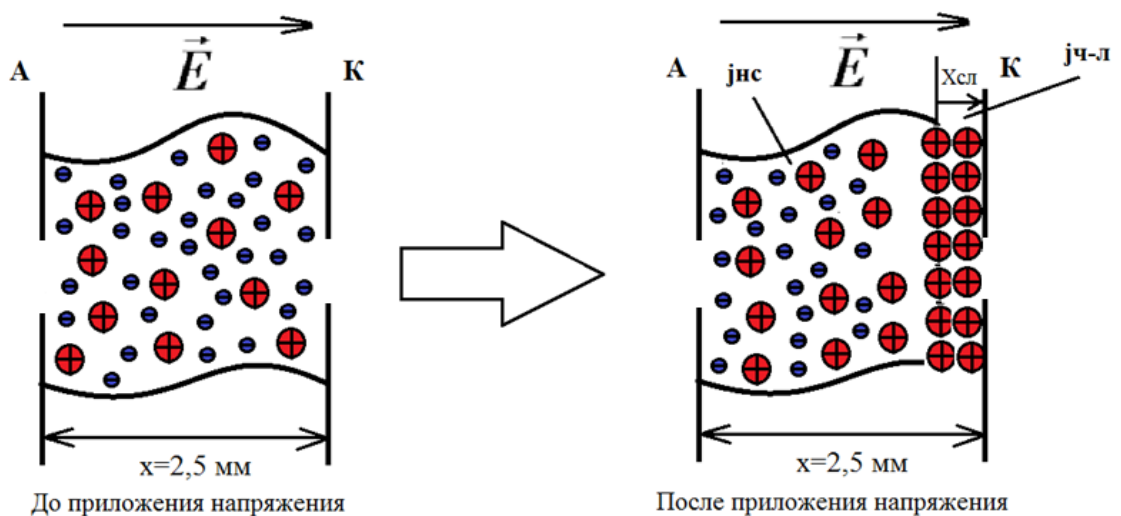


Рис. 3.3. Схематическое описание процесса «разрыва» плазмы.

1 – плазма (в данной работе использовалась протонная плазма); 2 – положительный ион; 3 – электрон; 4 – слой пространственного заряда.

В этом случае в плазме остается нескомпенсированный положительный заряд, который приводит к образованию в плазме электрического поля. Электрическое поле не может быть локализовано внутри плазмы, поскольку существует экранирование внешнего поля слоем пространственного заряда (дебаевское экранирование). Это приводит к тому, что образованное в плазме

поле сосредоточено в пристеночной области, где существует нескомпенсированный пространственный заряд. Происходит расширение слоя пространственного заряда. Это происходит потому что, плотность тока по закону Чайлда — Ленгмюра (закон степени трёх вторых) в этом слое больше чем ионный ток насыщения плазмы. Расширение слоя пространственного заряда прекратится тогда, когда этот слой дойдёт до анода. В этом случае, энергия ионов, выходящих из диода, соответствует амплитуде импульса анализирующего напряжения. Сформированный ионный пучок через отверстие в катоде поступает во времяпролетную трубу, где через время пролёта регистрируются коллектором.

Для определения связи между разрывающим напряжением, параметрами плазмы и геометрией электродов можно воспользоваться выводами теории электрических зондов в плазме. Величина плотности ионного тока насыщения определяется по формуле Бома:

$$j_{\text{НС}} = 0,4 \cdot q \cdot n_i \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_e \cdot k}{m_p}}, \quad (3.1)$$

где T_e – электронная температура [эВ]; k – постоянная Больцмана [эВ·с]; m_p – масса протона [Кг]; q – электрический заряд [Кл]; n_i – плотность плазмы [см⁻³].

Толщина слоя объемного заряда ионов, окружающего такой отрицательный электрод и экранирующего его от плазмы, связана с плотностью ионного тока известным законом «трех вторых»:

$$j_{\text{ч-л}} = \frac{2,33 \cdot 10^{-6} \cdot U^{\frac{3}{2}}}{x^2 \cdot \sqrt{\frac{m_p}{m_e}}} \cdot \sqrt{\frac{Z}{M}}, \quad (3.2)$$

где U – импульс анализирующего напряжения [В]; x – зазор диода [см]; m_e – масса электрона [Кг]; Z – заряд; M – молярная масса.

Подставленные в формулы определённые константы дают нам величину плотностей токов для пространственного заряда и насыщения плазмы.

Для $j_{ч-л} = 0,02751 \left[\frac{A}{cm^2} \right]$, для $j_{нс} = 1,79792 \cdot 10^{-3} \left[\frac{A}{cm^2} \right]$. Параметры генератора достаточны для «разрыва» плазмы на фронте импульса напряжения в ускоряющем зазоре и формирования импульса ионного тока при выполнении условия:

$$j_{ч-л} > j_{нс}$$

Условие выполняется, следовательно, произойдёт «разрыв» плазмы. Этим условием должен обладать генератор, который задаёт импульс напряжения. Если я задам не тот ток у меня не произойдёт «разрыв». В данной работе используется кабельный генератор, у которого волновое сопротивление 75 Ом. Нам нужно, чтобы этого было достаточно. У нас напряжение постоянное 1 кВ. Ток, который может дать мне генератор: $I = \frac{U}{R} = \frac{1000}{75} = 13,3 \text{ А}$. Данной величиной тока можно располагать. Ток, который будете иметь диод, должен быть много меньше чем ток генератора. Импеданс диода должен быть много больше чем 75 Ом. Чтобы посчитать импеданс диода $Z_d = \frac{U}{I_{ч-л}}$, нужно посчитать полный ток. Полный ток считается следующим образом

$$I_{ч-л} = j_{ч-л} \cdot S_0, \quad (3.3)$$

где S_0 – диаметр отверстия в аноде и катоде; $j_{ч-л}$ – плотность тока по Чайлд–Ленгмюру.

3.2. Определение масс-зарядовых состояний ионов азота ($\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$) и углерода ($\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$) при постоянной энергии ионов.

При постоянной энергии ионов преобразование происходит таким образом, что ионы на коллектор (датчик) приходят последовательно, создавая ту же ширину и длительность импульса, что и на катоде



Рис. 3.4. Схема действия времяпролётного масс-анализатора с постоянным ускоряющим напряжением.

Использовался метод кусочно-линейной аппроксимации. Импульс по времени разбивался на интервалы от 0 до 110 нс с шагом 0,1 нс. Расчёты шли для каждого интервала, и результаты представлены в виде графиков. Рассмотрим как изменяется время старта t_i от времени прихода T_i для иона водорода (протона).

Скорость иона определяется из соотношения кинетической энергии и работы сил электрического поля при перемещении заряда:

$$q \cdot U = \frac{m \cdot V^2}{2} \quad (3.4)$$

$$V_i \cong \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m_i}} \cong \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U \cdot Z}{m_p \cdot M}} \quad (3.5)$$

Время прихода иона T_i с энергией $E_i = q \cdot U$ выходящего из ускоряющего зазора диода в момент времени t_i на коллектор на расстоянии L находится как:

$$T_i = t_i + \frac{l}{V_i} \quad (3.6)$$

Для упрощения наглядности проведём сначала расчёты для иона водорода, так как он имеет всего лишь один заряд (Z), а потом рассмотрим уже конкретный пример.

Построим график зависимости ускоряющего напряжения $U(t)$ протонов от времени старта t при постоянном ускоряющем напряжении

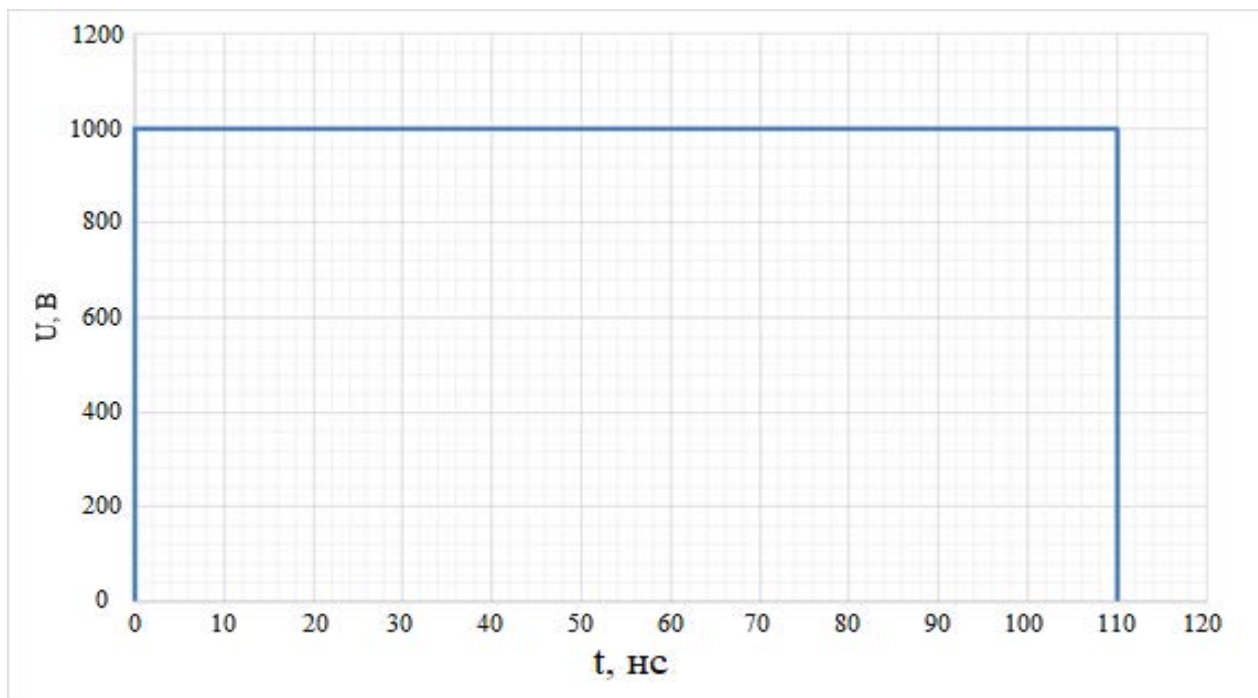


Рис. 3.5. Зависимость постоянного ускоряющего напряжения $U(t)$ подаваемого на диод для протонов от времени старта t ионов с катода

Построим график зависимости время старта t_i от времени прихода T_i для иона водорода (протона).

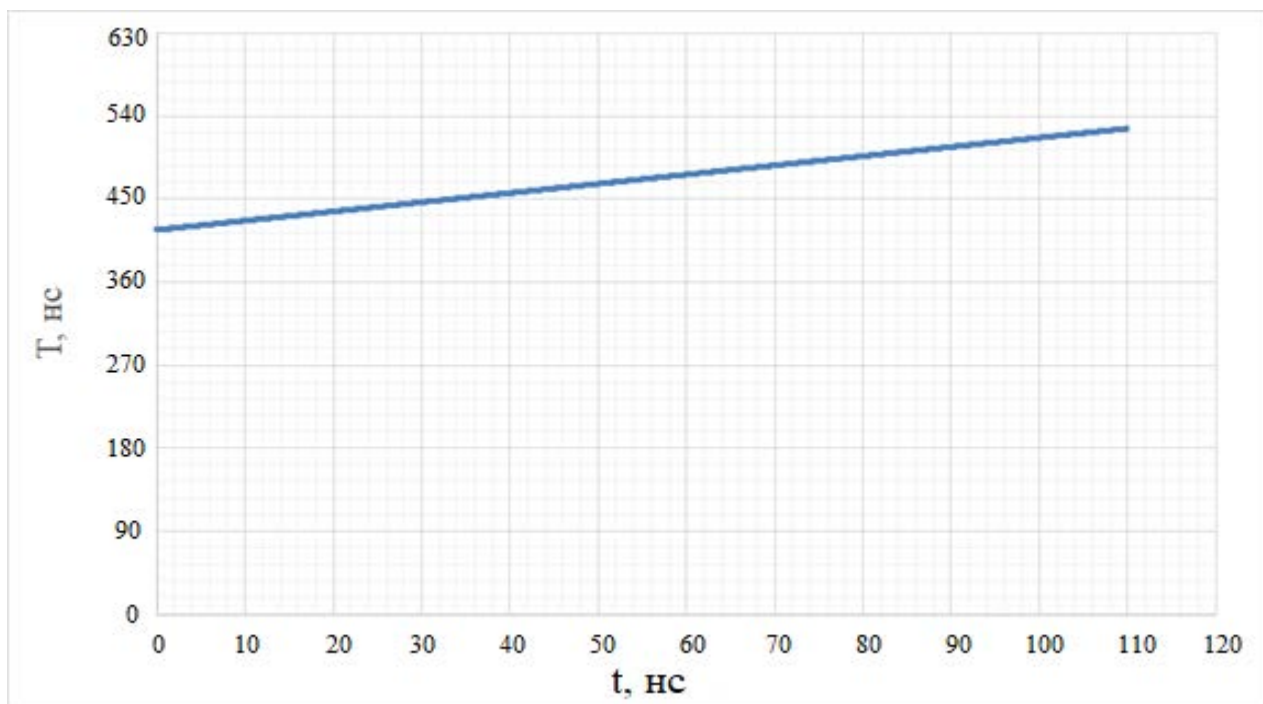


Рис. 3.6. Зависимость времени прихода ионов T на датчик от времени старта t с катода

Из рисунка рисунок 3.6 видно, что ионы на коллектор (датчик) приходят последовательно, создавая ту же ширину и длительность импульса, что и на катоде в противном случае линия на графике выглядела по-другому, другими словами на графике изображено время прихода первого иона водорода и последнего. Для более лучшего понимания проведём сноску на ось X для времени прихода первого иона и последнего.

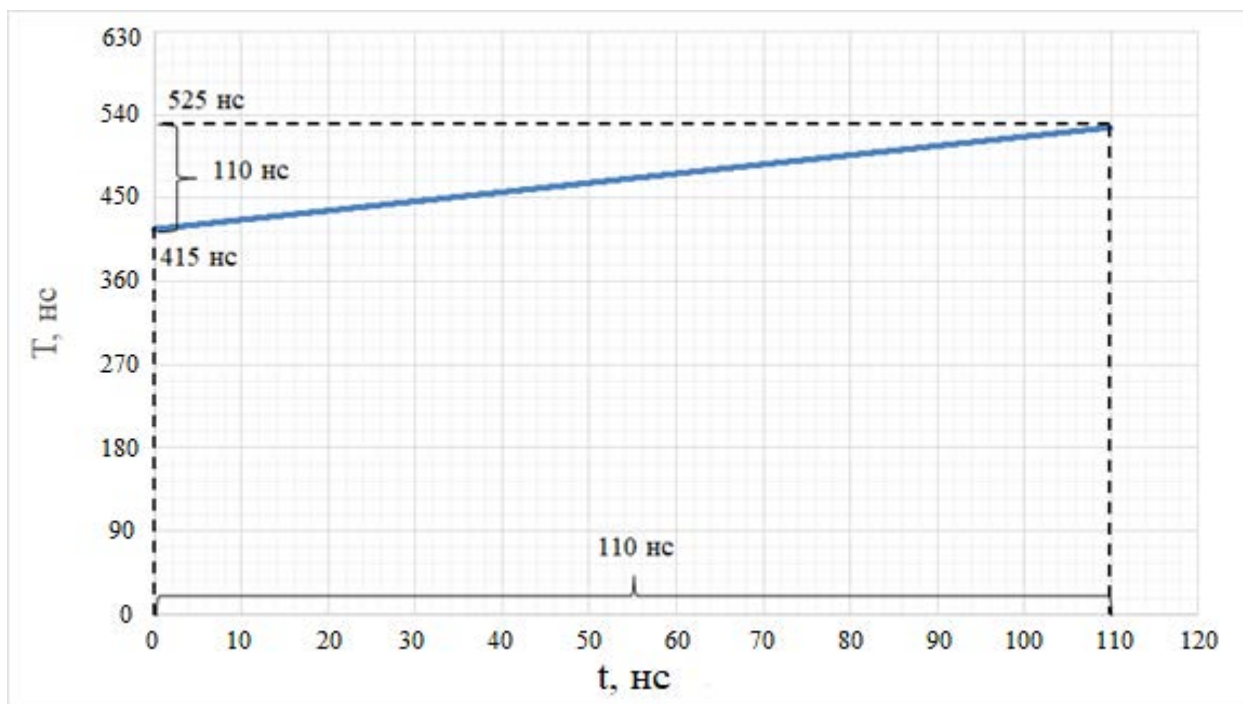


Рис. 3.7. Зависимость времени прихода ионов водорода T на датчик от времени старта t с катода

Из рисунка 3.7 видно, что, время прихода первого иона водорода (415 нс) и последнего иона водорода (525 нс) соответствует началу импульса (0 нс) и концу импульса (110 нс) из этого сделаем вывод, что импульс, создаваемый на детекторе (датчике) будет всегда соответствовать импульсу, подаваемому на анализирующий диод.

Для более точной демонстрации, мы можем в любом месте графика провести сноску и увидеть в точности такую же картину, как и в предыдущем случае.

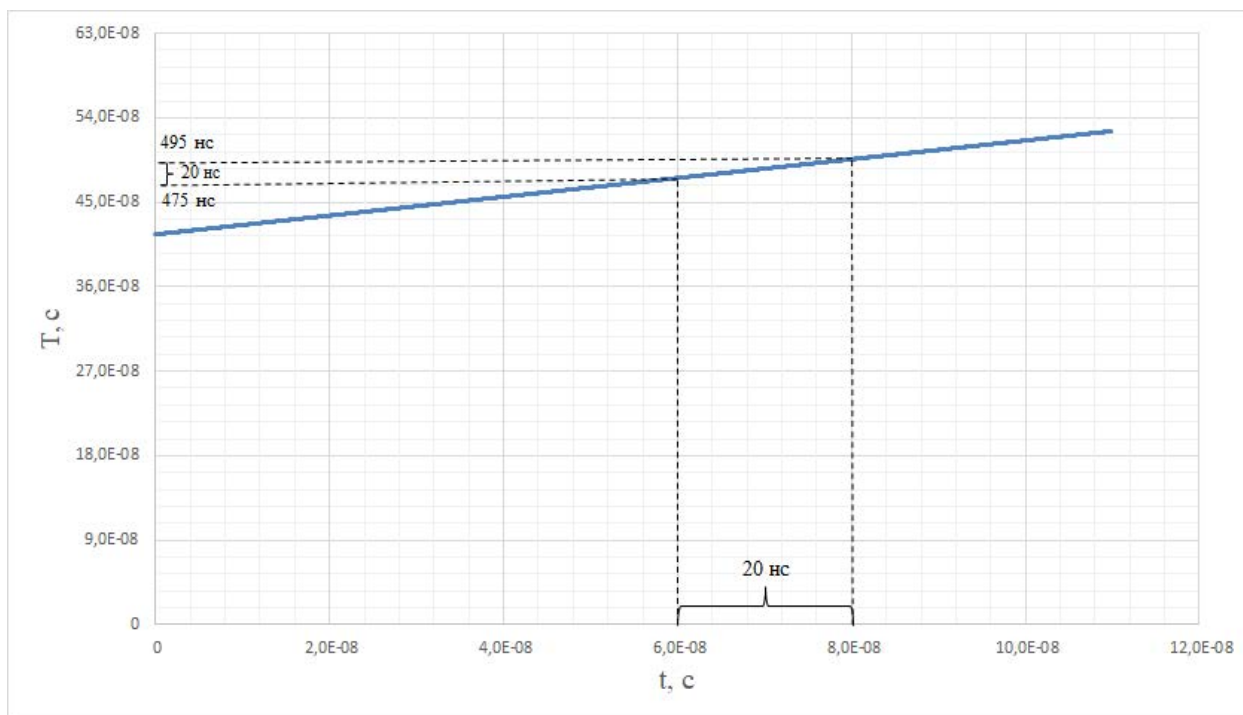


Рис. 3.8. Зависимость времени прихода ионов водорода Т на датчик от времени старта t с катода

Как и говорилось выше, в любой момент времени прихода иона водорода на коллекторе соответствует любой момент времени старта на катоде.

Вводится такое понятие как коэффициент банчирования. Коэффициент банчирования является следствием нерелятивистского характера ионных пучков и достигается при определённом (оптимальном) профилировании нарастающего ускоряющего напряжения во времени или энергии ионов. Процесс компрессии сопровождается увеличением мощности пучка при прохождении длины транспортировки L за счёт возрастания амплитуды тока пучка (плотности тока) и пропорционального уменьшения длительности импульса. Проще сказать, что коэффициент банчирования определяет увеличение плотности тока ионов и определяется он как:

$$K_6 = \frac{\Delta t}{\Delta T}, \quad (3.7)$$

где Δt – разность времён старта с катода второго и первого иона в i -том интервале; ΔT – разность времён прихода ионов на датчик соответствующих ионов.

В случае использования постоянного ускоряющего напряжения, данный коэффициент всегда будет равняется 1, потому что выходящие ионы из катода летят друг за другом и приходят по очереди на датчик. Мы рассмотрели простейший случай с ионом водорода, теперь перейдем к конкретным ионам.

Допустим у нас есть азотная плазма и мы предполагаем, что там есть все семь масс-зарядовых состояний, так как атом азота имеет $\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$ масс-зарядовых состояний. Другими словами, это означает, сколько раз атом может быть ионизирован.

Построим график зависимости ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для азота $\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$

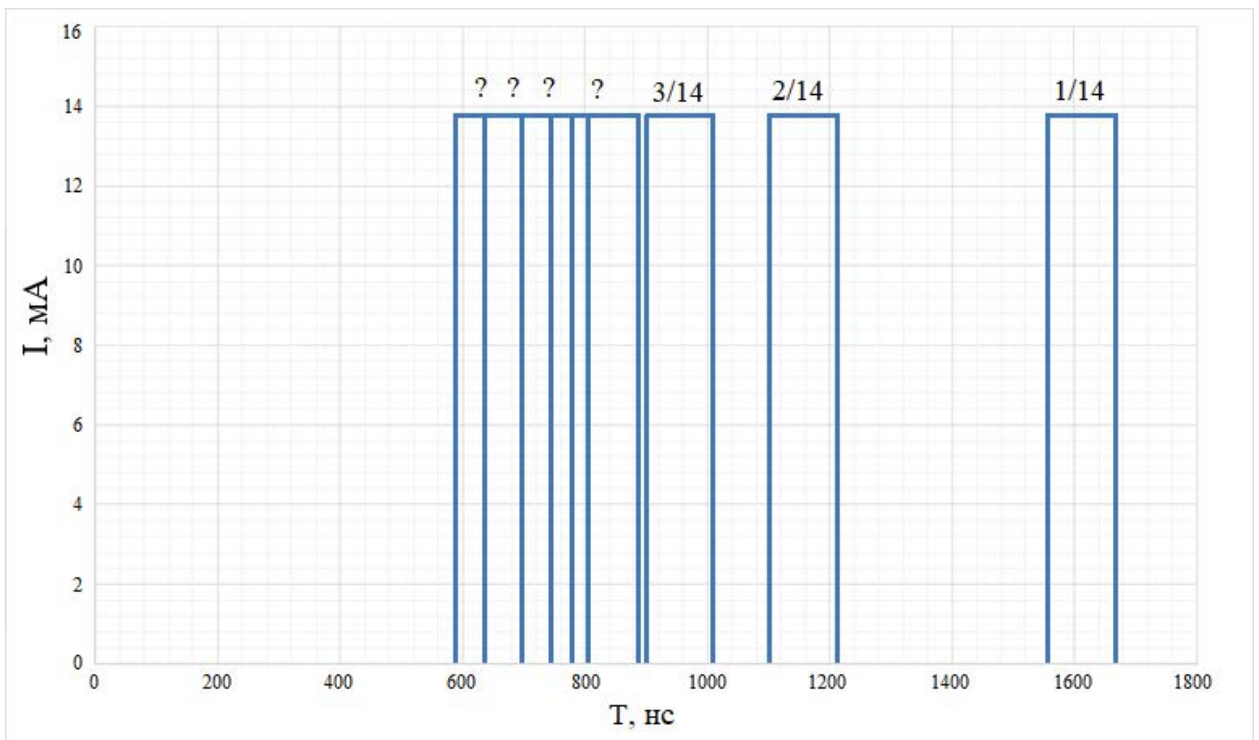


Рис. 3.9. Зависимость ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для азота

$$\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$$

Из рисунка рисунок 3.9 видно, что приходящие ионы со своими масс-зарядовыми состояниями создают на датчике ионный ток, который в дальнейшем преобразуется в спектр. Вообще реальный экспериментальный

спектр приходящих ионов Гауссовский, но в нашем случае прямоугольники, так как экспериментов не проводилось и пришлось довольствоваться тем что есть. Вернёмся к графику, из него видно, что при использовании постоянного ускоряющего напряжения, мы всего лишь можем различить ионы азота с $\frac{1}{14} \dots \frac{3}{14}$, так как другие имеют большую скорость и не успевают разделиться на нашей длине трубе дрейфа и приходят почти в один и тот же момент времени. Тоже самое будет и для ионов углерода, которые имеют отношение заряда к массе $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$.

Построим график зависимости ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для углерода $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$

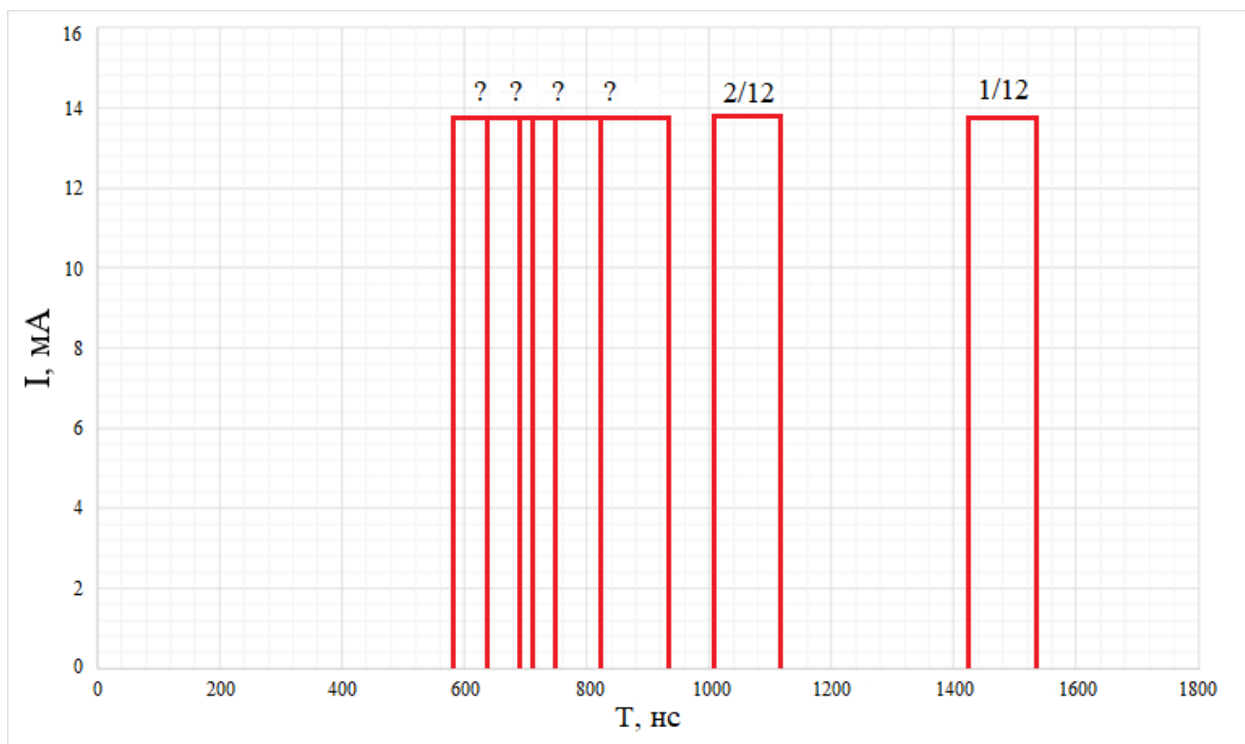


Рис. 3.10. Зависимость ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для углерода $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$

А если предположим, что у нас смесь газов, то есть в плазме присутствует ионы азота со всеми масс-зарядовыми состояниями $\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$ и присутствует

углерод, тоже со всеми масс-зарядовыми состояниями $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$, то импульсы будут выглядеть следующим образом.

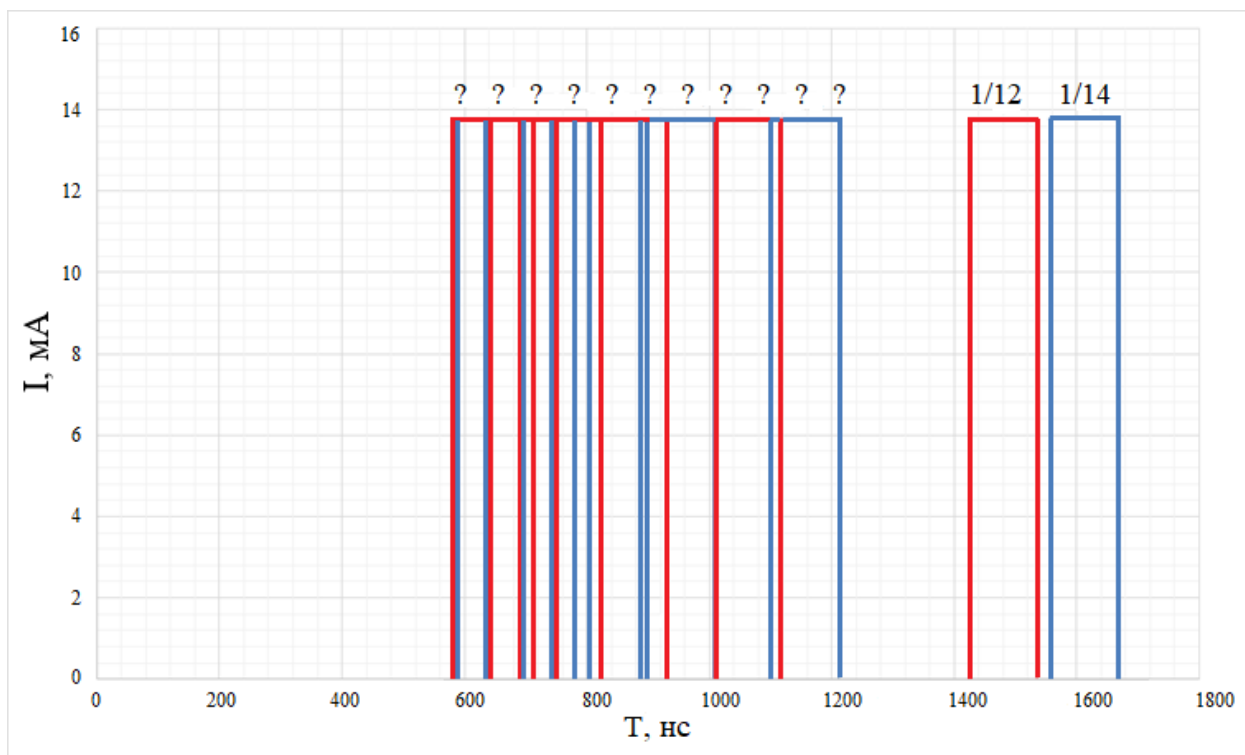


Рис. 3.11. Зависимость ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для углерода $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$ азота $\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$

Это доказывает, что при использовании постоянного ускоряющего напряжения, невозможно разделить быстрые ионы с близки z/m из-за их инерционности. Чтобы хоть как-то разделить наши слипшиеся ионы, нужно увеличивать длину трубы дрейфа, но это уже не актуально, так как современные спектрометры имеют длину примерно 1 м.

Предлагаемый нами метод заключается в укорочении импульсов, которые несут в себе ионы, приходящих на датчик. В следующие подглаве будет рассмотрен этот метод

3.3. Определение масс-зарядовых состояний ионов азота ($\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$) и углерода ($\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$) при растущей энергии ионов, закон идеального банчи-рования (временная компрессия ионных пучков)

Метод заключается в том, что выходящие ионы из диода не будут идти друг за другом, как в методе использования постоянного ускоряющего напряжения, а они будут догонять самый первый ион своего сорта.

При растущей энергии выбранного сорта ионов преобразование происходит таким образом, что все ионы стартовали по всей ширине импульса и пришли в один и тот же момент времени на датчик. Закон идеального банчи-рования:

$$I(t)dt = I'(t')dt', \quad (3.8)$$

где $I(t)$ – значение тока ионов на выходе из диода в момент времени t ; $I'(t')$ – значение тока на датчике в момент прихода на коллектор t'

Уравнение (3.8) отражает тот факт, что все ионы вышедшие в интервале времени dt их диода в момент t , приходят на коллектор в момент t' в интервале dt' . Используя уравнение (3.6) с заменой T на t' можно получить

$$I(t) = \frac{I'(t')}{dt} \quad (3.9)$$

и после дифференцирования

$$I(t) = I'(t') \left[1 - \left(\frac{l}{2}\right) \cdot \left(\frac{m_i}{2eZ_i}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot U(t)^{-\frac{3}{2}} \cdot \frac{dU(t)}{dt} \right] \quad (3.10)$$

Уравнение (3.10) используют для расчёта $I'(t')$ при любых U . Ток $I(t)$ на выходе диода может быть рассчитан по закону Чайлда–Лендгмюра при известном $U(t)$ поведения напряжения на ускоряющем зазоре.

$$\frac{I(t)}{I'(t')} \cong \frac{1}{K_6}, \quad (3.11)$$

где K_6 – коэффициент банчирования определяемый уравнением $I'(t')$ на длине L в момент t .

При больших K_6 , $\frac{I(t)}{I'(t')} \rightarrow 0$. Выражение (3.10) тогда можно записать в виде:

$$\left[1 - \left(\frac{l}{2}\right) \cdot \left(\frac{m_i}{2eZ_i}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot U(t)^{-\frac{3}{2}} \cdot \frac{dU(t)}{dt} \right] = 0 \quad (3.12)$$

Из (3.12) можно найти закон увеличения $U(t)$ соответствующей идеальному банчирования

$$1 = \left(\frac{l}{2}\right) \cdot \left(\frac{m_i}{2eZ_i}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot U(t)^{-\frac{3}{2}} \cdot \frac{dU(t)}{dt} \quad (3.13)$$

$$\int_0^t dt = \left(\frac{l}{2}\right) \cdot \left(\frac{m_i}{2eZ_i}\right)^{\frac{1}{2}} \int_{U_0}^U U(t)^{-\frac{3}{2}} \cdot dU \quad (3.14)$$

Взять интеграл $\int_{x_0}^x x^{-\frac{3}{2}} dx = \int_{x_0}^x \frac{dx}{x^{\frac{3}{2}}}$

$$\int x^{\frac{3}{2}} = \frac{x^{-\frac{3}{2}+1}}{-\frac{3}{2}+1} = \frac{x^{-\frac{1}{2}}}{-\frac{1}{2}} = -\frac{2}{\sqrt{x}} = -\frac{2}{\sqrt{x}} \Big|_{x_0}^x = -\frac{2}{\sqrt{x}} + \frac{2}{\sqrt{x_0}} = 2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{x_0}} - \frac{1}{\sqrt{x}}\right);$$

$$t = \frac{2 \cdot l}{2} \cdot \left(\frac{m_i}{2eZ_i}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{U_0}} - \frac{1}{\sqrt{U}}\right] = l \cdot \left(\frac{m_i}{2eZ_i}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\sqrt{\frac{2eZ_i}{m_i}}}{\sqrt{\frac{2eZ_i \cdot U_0}{m_i}}} - \frac{\sqrt{\frac{2eZ_i}{m_i}}}{\sqrt{\frac{2eZ_i \cdot U}{m_i}}}\right] = l \cdot$$

$$\left[\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V}\right] = \left(\frac{l}{V_0} - t\right) = \frac{l}{V} = \frac{l}{V_0} \left[1 - \frac{V_0}{V}\right] = \delta$$

$$1 - \frac{V_0}{V} = \frac{V_0}{l} \cdot t; \left(\frac{V_0}{V}\right) = \left(1 - \frac{V_0 \cdot t}{l}\right)^2$$

Переходим к закону идеального банчирования:

$$U(t) = \frac{U_0}{\left(1 - \frac{V_{i_0} \cdot t}{L}\right)^2}, \quad (3.15)$$

где V_{i_0} – начальная скорость иона при $t=0$; U_0 – начальное напряжение.

Самым главным фактором является то, что этот закон работает только для выбранных заранее сортов ионов, то есть, каждому сорту ионов будет соответствовать своё ускоряющее напряжения для банчирования. Для упроще-

ния наглядности проведём сначала расчёты для иона водорода, так как он имеет всего лишь один заряд (Z), а потом рассмотрим уже конкретный пример.

Построим график зависимости ускоряющего напряжения $U(t)$ протонов от времени старта t при использовании закона идеального банчирования.

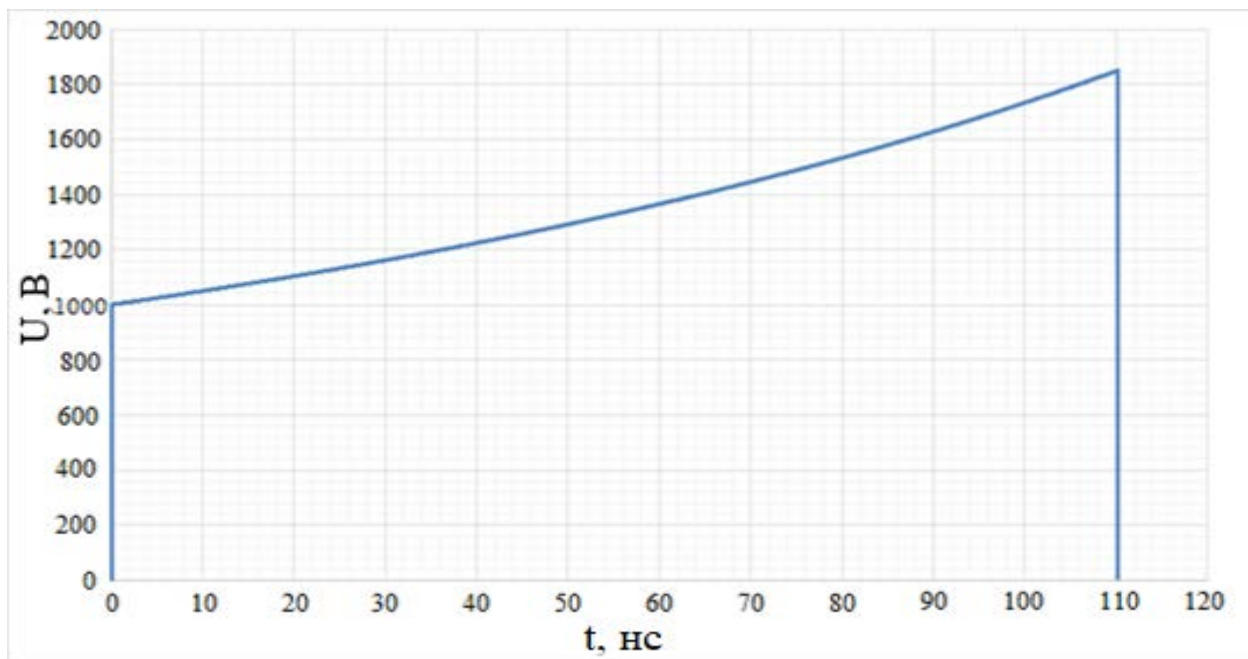


Рис. 3.12. Зависимость изменения напряжения $U(t)$ по закону идеального банчирования подаваемого на диод для протонов от времени старта t с катода

Закон идеального банчирования на оптимальной длине времяпролётной трубы (в нашем случае 18,2 см), уходит в δ -функцию, то есть в прямую линию. В этом случае функция время прихода от времени старта на оптимальной длине банчирования вырождается в линию параллельную оси абсцисс, это означает, что все ионы стартовали по всей ширине импульса и пришли в один и тот же момент времени на датчик, и дельта ΔT на коллекторе стало бесконечно малым, т.е. отношение $\frac{\Delta t}{\Delta T}$, в этой точке стремится к бесконечности, все ионы пришли в один момент времени. Это происходит потому что, первый ион, летит, а другие последующие догоняют, постепенно и когда догнали все в раз пришли на коллектор. Произошла идеальная ком-

прессия, поэтому нам сложно посчитать, отношение $\frac{\Delta t}{\Delta T}$, при длине 18,2 см, потому что, как говорилось выше полученные значения уходят в бесконечность, и мы берём длину чуть меньше, чтобы посмотреть, как происходит банчирования. При реальных обстоятельствах закон не будет уходить в бесконечность, потому что при расчёте мы не учитываем разброс по тепловым скоростям ионов и их кулоновское отталкивание по мере приближения к другу.

Построим график зависимости времени прихода ионов водорода T на датчик от времени старта t для разных промежуточных срезов нашей оптимальной длины 18,2 см, с целью показать, как происходит постепенно сжатие на промежуточных срезах 3 см, 6 см, 10 см, 12 см, 15 см, а близкое к банчированию значение возьмём 17 см.

Построим график зависимости время старта t_i от времени прихода T_i для иона водорода (протона).

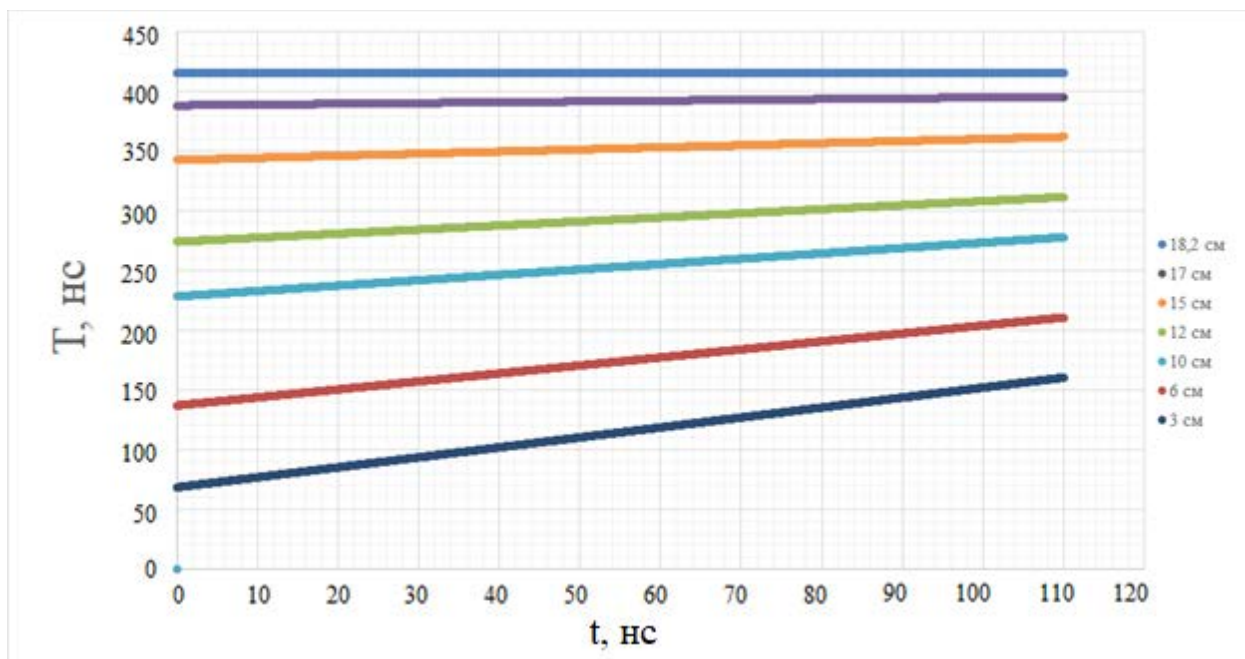


Рис. 3.13. Зависимость времени прихода ионов водорода T на датчик от времени старта t с катода при разных промежуточных срезах для закона идеального банчирования

Из рисунка 3.13 видно, если рассматривать все промежуточные срезы при всех выбранных длинах, кроме 18,2 см, можно увидеть, как происходит

постепенное сжатие, т.е. линии под наклоном стремятся выровняться и стать параллельно к оси абсцисс, на всех промежуточных длинах уже происходит временная компрессия и увеличения коэффициент банчирования.

Для более лучшего понимания проведём сноску на ось X для времени прихода первого иона и последнего при промежуточном срезе 3 см, то есть, что мы делали в методе использования постоянного ускоряющего напряжения.

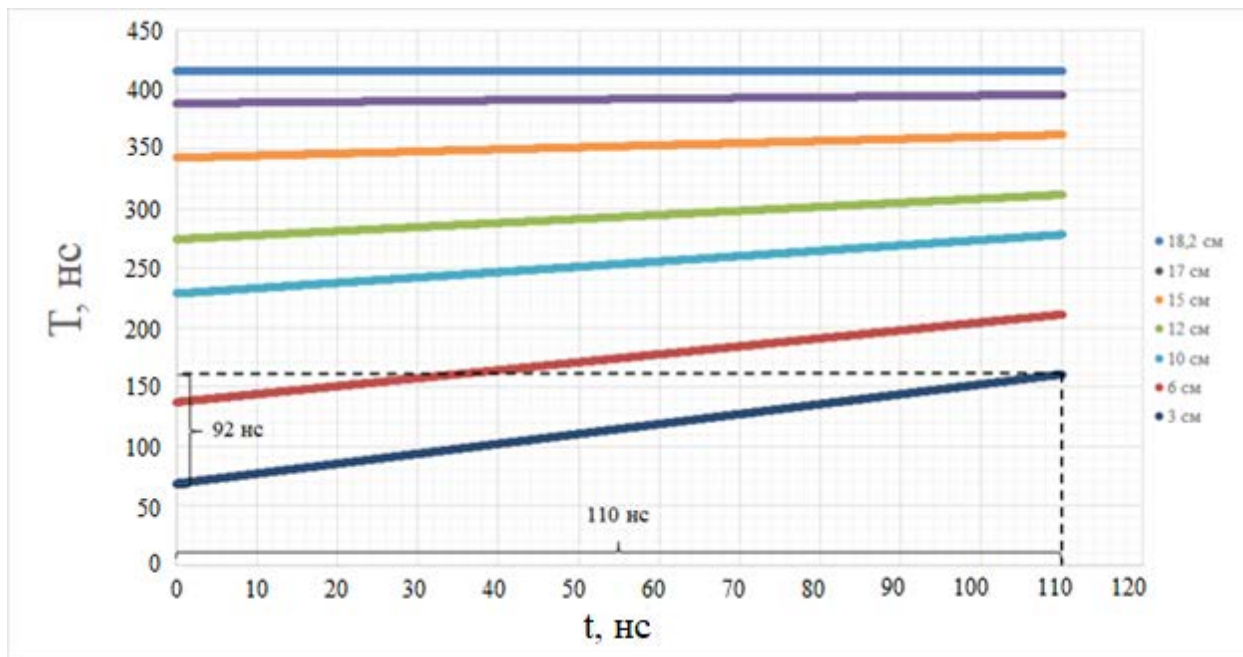


Рис. 3.14. Зависимость времени прихода ионов водорода T на датчик от времени старта t с катода при разных промежуточных срезах для закона идеального банчирования

Из рисунка 3.14 видно, что при промежуточной длине 3 см, разность времени импульса с катода составляет 110 нс, а разность времени прихода на датчике составляет 92 нс. Это означает, что ионы, которые отстают от самого первого иона определённого сорта в пространстве, начинают догонять самый первый, так как, ионы, которые идут сзади и догоняют, имеют большую скорость из-за роста напряжения. Мы можем посмотреть, как происходит преобразование при промежуточной длине 12 см

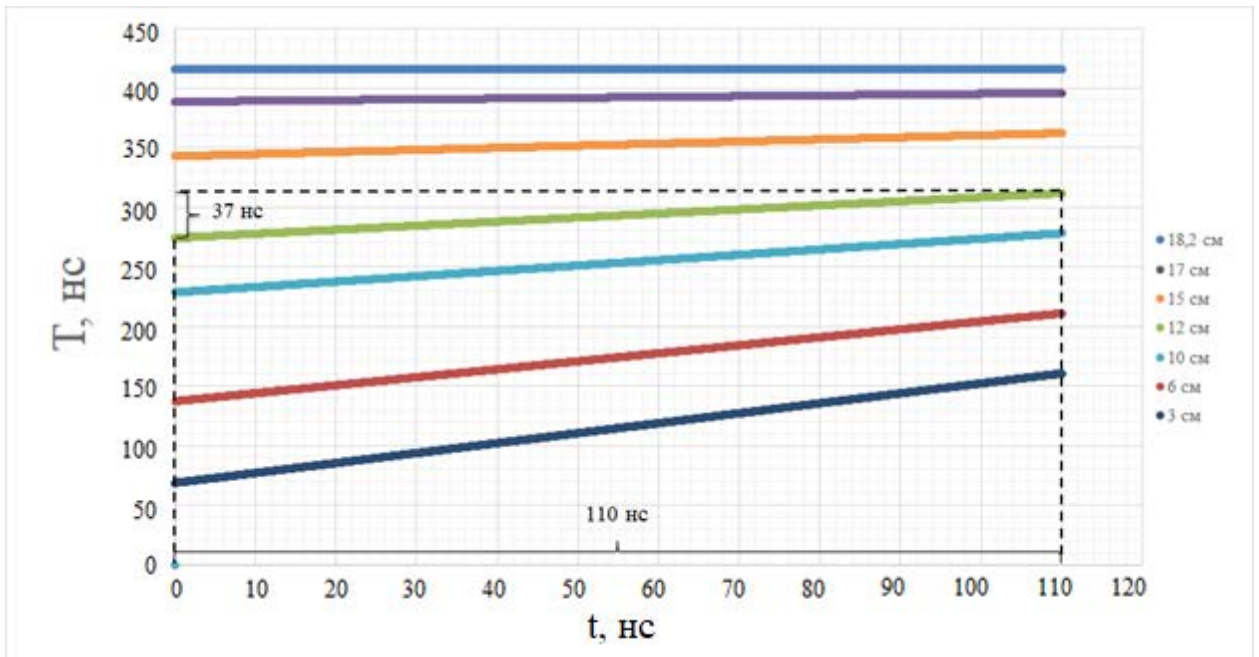


Рис. 3.15. Зависимость времени прихода ионов водорода T на датчик от времени старта t с катода при разных промежуточных срезах для закона идеального банчирувания

Из рисунка рисунок 3.15 видно, что при промежуточной длине 12 см, разность времени импульса с катода составляет 110 нс, а разность времени прихода на датчике составляет 37 нс.

Рассмотрим, как меняется импульс ионов водорода по мере движения в трубе дрейфа:

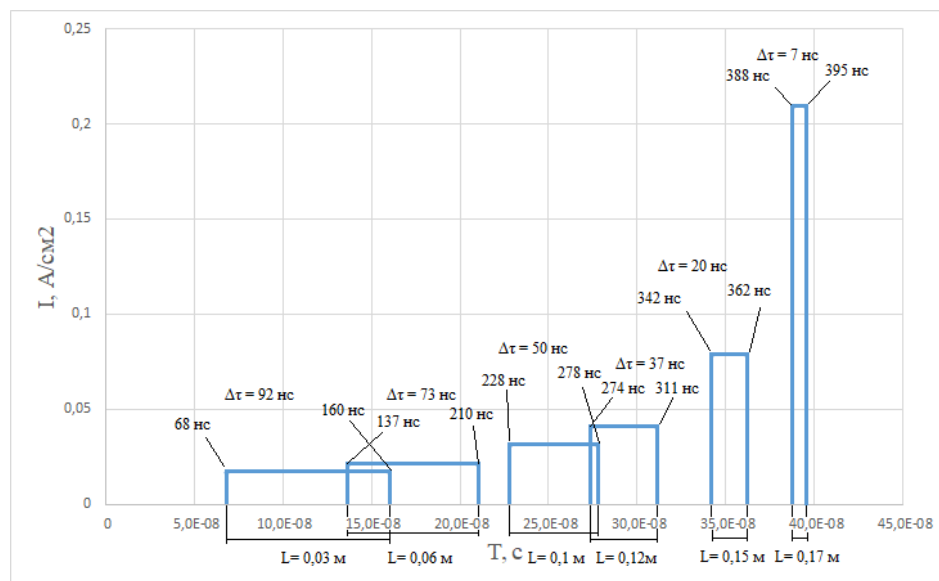


Рис. 3.16. Зависимость ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для ионов водорода

Из рисунка рисунок 3.16 видно, как происходит трансформация импульса в более короткий при промежуточных срезах: 3 см, 6 см, 10 см, 12 см, 15 см, 17 см. Так же из графика видно, что при длине 17 см, импульс укорачивается до 7 нс, вместо своим 110 нс. Теперь возьмём длину 18 см, которая очень близко к длине идеального банчирования и построим график.

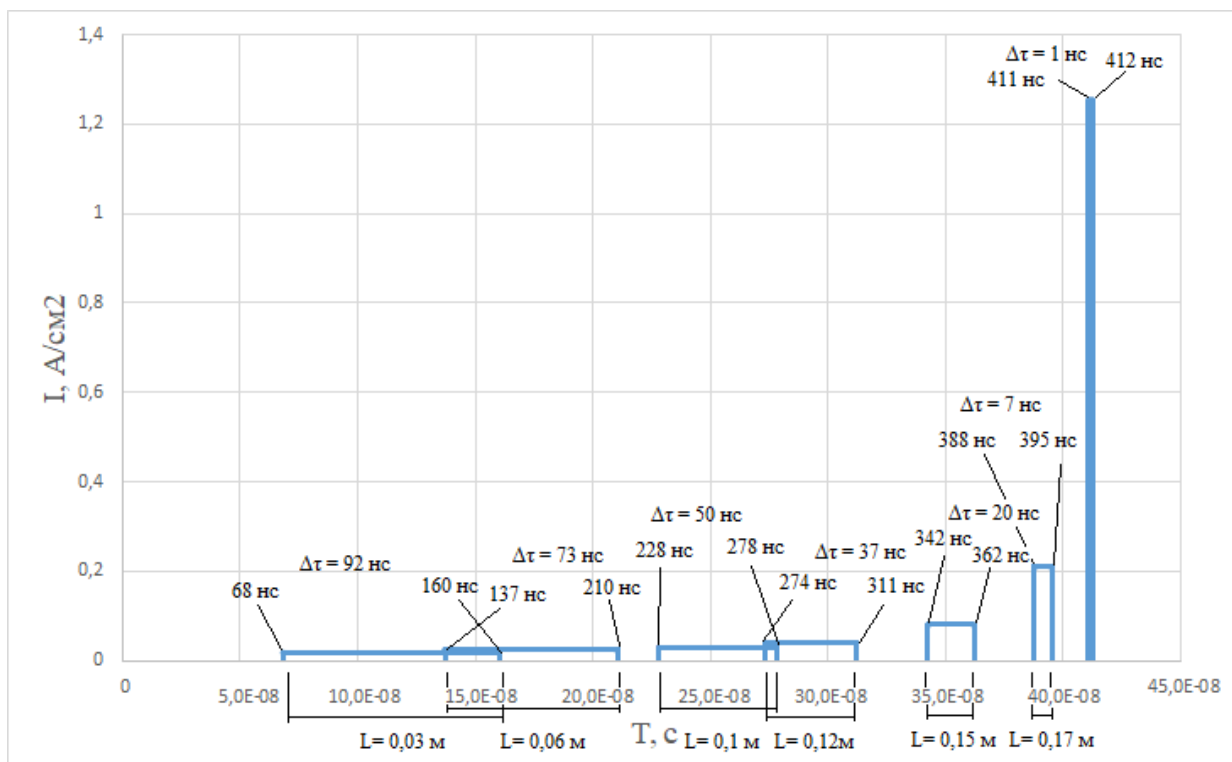


Рис. 3.17. Зависимость ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для ионов водорода

Из рисунка 3.17 видно, что если брать значения длины очень близкие к длине идеального банчирования, то мы будем получать очень короткие импульсы, которые вырождаются в прямую линию. Для длины 18 см импульс на датчике составляет 1 нс, вместо 110 нс. В случае использования закона идеального банчирования, отношение $\frac{\Delta t}{\Delta T}$ будет расти в бесконечность при приближении к длине идеальной компрессии. Это доказывает, что при использовании закона идеального банчирования, возможно укоротить приходящие импульсы на датчик, такого невозможно добиться при использовании постоянного ускоряющего напряжения.

Был рассмотрен простейший случай с ионом водорода, теперь перейдём к конкретным ионам. Рассмотрим смесь газов, то есть в плазме так же, как и в случае постоянного ускорения предполагается, что присутствует ионы азота со всеми масс-зарядовыми состояниями $\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$ и присутствует углерод, тоже со всеми масс-зарядовыми состояниями $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$. Как говорилось выше, закон идеального банчирования работает только для определённого сорта ионов, а законом идеального банчирования управляет генератор, который подаёт импульсы на анализирующий диод. Рассмотрим случай, когда генератор настроен на банчирование протонов для нашей смеси газов.

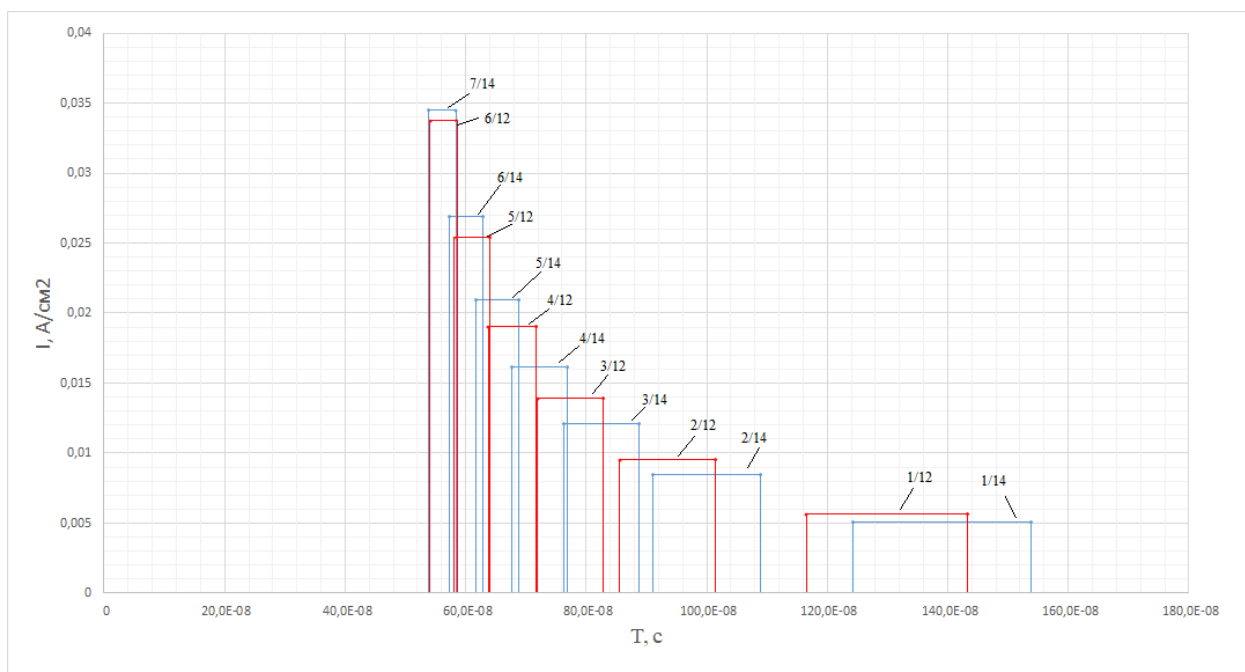


Рис. 3.18. Зависимость ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для ионов углерода $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$ азота $\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$

Из рисунка 3.18 видно, что закон идеального банчирования, который был настроен для протонов, не может банчировать остальные ионы разного сорта. Поэтому мы можем управлять законом, то бишь мы можем менять U1 и U2, то есть начальное напряжение, которое подаётся на анализирующий диод и конечное. Другими словами, мы можем раздвинуть приходящие импульсы друг от друга и поточнее посмотреть.

Допустим мы хотим поточнее посмотреть, сбанчировать, ионы азота $\frac{7}{14}$, для этого нужно изменить U2. В соответствии с законом идеального банчирования мы получим:

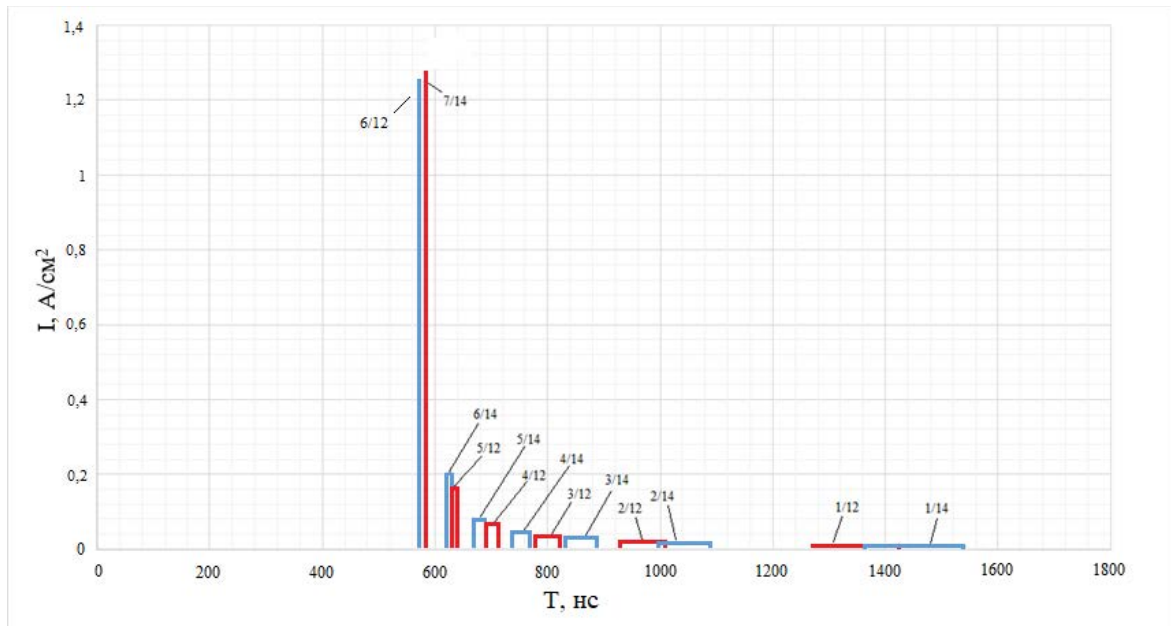


Рис. 3.19. Зависимость ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для ионов углерода $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$ азота $\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$

Из рисунка 3.19 видно, что после изменения U2 для сорта ионов $\frac{7}{14}$ произошла компрессия этих ионов. Либо нужно сбанчировать ионы углерода с $\frac{1}{12}$.

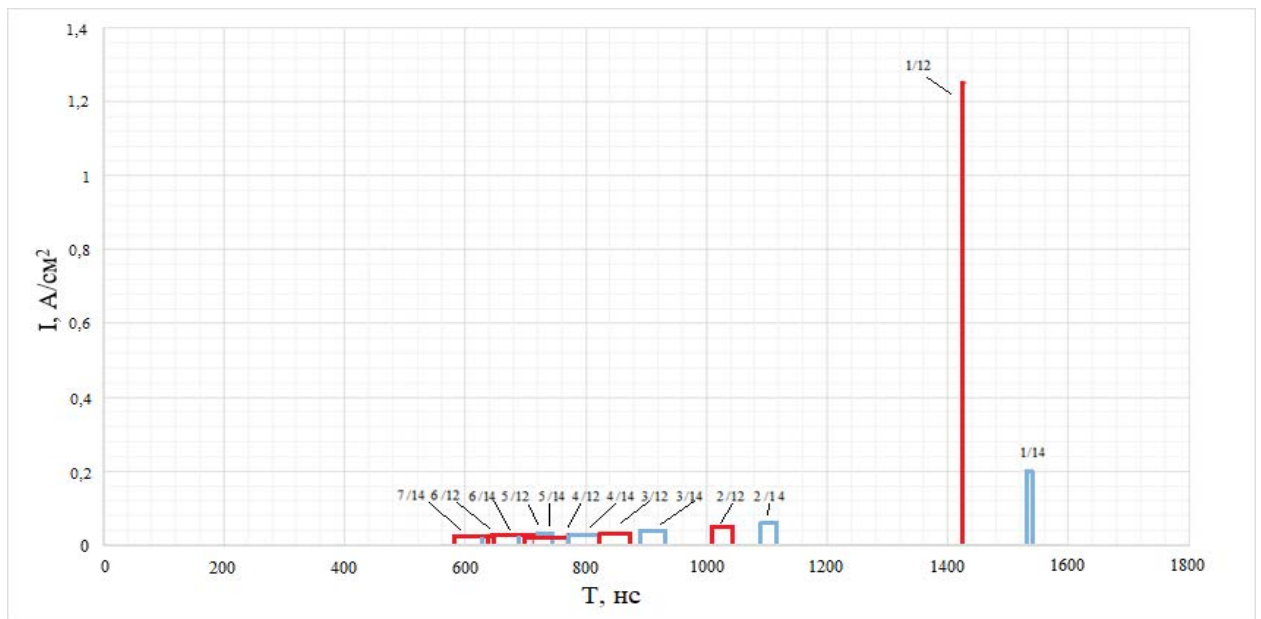


Рис. 3.20. Зависимость ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для ионов углерода $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$ азота $\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$

Либо мы можем задать генератору условие, чтобы он для всех предполагаемых масс-зарядовых состояний выставил свой U_2 и сбанчировал и потом выдал общую картину.

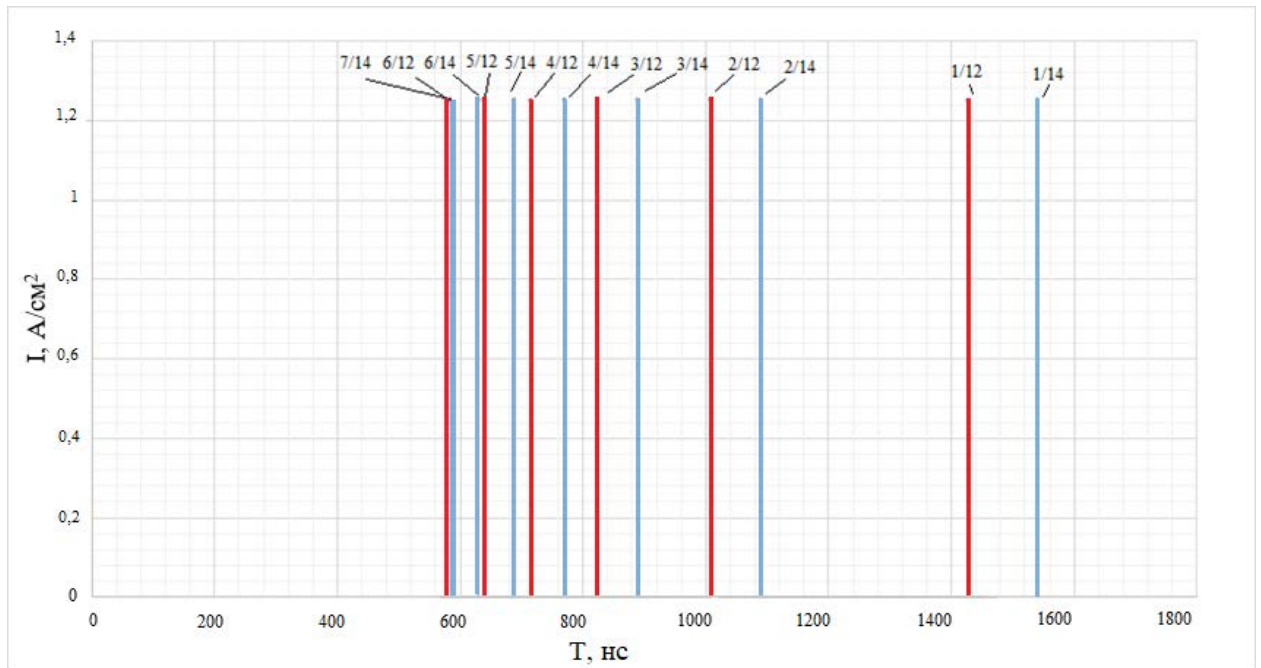


Рис. 3.21. Зависимость ионного тока на датчике (импульс) от времени прихода T для ионов

углерода $\frac{1}{12} \dots \frac{6}{12}$ азота $\frac{1}{14} \dots \frac{7}{14}$

Из рисунка 3.21 видно, что все ионы, которые предполагались сбанчировались в 1 нс вместо 110 нс, даже самые близкие ионы с z/m теперь можно различить на 1-2 нс этого достаточно.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

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

4.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования и теоретических расчётов являются, полученные данные о свойствах движения некоторых ионов плазмы с разными (z/m), которые зависели от различного рода профилированного напряжения.

Сегментировать рынок услуг можно по следующим критериям: временная компрессия ионных пучков, высокое энергетическое разрешение спектрометра, научно-исследовательская работа.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг

	Организации		
	Службы безопасности и контроля	Исследовательские центры (ТПУ, РФФ)	Медицинские учреждения

Область применения	Установление строения соединений			
	Научно-исследовательская работа			
	Элементный анализ ионов плазмы			

4.2. Анализ конкурентных технических решений

Был проведен детальный анализ конкурентных разработок, применяемых и существующих на данный момент. Детальный анализ необходимо проводить систематические из-за динамического характера рынка. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы обладать большей конкурентоспособностью. Так же необходимо оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Для этой цели может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 4.2. В этой таблице сравнивается техническая ресурсоэффективность и экономическая эффективность предложенной конструкции и методики для времяпролётного масс-спектрометра с пространственно-временной фокусировкой (компрессией) для анализа ионов из плазмы с другими конкурентными методами:

Бф – Времяпролётный масс-спектрометр с использованием ускоряющих профилированных напряжений и пространственно-временной фокусировкой (компрессией) для анализа ионов из плазмы;

Бк1 – Времяпролётный масс спектрометр с отражающим ионным зеркалом и пространственно-временной фокусировкой (компрессией) для анализа ионов;

Бк2 – Времяпролётный масс спектрометр с задержанной экстракцией и пространственно-временной фокусировкой (компрессией) для анализа ионов.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы (маx 5)			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Бф	Кк1	Кк2
1. Условие «разрыва» плазмы в ускоряющем зазоре анализирующего диода спектрометра	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
2. Стоимость внедрения	0,05	2	5	5	0,25	0,15	0,25
3. Высокая плотность плазмы около 10^{10} - 10^{12} см ⁻³	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
4. Однородность плазмы (на всей площади)	0,05	4	5	5	0,2	0,25	0,25
5. Временная компрессия ионных пучков	0,2	5	1	1	1	0,2	0,2
6. Высокоточная дозировка газа при напуске	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
7. Оптимизация работы источника в импульсном периодическом режиме	0,05	5	4	5	0,25	0,2	0,25
8. Сложность конструкции	0,05	2	5	5	0,25	0,25	0,25

9. Увеличение плотности тока ионного пучка	0,2	5	3	4	1	0,2	0,2
10. Определение масс-зарядового состояния ионов	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Итого	1	42	37	36	3,95	2	2,35

Из таблицы 4.2 видно, что времяпролётный масс спектрометр с отражающим ионным зеркалом и пространственно-временной фокусировкой (компрессией) для анализа ионов уступает времяпролётному масс-спектрометру с использованием ускоряющих профилированных напряжений и пространственно-временной фокусировкой (компрессией) для анализа ионов из плазмы. Несмотря на это, два метода могут быть использованы параллельно для получения более точной информации о анализе плазмы.

4.3. SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильными сторонами разработки методики можно назвать следующие свойства и особенности:

- предлагаемый спектрометр не требует абсолютной калибровки по массам;
- теоретически неограниченный предел регистрируемых масс;
- имеет малые габариты;
- высокие скорости развертки спектра.

Слабыми сторонами данной разработки можно назвать следующие свойства и особенности:

- погрешности, которые могут привести к неправильной идентификации ионов плазмы;

- ограничение по плотности плазмы, напускаемой в анализирующий диод.
- для закона идеального банчирования, сложно определить коэффициент банчирования, так как функция принимает вид δ – функции и уходит в бесконечность;
- при постоянной энергии ионов, невозможно получить временную компрессию ионов, из-за инерции ионов.

К возможностям данной разработки методики можно отнести:

- создание ионных пучков различного диапазона энергии с малой длительностью, долей наносекунд, с высокой плотностью мощностей;
- генерация нейтронного излучения сверхмощных вспышек, нейтральных пучков.

К угрозам можно отнести:

- поломка времяпролётного масс-спектрометра;
- поступление атмосферы в спектрометр, что повлечёт за собой поступление пыли, грязи и нейтральных частиц, что не есть хорошо;
- отсутствие коммерческого интереса к проекту;
- недостаточная точность расчётов;
- покупка дополнительных комплектующих для спектрометра.

В таблице 4.3 представлен SWOT-анализ в виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 4.3 - SWOT - анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	С1. Предлагаемый спектрометр не требует абсолютной калибровки по массам; С2. теоретически неограниченный предел регистрируемых масс; С3. имеет малые габариты; С4. высокие скорости раз-	Сл1. Наличие погрешностей, которые могут привести к неправильной идентификации ионов плазмы; Сл2. ограничение по плотности плазмы (10^{10} - 10^{13} см ³), напускаемой в анализирующий диод; Сл3. для закона идеального

	вертки спектра.	банчирования, сложно определить коэффициент банчирования, так как функция принимает вид - функция и уходит в бесконечность; Сл4. при постоянной энергии ионов, невозможно получить временную компрессию ионов, из-за инерции ионов.
Возможности: В1. Создание ионных пучков различного диапазона энергии с малой длительностью, долей наносекунд, с высокой плотностью мощностей; В2. генерация нейтронного излучения сверхмощных вспышек, нейтральных пучков.	1. Развитие новых подходов для формирования сверхкоротких импульсов ионных токов единицы и доли наносекунд; 2. использование как нового физического инструмента для создания сверхмощных импульсов нейтронов, нейтральных потоков.	1. Возможность быстрого получения информации о масс-зарядовом состоянии плазмы, благодаря малой длительности импульса; 2. разработка компьютерных программ для упрощения расчётов
Угрозы: У1. Поломка времяпролётного масс-спектрометра; У2. отсутствие коммерческого интереса к проекту; У3. недостаточная точность расчётов; У4. покупка дополнительных комплектующих для спектрометра.	1. Усиление контроля при эксплуатации оборудования; 2. увеличение плотности тока при законе идеального банчирования может повлечь за собой создание новых физических инструментов и новых физических исследований, что может проявить коммерческий интерес.	1. Использование программного обеспечения, которое может устранить погрешности и неточность расчётов. 2. чтобы оценить коэффициент банчирования, можно посмотреть, как он изменяется на других промежутках срезах времяпролётной трубы или ввести ограничение по коэффициенту банчирования. 3. создание прибора (датчика), который будет отслеживать плотность плазмы при подаче в спектрометр, что минимизирует риск поломки прибора и замены его комплектующих.

Проанализировав характер НТР можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении об-

щих усилий фирмы с коммерческими предприятиями партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Эта стратегия выбрана, так как необходимо найти стабильный рынок заказов и сбыта товара.

Данные прибор и методики находятся в стадии теоретической разработки. На данном этапе говорить о проведение экспериментальных опытов и проверки экспериментальных данных с теоретическими расчётами, пока рано. SWOT – анализ показал, что данный прибор и методика имеют ряд преимуществ и недостатков, которые на данный момент ни как не устранены практически, но в теории уже есть возможности устранения этих проблем. Так же имеются очень хорошие возможности и сильные стороны проекта, которые в дальнейшем могут быть реализованы и в процессии реализации все негативные стороны проекта будут сведены к минимуму.

4.4. Цели и результат проекта

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

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.п. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представить в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Томский политехнический Университет	Получения теоретических результатов свойств движения ионов (H^+ , N^+ , Ar^+) при генерации различных форм ускоряющих напряжений.
РНФ	

Далее необходимо представить информацию о иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 4.5 – Заинтересованные стороны проекта Цели и результат проекта

Цели проекта:	Создать компактный прибор, который будет точно и быстро анализировать ионы (H^+ , N^+ , Ar^+) плазмы, а так же будет очень компактным и иметь высокое энергетическое разрешение.
Ожидаемые результаты проекта:	Получение спектральных пиков для различных ускоряющих напряжений и определить, при каком ускоряющем напряжении достигается наилучшее энергетическое разрешение
Критерии приемки результата проекта:	Возможность применения полученных теоретических расчётов для предсказания результатов эксперимента
Требования к результату проекта:	Требование:
	Энергетическое разрешение спектрометра должно быть порядка 10000
	Спектральные пики должны быть построены для каждого случая растущего напряжения
	График времени прихода ионов от времени старта, должен чётко показывает свойства изменения скорости ионов и сжатие по времени
	Полученное в результате расчета время приходов ионов должно в будущем коррелировать с экспериментальными данными

4.5. Организационная структура проекта.

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в табличной форме (табл. 4.6)

Таблица 4.6 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
	Ремнев Геннадий Ефимович – доктор технических наук, профессор, заведующий научно-производственной лабораторией "Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий".	Руководитель проекта	Координирует деятельность участников проекта	42
	Христенко Антон, Инженерная школа ядерных технологий, магистрант	Исполнитель по проекту	Выполняет отдельные работы по проекту	558
ИТОГО:				600

4.6. Планирование управления научно-техническим проектом

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

Таблица 4.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
1. Бюджет проекта	250000 руб.
2. Источник финансирования	РНФ
3. Сроки проекта:	16.06.2019
4. Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2019
5. Дата завершения проекта	01.06.2019

Примечания: К прочим ограничениям могут относиться ограничения на количество ресурсов (например, ограничения по времени использования

научного оборудования, времени работы участников проекта), ограничения, связанные с законодательством, окружающей средой и т.д.

4.7. План проекта

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

Линейный график представляется в виде таблицы (табл. 4.8).

Таблица 4.8 – Календарный план проекта

Номер работы	Название	Длительность, раб.	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Составление технического задания	2	01.02.19	02.02.19	Р
2	Изучение литературы и анализ существующих ВПР	17	03.02.19	21.02.19	М
3	Календарное планирование работ по теме	5, 6	22.02.19	27.02.19	М, Р
4	Выбор оптимальных параметров для расчёта	4	28.02.19	5.03.19	М
5	Разработка методик для определения ионов плазмы с разными z/m	5	6.03.19	11.03.19	М
6	Проведение теоретических расчётов и обоснований	5	12.03.19	17.03.19	М
7	Оценка правильности полученных результатов	18	18.03.19	07.04.19	М, Р
8	Построение зависимостей для различных методик анализа	8, 20	8.04.19	07.05.19	М, Р

	ионов плазмы				
9	Анализ полученных результатов	6, 18	08.05.19	31.06.19	М, Р
Итого		95			

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

График строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 4.9 — Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работы	Вид работ	Исполнители	Тк, кал, дн.	Продолжительность выполнения работ															
				февраль				март				апрель				май			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Составление технического задания	Р	2	■															
2	Изучение литературы и анализ существующих ВПР	М	19	▨	▨	▨	▨												
3	Календарное планирование работ по теме	М, Р	5,7				■												
4	Выбор оптимальных параметров для расчёта	М	7							▨									
5	Разработка методик для определения ионов плазмы с разными z/m	М	7							▨									
6	Проведение теоретических расчётов и обоснований	М	7								▨								

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (4.1)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.); k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы. Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – студент.

Основные работы для ВКР проводились за персональным компьютером (ноутбуком) в комнате жилого дома. Время, проведенное работой у компьютера, примем равным 558 часам. Мощность ноутбука: 0,2 кВт·ч.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 5,8 \cdot 0,2 \cdot 558 = 647, \quad (4.2)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч); P – мощность оборудования, кВт; $F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 647 рублей.

Материальные затраты, необходимые для выполнения представленных в проекте расчетов разработки, представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 — Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Бумага	шт.	200	0,4	80
2. Печать на листе А4	шт.	200	1,5	300
3. Карандаш	шт.	4	8	32
4. Ластик	шт.	1	10	10
5. Доступ в интернет	месяц	3	350	1050
6. Электроэнергия	кВт·ч	558	5,8	647
7. Office 365 (CSP)	шт.	3	375	1125
8. Mathcad Professional - Individual	шт.	1	43560	43560
9. Windows 10 Домашняя	шт.	1	12 857	12 857
Итого				59661

4.8.3. Основная заработная плата исполнителей темы

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).

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.3)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (4.4)$$

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

$T_{р}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 19);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{м} \cdot M}{F_{д}}, \quad (4.5)$$

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

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

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

$F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 4.11).

Таблица 4.11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48

- невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.6)$$

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Z_{tc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томской области).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.12.

Расчёт основной дополнительной заработной платы приведён в таблице 4.13.

Таблица 4.12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} , руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.
Руководитель	49664	0,3	-	1,3	83932	3478	7	24344	2434
Магистр	12663	0	-	1,3	16462	682	93	63426	6343
Итого $Z_{осн}$								87770	8777

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

- оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор (см. «Положение об оплате труда», приведенное на интернет-странице Планово-финансового отдела ТПУ);

- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д;

- иные выплаты; районный коэффициент.

4.8.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (4.7)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы

Дополнительная заработная плата представлена в таблице 4.13.

Таблица 4.13. Дополнительная заработная плата

Исполнитель	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{осн}}$	$Z_{\text{доп}}$
Руководитель	0,1	24344	2434
Магистрант	0,1	63426	6343
Итого			8777

4.8.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников [24].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.8)$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

$$k_{\text{внеб}} = k_{\text{пф}} + k_{\text{с}} + k_{\text{пн}}, \quad (4.9)$$

где $k_{\text{пф}}$ – коэф. отчисления в пенсионный фонд; $k_{\text{с}}$ – коэф. Отчисления страховых взносов; $k_{\text{пн}}$ – коэф. отчисления в подоходный налог. $k_{\text{внеб}} = 0,271$

Таблица 4.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Магистрант
Основная заработная плата, руб.	24344	63426
Дополнительная заработная плата, руб.	2434	6343
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Сумма отчислений	7257	18 908
Итого		26165

4.8.6. Накладные расходы

Накладные расходы составляют 30 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.10)$$

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

Таблица 4.16 – Накладные расходы

Исполнитель	Руководитель	Магистрант
Основная заработная плата, руб.	24344	63426
Дополнительная заработная плата, руб.	2434	6343
Коэффициент накладных расходов	0,3	0,3

ДОВ		
Сумма накладных расходов	8033	20931
Итого		28 64

4.8.7. Формирование бюджета затрат НИИ

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИИ	59661
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	87770
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	8777
4. Отчисления во внебюджетные фонды	26165
5. Прочие прямые затраты (электроэнергия)	647
6. Накладные расходы	28664
Бюджет затрат НИИ	211684

4.8.8. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу была сведена в таблицу 4.17.

Таблица 4.17 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность	Влияние	Уровень риска*	Способы смягчения риска
1	Получение теоре-	Сложности	1	3	Низкий	Поиск данных

	тических расчётов, которые шли в разрез с предсказанными данными	корреляции расчетных и предсказанных данных				с других ускорителей
2	Поломка ноутбука	Затруднение проведения вычислений	3	4	Выше среднего	Предоставление студенту рабочего места с компьютером

4.8.9. Реестр рисков проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (4.12)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее числен-

ное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.13)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведен в форме таблицы (табл. 4.18).

Исп.1 – Времяпролётный масс-спектрометр с использованием ускоряющих профилированных напряжений и пространственно-временной фокусировкой (компрессией) для анализа ионов из плазмы;

Исп.2 – Времяпролётный масс-спектрометр с использованием постоянного профилированного напряжения без пространственно-временной фокусировкой (компрессией) для анализа ионов из плазмы;

Таблица 4.18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Соответствие теории и эксперимента	0,25	4	4
2. Удобство в эксплуатации	0,10	5	5
3. Сложность установки в существующие устройства	0,30	5	2
4. Стоимость внедрения	0,20	4	3
5. Время проведения измерений	0,15	4	4
ИТОГО	1	22	18

$$I_{p-исп1} = 4 * 0,25 + 5 * 0,1 + 5 * 0,30 + 4 * 0,20 + 4 * 0,15 = 4,4 \quad (4.14)$$

$$I_{p-исп2} = 4 * 0,25 + 5 * 0,1 + 2 * 0,30 + 3 * 0,20 + 4 * 0,15 = 3,3 \quad (4.15)$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} \quad \text{и т.д.} \quad (4.16)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.17) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (4.17)$$

Таблица 4.19 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.4	3.3
3	Интегральный показатель эффективности	4.4	3.3

5. Социальная ответственность

Охрана труда – это система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека во время труда.

Полностью безопасных и безвредных производств не существует. Задача охраны труда — свести к минимуму вероятность поражения или заболевания работающего с одновременным обеспечением комфорта при максимальной производительности труда. Реальные производственные условия характеризуются, как правило, наличием некоторых опасных и вредных производственных факторов.

Опасным производственным фактором согласно [24] называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства)

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правил техники безопасности. Обучение персонала техник безопасности и производственной санитарии состоит и вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 1.

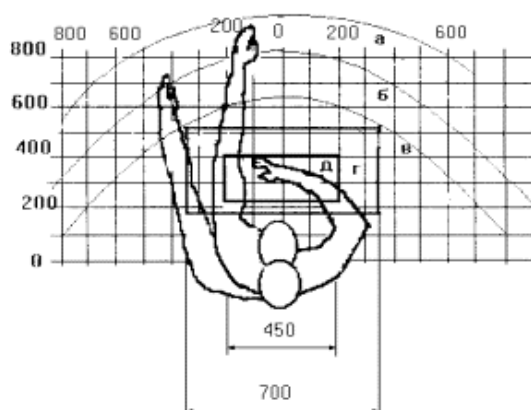


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования:

– высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм;

- высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм;
- рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм;
- должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Организация рабочего места показана на рисунке 2.

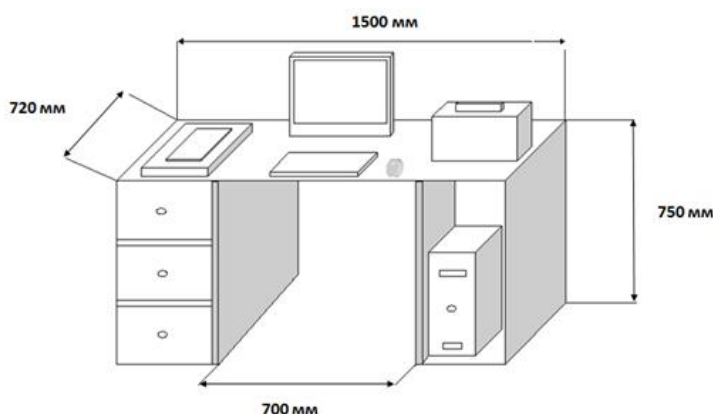


Рисунок 5.2 – Схема организации рабочего места

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;

- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

5.2. Профессиональная социальная безопасность

5.2.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

Под опасным производственным фактором понимается фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме (высота, огонь, электрический ток, движущиеся предметы, взрыв). Вредным производственным фактором является фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию (неблагоприятный микроклимат, повышенный уровень шума, вибрации, плохое освещение, неблагоприятный состав воздуха).

Согласно [24] при работе с ПЭВМ на сотрудников могут воздействовать опасные и вредные факторы, приведенные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Расчёт на ПЭВМ различного z/m со-		Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробез-

СТОЯНИЯ ИОНОВ			опасность СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
		Пожарная опасность	ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)		Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»

На инженера, работающего с ПЭВМ, воздействуют следующие факторы:

1. физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, вредные химические вещества, освещённость. Воздействие электромагнитного излучения было сведено к минимуму, так как при работе на ПЭВМ использовался жидкокристаллический монитор;

2. психофизиологические: физические перегрузки (статические, динамические), нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.2.2. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

Основные параметры, характеризующие условия труда, – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность,

скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата и приведены в таблице 2.

Таблица 5.2. – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Теплый	23-25	40	0,1

Температура – степень нагретости воздуха в рабочем помещении. По закону при восьмичасовом рабочем дне температура воздуха в офисном помещении должна составлять 23-25°С в теплое время года и 22-24 °С в холодное (при относительной влажности 40-60%). Отклонение от нормы разрешено лишь на 1-2 °С. Допустимое колебание температуры во время рабочего дня – не больше 3-4 °С .

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. При объеме помещения до 20 м³ в него должно подаваться, не менее 30 м³/ч наружного воздуха на одного человека. В случае объема помещения более 40 м³ на одного человека допускается естественная циркуляции, но с учетом отсутствия выделения вредных веществ.

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что подача приточного воздуха идет в помещения без предварительной очистки и подогрева.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внима-

ние, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

В работе [34] приведены следующие значения уровня шума в помещениях офисов, проектных и научно-исследовательских организаций:

- допустимый уровень – 45 дБ;
- максимальный уровень – 60 дБ;
- оптимальный уровень – 50 дБ.

При выполнении работы на ЭВМ уровень шума в рабочем помещении не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [26] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения

при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [25] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. В производственном помещении применяется общее равномерное освещение с помощью люминесцентных ламп. Согласно требованиям [33] освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

5.3. Экологическая безопасность

Данная тема пока, что находится на стадии теоретических расчётов и реальных испытаний не было, но мы заведомо проанализируем, как наши используемые газы могут повлиять на окружающую среду. В данной работе используются следующие газы: водород, азот, аргон.

Чтобы была происходила ионизация нужен газ, а без газа не будет ионизации. Обычно газ храниться в специальных газовых баллонах, но и они могут пропускать газ. Рассмотрим опасность используемых газов:

– **Водород** – это горючий газ. Смесь водорода с кислородом или воздухом в замкнутом пространстве при появлении искры, пламени или иных источников воспламенения может привести к взрыву. При хорошем освещении водородное пламя практически невидимо [35].

– **Азот** – газ без цвета и запаха. При испарении паров азота, содержащего небольшое количество кислорода, в первую очередь испаряется азот, в результате чего концентрация кислорода в жидкости увеличивается и

может достигнуть значений, при которых возникает опасность загорания и взрыва в ней ряда веществ и материалов [36].

– **Аргон** – газ без цвета и запаха. Аргон тяжелее воздуха и может скапливаться в прямках, колодцах, тупиках, вытесняя при этом воздух. Содержание кислорода может снижаться ниже предельных величин. Выравнивание концентрации за счет диффузии происходит медленно и зависит от объемов, геометрических форм, притока аргона в атмосферу, его температуры [37].

Чтобы не происходило вышеперечисленных опасностей, нужно принять следующие меры безопасности:

Водород нужно:

– Держать вдали от источников воспламенения и не допускайте скоплений газа;

– курение, открытое пламя горелки, статическое электричество, несанкционированное электрическое оборудование и иные источники воспламенения недопустимы в зонах, где используется или хранится водород;

– хранить контейнеры с водородом нужно вне помещений или в помещениях с хорошей вентиляцией, вдали от источников тепла, таких как печи, ковши для заливки металла и радиаторы, а также вдали от легко воспламеняемых материалов, таких как бензин, керосин, масло, углеродные растворители и горючие твердые вещества;

Что касается **азота** то:

– Баллоны с азотом не следует ронять и поднимать, держась за колпак или вентиль.

– Перевозка баллонов осуществляется при помощи тележек.

– Недопустимо перегревание емкостей с азотом.

Для **аргона**:

- дистанционный контроль содержания кислорода в воздухе ручными или автоматическими приборами; объем кислорода в воздухе должен составлять не меньше 19%;
- при работе с жидким аргоном, способным вызвать обморожение кожи и поражение слизистой оболочки глаз, необходимо использовать защитные очки и спецодежду;
- при работе в атмосфере аргона необходимо использовать шланговый противогаз или изолирующий кислородный прибор.

5.4. Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Влияние электрического тока на организм человека носит разносторонний характер, и может привести как к легкому, так и к тяжелому исходу.

Проходя через организм человека, электрический ток оказывает термическое и биологическое действия:

- нагрев тканей вплоть до ожогов;
- разложение крови и плазмы – нарушение физико - химического состава;
- возбуждение тканей организма (судороги).

Действие тока может привести к электрической травме.

Таким образом, действие тока на организм человека может быть местным и общим. Общее (рефлекторное) поражение – электрический удар, представляет для человека наибольшую опасность: нарушается работа централь-

ной нервной и сердечно - сосудистой систем, что приводит к фибрилляции и параличу сердца, а также к остановке дыхания.

Степень опасности и исход поражения электрическим током зависят от ряда причин. Основными из них являются: величина тока, проходящего через организм; путь прохождения тока; продолжительность действия тока; частота тока и сопротивление человека в момент соприкосновения с токоведущими частями, которые, в свою очередь, зависят от состояния окружающей среды (температура, влажность воздуха и т.д.).

Безопасной для человека является величина переменного тока – 10мА, постоянного – 50мА, безопасное напряжение 12В.

Помещение, в котором проводится работа, относится к группе помещений без повышенной опасности: сухое (влажность воздуха не превышает 75%), не жаркое (температура не превышает 28°С), с токонепроводящими полами, без токопроводящей пыли и химически активной среды. Все провода, подводящие напряжение к электрооборудованию, электроизолированы и находятся в заземленной металлической оплетке. Рубильник распределительного щитка имеет пластмассовый кожух. Также имеются отключающие автоматы. Выполнен контур защитного заземления из стальной полосы сечением 30 мм² по периметру помещения. Все электрические приборы в лаборатории заземлены.

Для предотвращения появления статического электричества и защиты от его влияния в помещении необходимо использовать нейтрализаторы и увлажнители, а полы должны иметь антистатическое покрытие. Конструкция пола в помещении обеспечивает сток и отвод статического электричества. Покрытие пола выполнено из гладких, прочных, обладающих антистатическими свойствами материалов.

5.5. Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [30], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, так как содержит твердые сгорающие вещества.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- неисправность токоведущих частей установок;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [31]:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Данные огнетушители предназначены для тушения загораний различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В, горючих жидкостей. Химические и пенные огнетушители не допустимы.

Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями [32] таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда,

повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара.

Согласно требованиям пожарной безопасности, на этаже находится 2 огнетушителя ОП-3 – огнетушители переносные порошковые, лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

ей.

Заключение

В ходе проделанной работы было определено условие «разрыва» плазмы в ускоряющем зазоре анализирующего диода спектрометра. Были сравнены методики определения масс-зарядовых состояний для близких по массе ионов N^+ и C^+ при постоянном импульсе напряжения, нарастающем импульсе напряжения и при законе идеального банчирования (временная компрессия ионных пучков). Так же были построены зависимости времени прихода ионов N^+ и C^+ на коллектор (датчик) от времени старта с катода при постоянном и при законе идеального банчирования (временная компрессия ионных пучков) и зависимость ионного тока, приходящего на датчик от времени пролёта ионов N^+ и C^+ в трубе дрейфа.

Из выше полученных результатов можно сделать вывод:

1. при использовании постоянного ускоряющего напряжения, можно различить только ионы азота и углерода с $\frac{1}{14} \dots \frac{3}{14}$ и $\frac{1}{12} \dots \frac{3}{12}$, так как другие имеют большую скорость и не успевают разделиться на нашей длине трубе дрейфа и приходят почти в один и тот же момент времени, остальные невозможно определить их-за их инерционности.

2. при использовании закона идеального банчирования, возможно различить близкие z/m ионов, из-за того, что первый ион летит, а другие догоняют, это приводит к укорочению импульса на датчике и росту амплитуды по току.

Список использованных источников

1. Лебедев, А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003. - 494 с.
2. Ключев, Н.А. Современные методы масс-спектрометрического анализа органических соединений / Н.А. Ключев, Е.С. Бродский // Рос. хим. ж-л.- 2002.- Т. XLVI, № 4.- С. 57 – 63.
3. Джонстон, Р. Руководство по масс-спектрометрии для химиков – органиков. Изд-во Мир: М. – 1975. – 236 с.
4. Гасанов Ильхам Солтан оглы. Плазменная и пучковая технология. Изд-во: "Элм", Баку 2007, 175 стр.
5. Сысоев А. А. Физика и техника масс-спектрометрических приборов и электромагнитных установок. М.: Энергоиздат, 1983.
6. Полякова А. А. Молекулярный масс-спектральный анализ органических соединений. М.: Химия, 1983.
7. Физические основы масс-спектрометрии (методы ионизации), Башкирский филиал АН СССР, Уфа, 1986.
8. Франкевич Е. Л. Физические методы исследований, Курс лекций, ч.2, МФТИ, 1978, с. 5-56.
9. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. «Физика плазмы для физиков». Москва, Атомиздат, 1979, 317 с.
10. Подгорный И.М. Лекции по диагностике плазмы. - М.: Атомиздат, 1962.
11. Грим Г. Спектроскопия плазмы. М.: Атомиздат, 1969.
12. Методы исследования плазмы, под ред. В. Лохте-Хольтгревена, изд-во «Мир», 1971.
13. В. В. Тахистов, Практическая масс-спектрометрия органических соединений. —Л.: ЛГУ, 1977, 278 с.
14. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-

методическое пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С.36.

15. Физические основы масс-спектрометрии: Методы ионизации / Под ред. Г. А. Толстикова. —Уфа: Башкирский филиал АН СССР, 1985, 120 с.

16. Р. Джонстон, Руководство по масс-спектрометрии для химиков-органиков. — М.: Мир, 1975, 236 с.

17. Дж. Чепмен, Практическая органическая масс-спектрометрия. — М.: Мир, 1988, 216 с.

18. В. Г. Заикин, А. В. Варламов, А. И. Микая, Н. С. Простаков, Основы масс-спектрометрии органических соединений, —М.: Наука/Интерпериодика, 2001, 286 с.

19. В. а Mamyurin, V.I. Karataev, D.V. Shmikk, V.A. Zagulin The mass-reflectron, a new nonmagnetic time-of-flight mass spectrometer with high resolution *Jetp*, 37 (2014), pp. 45–48

20. А.А. Sysojev, G.A. Samsonov Calculation of sector-shaped mass spectrometric analysers with curvilinear boundaries *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.*, 5 (2015), pp. 49–62

21. Johnston, RI Manual of mass spectrometry to chemists - organics. Publishing house of the World: M. - 1975. - 236 p.

22. M. Toyoda, D. Okumura, M. Ishihara, I. Katakuse Multi-turn time-of-flight mass spectrometers with electrostatic sectors *J. Mass Spectrom.*, 38 (2003), pp. 1125–1142

23. M. Ishihara, M. Toyoda, T. Matsuo Perfect space and time focusing ion optics for multiturn time of flight mass spectrometers *Int. J. Mass Spectrom.*, 197 (2000), pp. 179–189

24. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. №181-ФЗ (с изменениями от 20 мая 2002 г., 10 января 2003 г., 9 мая, 26 декабря 2005 г.).

25. СанПин 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
26. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
27. ИНСТРУКЦИЯ № 5-13 по охране труда для работников, занятых пайкой и лужением изделий паяльником, кафедры Прикладная физика (ПФ) (ТИ Р М-075-2003).
28. «Общие положения обеспечения безопасности радиационных источников» (НП-038-11), утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 05.03.2011 г № 104.
29. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП 2.6.1.2523-09.
30. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
31. Пожаро и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность.
32. ГОСТ 12.4.009-83, Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.
33. Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение" (утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78)
34. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ Опасные и вредные факторы. Классификация. – М.: ИПК: Изд-во стандартов, 1997 г.
35. ГОСТ Р 55891-2013 Водород газообразный и водородные смеси. Бортовые системы хранения топлива для транспортных средств
36. ГОСТ 9293-74 (ИСО 2435-73) Азот газообразный и жидкий. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправками N 1, 2)
37. ГОСТ 10157-2016 Аргон газообразный и жидкий. Технические условия

Список публикаций

High-current pulsed induction plasma source for generation of high intensity ion beams of different gases / Petrov, Anatoly Viktorovich; Remnev, Gennady Efimovich; Pavlov, Sergey Konstantinovich; Veresov, Alexander; Khristenko, Anton // Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2016) : International Congress, October 2–7, 2016, Tomsk, Russia : abstracts. — Tomsk : TPU Publishing House, 2016. — [P. 41].

Участие в грантах

Грант РФФИ 14-19-00439 "Разработка и исследование метода эффективной генерации мощных пучков легких и тяжелых ионов в магнитно-изолированных диодах с активными плазменными источниками для создания технологических импульсно-периодических ускорителей с высокой частотой следования импульсов."

Приложение А

Раздел 1

Разработка времяпролётного масс-спектрометра с временной компрессией для определения масс-зарядового состояния плазмы

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Христенко Антон Анатольевич		

Консультант НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Демидова О.М.	Старший преподаватель		

Introduction

Mass spectrometry is an instrumental method of various molecules registering by transferring a substance to the ionized state, separating the resulting ions according to the mass-to-charge ratio (m/z), and registering ions of each type. Mass spectrometry is a powerful research tool of organic and element-organic compounds. Instrumentation plays a key role as with any other method of analysis.

Mass - analyzers are divided to static and dynamic. As a rule, dynamic mass spectrometers have a lesser resolution, than static ones. However, their advantages are associated with small size and weight, efficiency, speed. In static mass analyzers, ions are divided, during their movement, by masses, in constant or practically unchanged magnetic and electric fields. For example, a magnetic / electrostatic sector mass - analyzer (ions are separated in a magnetic field due to their mass).

In dynamic analyzers, ion separation occurs under the influence of pulsed or radio frequency electric fields. There are the following dynamic masses - analyzers:

- Time-of-flight masses - analyzers (ions are separated in the fieldless space of the drift tube, also due to its mass);
- quadrupole (filters, ion traps) masses - analyzers (ions are separated according to the oscillation frequency).

The main nodes of the mass spectrometer are presented in the block diagram of Figure 1.

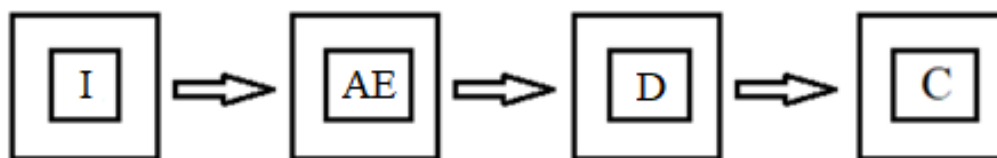


Figure 1. A generalized block diagram of a mass spectrometer. I - a source of ions. AE - analyzing ions, D - detector, C - system for collecting and processing data.

The ion source is the region of the mass spectrometer, where the ionization of the test substance molecules occurs, or already ionized molecules, such as plasma ions, enter this area of the mass spectrometer. There are soft and hard ionization methods:

Soft:

- chemical ionization (CI, CI);
- chemical ionization with atmospheric pressure (CIAD, APCI);
- matrix activated laser desorption / ionization (MALDI, MALDI);
- electrospray ionization (ESI, ESI);
- bombardment by accelerated ions by atoms (FAB);
- mass spectrometry of secondary ions (SIMS, SIMS);
- Desorption ionization by electrospray (DESI) Direct Real-Time Analysis (DART).

Hard:

- Ionization by electrons (IE, EI);
- ionization by inductively coupled plasma (ICP).

Ions are separated by masses with the help of various types of electric and magnetic fields *in the analyzing element*.

The detector serves to record the ions that have passed the analyzing element. There is a variety of detectors and each of them has its own principle of operation. Below are some of them:

- photoplates;
- Faraday cylinder;
- electron multipliers;
- photomultiplier with a transforming dynode;
- matrix detector.

People who work in the field of mass spectrometry know how the above detectors work, so their principle of operation will not be described, so we move on.

The data acquisition and processing system provides control of the experiment, registers the signals of the detectors and performs primary data processing.

All mass spectrometers need a vacuum so that ions can reach the detector without colliding with other gaseous molecules or atoms. If such collisions occur, the device is subject to a decrease in resolution and sensitivity. High pressures can also cause stress to the ground, which can damage the instrument, its electronics, or the computer system that serves the mass spectrometer. A powerful leak, and the atmospheric breakthrough based on it inside the instrument, can seriously damage the mass spectrometer, destroying its components!

Mass spectrometry cannot be avoided in the modern world. Mass spectrometry covers a wide range of applications, such as medicine, physics, chemistry, space industry, geology, etc. The theme of the graduate work is aimed at improving the resolution of the time-of-flight mass spectrometer, since time-of-flight instruments have this drawback. Therefore, the methods used for analysis are insufficient in view of the increased requirements for sensitivity, energy resolution, rapid analysis and compactness of the instrument. Because of that, the development of devices or methods for analyzing the z/m state of plasma ions is an important task.

Directly, this device will be further used for the analysis of plasma ions in ion implantation, coating applications and plasma sources. Therefore, an accurate and fast diagnosis of plasma ions is needed. The time-of-flight mass spectrometer is an excellent candidate. Compared to devices of other principles of operation, this device does not require absolute calibration, it has small hysteresis, high scanning rates of the spectrum and is very convenient for the selection of ions from plasma.

1. Main characteristics of mass spectrometers

Resolution (resolution) is the ability of the mass spectrometer to distinguish non-codes with different mass numbers.

The resolution R characterizes the possibility of separate registration of ions close in mass. An ideal mass spectrum should have resolved (separate) lines (narrow peaks of a rectangular shape). In reality, pointed peaks are observed in the mass spectrum, which differ from each other in width at the base and depth of the dip between the peaks, as a result of various kinds of distortions of the ion beam, as well as the inertia of the recording equipment. The greater the depth of the failure, the greater the resolution of the device. For ions with masses m and $(m + \Delta m)$ the resolution is $R = m:\Delta m$. Resolution is determined by the mass spectrum experimentally. The Δm value is measured at the level of 10% of the peak height.

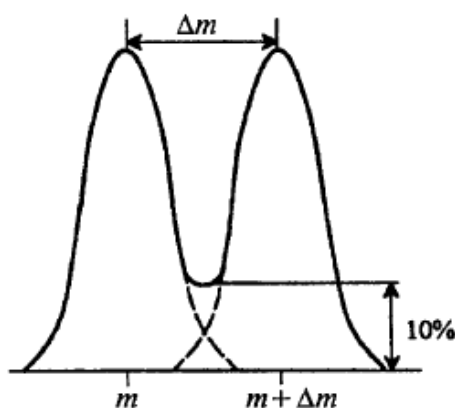


Figure 2. Determination of instrument resolution

The resolution of the mass spectrometer depends on the magnitude of the magnetic (electric) field, which accelerates the potential difference (ion energy), the pressure in the analyzer chamber.

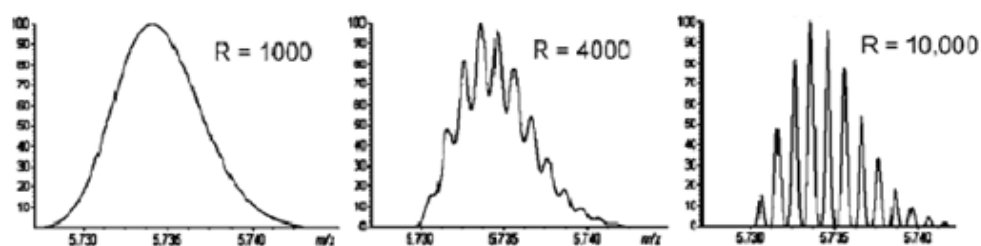


Figure 3. The effect of resolution on the shape of the spectra.

It can be seen from the figure that the greater the resolution R , the more accurately the registration of the analyte takes place.

Sensitivity is characterized by the minimum amount of the analyzed material at which the readings of the mass spectrometer exceed the noise level by no less than two times.

Accuracy is the ability of the analyzer to provide accurate information about z/m . Accuracy is highly dependent on instrument stability and resolution.

The scan speed indicates the time at which the analyzer scans a specific mass range. Most devices need a few seconds to complete a scan, but this time can vary greatly depending on the analyzer. Time-of-flight analyzers, for example, perform an analysis in a millisecond or less.

2. Time-of-flight mass spectrometer for analyzing z/m plasma ions

The operation of this type of analyzer is based on the simplest principle: the spectrometer has an ion source into which the material is placed, where the latter is subsequently ionized, using soft or hard methods. Next, the ions are pushed into the analyzing diode (acceleration area). After that, the diode is supplied with a pulse of analyzing voltage, which has a rectangular shape, that is, it has a constant energy over time and informs all ions that have different mass to charge ratios (z/m) the same energy. After applying the voltage, the ions under the potential difference emerge into the no-field (there are no electric and magnetic fields) drift spaces, where the ions are divided into groups in accordance with their z / m value. The first to reach the collector (detector) are the lightest ions, followed by the heavier ones. Ions, getting to the collector, create a pulsed current in its circuit, the amplitude of which is proportional to the number of ions in the packets of each group and presented as a spectrum on an oscillograph. The narrower the peak of ions of similar mass, the higher the accuracy of mass measurement.

The physical principle of operation of the time-of-flight mass analyzer is that the potential difference U accelerates the ions in the ion source to speed v according to the equation:

$$q \cdot U = \frac{m \cdot V^2}{2},$$

where m is the mass; q is the ion charge; V is the speed; U is the potential difference.

From $V_i \cong \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m_i}}$. The ion velocity is determined by the ratio m/q .

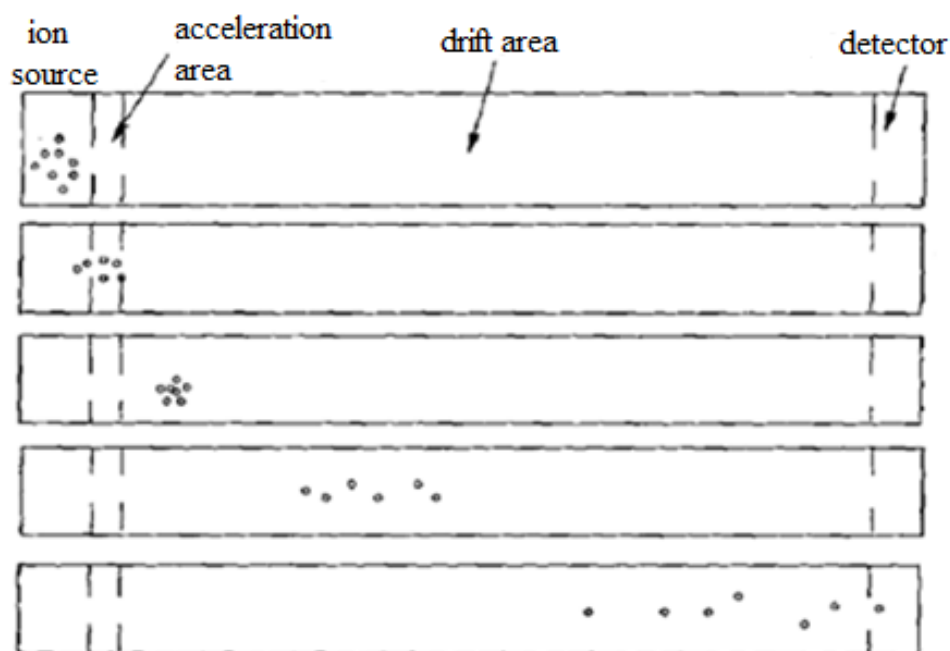


Figure 2.1. Scheme of the time-of-flight mass analyzer

In the case of time-of-flight mass spectrometers, resolution is the separation of two conglomerates of close mass obtained by detecting two pulse widths, or, in other words, is defined as the ratio of the total time of flight to two peak widths in time units.

$$R = \frac{m}{\Delta m} = \frac{T}{2t'}$$

where m is the mass of the ion; Δm is the mass difference between the two allowed masses (peaks in the spectrum); T is the total time of flight; t' is the duration.

The time-of-flight mass spectrometer in comparison with devices of other principles of action has:

Advantages:

- does not require absolute calibration;
- theoretically unlimited bound of registered masses;
- has small overall dimensions;
- high speed scan spectrum;
- very convenient for the selection of ions from the plasma;

Disadvantages:

- most suitable for pulsed ionization methods, working with continuous ionization methods requires the use of more complex circuits;
- a very high vacuum must be maintained inside the analyzer;
- low resolution.

The problem of low resolution comes from the fact that ions with the same mass can have different speeds or different positions in the drift tube space, ions leaving the source are not on the same line, but occupy a specific volume. This leads to the fact that some ions are late, others - on the contrary, escape, as a result of which the detected signal is blurred and resolution is lost.

Resolution can be improved in several ways:

1. ***Reduction of the pulse duration on the sensor.*** For this purpose, devices with space-time focusing are used, which reduce the variation in thermal velocities of ions with the same z / m (the work of the ion mirror will be described in Chapter 2.1.);

2. ***an increase in the time of flight of ions due to an increase in the path of flight,*** but this method is no longer relevant, since modern time-of-flight mass spectrometers have an instrument length of 1 m. Instruments that have a length of 1 m use ionic mirrors (electrostatic mirror) which considerably simplify the device in terms of dimensions (the work of the ion mirror will be described in sub-chapter 2.1.);

2.1. History reference

2.1.1. Space-time focusing

Space-time focusing, or delayed extraction, was proposed by Willy and McLaren in 1955. The source acceleration region was modified from one stage to two stages.

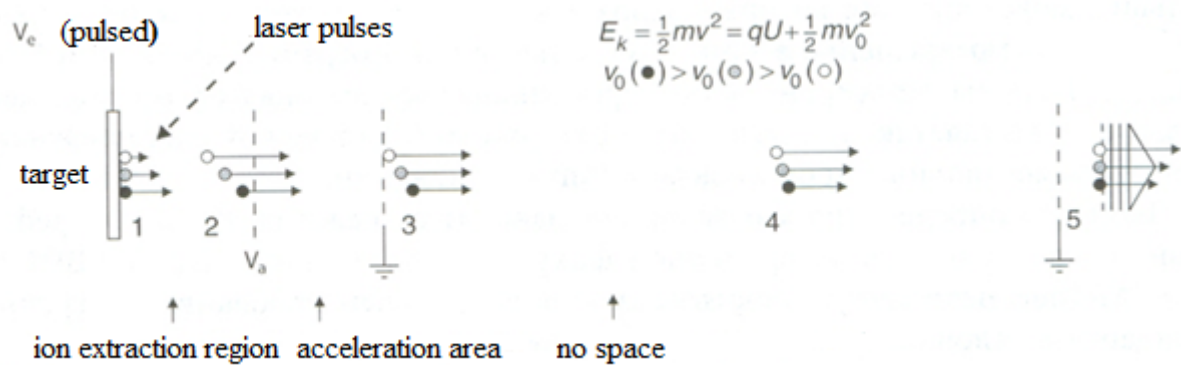


Figure 2.2. The principle of space-time focusing.

The principle of space-time focusing. When ions are desorbed with a laser pulse, the target potential is equal to the potential of the first grid. Consequently, ions (1) are not affected by zero, but move with initial velocities v_0 . After a short time τ (~ several hundred nanoseconds), the target potential increases and the ions are suddenly exposed to an electric field force (2). Slow ions (with a small v_0) are closer to the target, and therefore, at a point with a greater potential than ions with a greater velocity v_0 that are farther from the target. Consequently, slow ions will acquire greater kinetic energy and speed when they enter the field with no floor (3). As they move in no-field space, ions with the same m/z approach each other (4) and, at correctly chosen voltages and delay times τ , reach the detector almost simultaneously (5). With a precisely selected time of switching on the field and voltage at the source, the spread of ions with the same z/m over the time of flight will be minimal. That is, the best resolution will be obtained. Space-time focusing can provide:

- Compensation scatter initial speeds;
- minimize the influence of the space scatter of ions;
- not a decrease, but an increase in resolution and sensitivity of the de-

vice

2.1.2. Ionic mirrors (reflectron)

The reflectron was invented by B.A. Mamyrin and his colleagues in 1973. In the reflectron, the formed ions do not fly directly to the detector, but are reflected by a higher voltage compared to the accelerating.

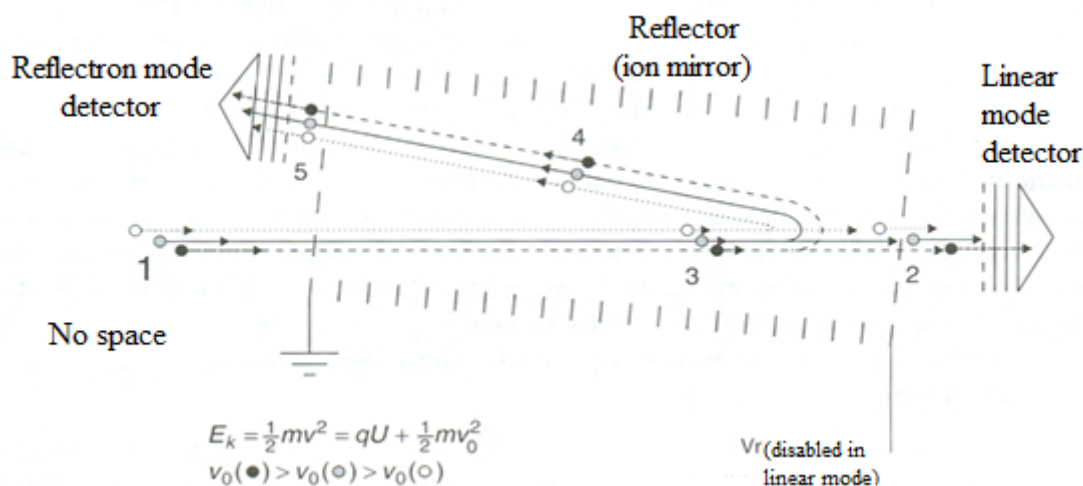


Figure 2.3. Scheme of time-of-flight mass spectrometer with a reflectron.

The principle of operation of a single-stage ion mirror. Desorbed ions have different axial velocities v_0 . Consequently, at some instant of time, ions with the same z/m occupy a different position in space (1). Without an ionic mirror, this difference will increase, leading to a broadening of the peak at the moment when the ion reaches the linear mode detector (2). The electric field of the detector slows down the ions (3) and causes them to turn back (in a non-axial design the mirror is slightly tilted, so the angle of rotation is not 180° , but rather 178°). Faster ions (with a higher velocity v_0) penetrate into the mirror deeper than slow ions (with a small velocity v_0). After the reversal, the ions pick up speed again, and when the mirror is correctly tuned, ions with the same z/m arrive at the detector of the reflectron mode (ion mirror mode) with a time spread much less than if they are registered in the linear mode.