

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
<b>Сильноточный индукционный плазменный источник для обработки поверхностей материалов и изделий</b>

УДК 621.793.74.048.7:621.365.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Вересов Александр Евгеньевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий Лабораторией №1	Ремнев 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. Венберга	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, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	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
P2	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
P3	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
P4	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
P5	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
P6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и	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
	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	Вересову Александру Евгеньевичу

Тема работы:

<b>Сильноточный индукционный плазменный источник для обработки поверхностей материалов и изделий</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	1. Плоская катушка (индуктор). 2. Измерительная аппаратура (осциллограф, пояс Роговского, коллимированный цилиндр Фарадея, миниатюрная ячейка Пеннинга). 3. Баллоны с газом (Н). 4. Насосы (форвакуумный, турбомолекулярный). 5. Источники питания.
---------------------------------	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- обзор литературы по теме ВКР;</li> <li>- описание и конструирование индукционного плазменного источника;</li> <li>- проведение измерений, расчетов и обсуждение результатов выполненной работы;</li> <li>- проведение анализа конкурентных технических решений, разработка организационной структуры проекта. Расчёт бюджета научно – технического исследования.</li> <li>- анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте.</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Принцип работы индуктора В-типа;</li> <li>2. плоская (дисковая) катушка;</li> <li>3. устройство индукционного плазменного источника;</li> <li>4. конструкция газового клапана и сопла Лавалю;</li> <li>5. геометрия сопла Лавалю;</li> <li>6. сечения сопла;</li> <li>7. отношение сечений по всей длине сопла;</li> <li>8. изменение скоростей потока в профиле сопла;</li> <li>9. изменение температуры газового потока;</li> <li>10. изменение давления газового потока;</li> <li>11. внешний вид используемого пояса Роговского;</li> <li>12. датчик для измерения импульсного плазменного потока на основе миниатюрной ячейки Пеннинга;</li> <li>13. схема цилиндра Фарадея;</li> <li>14. типичные осциллограммы давления с датчика Пеннинга, расположенного на расстоянии 19 мм от поверхности ударной катушки на среднем радиусе;</li> <li>15. характерная осциллограмма разрядного тока ударной катушки при напуске газа (водород) в область разряда и без напуска;</li> <li>16. осциллограммы импульсов давления водорода, воздуха в непосредственной близости индуктора и схема крепления датчиков;</li> <li>17. осциллограммы ионного тока.</li> </ol>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)</p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент ОСГН, к.ф.н., Меньшикова Е.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Доцент ООД, к.т.н., Винокурова Г.Ф.</p>
<p>Иностранный язык</p>	<p>Старший преподаватель ОИЯ, Демидова О.М.</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном</b></p>	

<b>языках:</b>
Разделы на английском языке: Плазменные сильноточные источники на основе индукционного разряда, источники плазмы на основе индукционного пробоя и импульсно напускаемого газа для генерации МИП

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

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Вересов Александр Евгеньевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ71	Вересову Александру Евгеньевичу

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. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	– Заработная плата (руководителя 38800 руб. в месяц, магистра 12663 руб. в месяц) – Бюджет затрат НИИ <b>263 680</b> руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию – 5.8 руб. за 1 кВт·ч
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	– Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 27.1 %.

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ	– Сравнение с другими схожими материалами
2. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет	– Иерархическая структура работ; – SWOT-анализ; – определение трудоемкости работ.
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	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. Диаграмма Исикавы
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	Вересов Александр Евгеньевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОДМ71	Вересову Александру Евгеньевичу

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

Тема ВКР:

<b>Сильноточный индукционный плазменный источник для обработки поверхностей материалов и изделий</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Разработка и сборка плазменного источника
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования;</li> <li>– ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения;</li> <li>– ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредные вещества;</li> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– повышенный уровень вибрации;</li> <li>– электромагнитные поля;</li> <li>– повышенное напряжение.</li> <li>– использование средств индивидуальной и коллективной защиты;</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– утилизация бытовых отходов.</li> </ul>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– поражение электрическим током;</li> <li>– пожар;</li> <li>– взрыв.</li> <li>– Наиболее типичной чрезвычайной ситуацией является поражение электрическим током.</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--



**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	Вересов Александр Евгеньевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 98 с. 24 рис., 25 табл., источников, 1 прил.

Ключевые слова: ионная очистка, ионная полировка, плазма, индукционный плазменный источник, индуктор, сопло Лавалья.

Цель работы - разработка и апробация индукционного плазменного источника для создания плазменных потоков различных газов для эффективной очистки материалов и изделий.

В процессе разработки проводился расчет необходимой геометрии системы напуска газа для индукционного плазменного источника.

В результате разработки было получено устройство для обработки поверхностей материалов и изделий потоком ионов с высокой плотностью и сверхзвуковой скоростью.

Степень внедрения: в настоящее время разработка находится на стадии доработки.

Область применения: ионная очистка поверхностей, полировка ионами поверхности, равномерная обработка поверхностей больших площадей.

Экономическая эффективность/значимость работы на данный момент не установлена, так как разработка находится в стадии доработки.

В будущем планируется заменить расходящееся сопло на сходящееся, экспериментальные исследования на обрабатываемых изделиях.

## Оглавление

Реферат	10
Введение	13
Глава 1. Литературный обзор	14
1.1    Воздействие плазмы на поверхность материала	14
1.2    Ионное распыление.	15
<b>1.2.1.    Характеристика распыленных частиц.</b>	17
<b>1.3.    Формирование рельефа при распылении.</b>	18
1.4.    Кинетика химических реакций.	18
1.5.    Плазма ВЧ разрядов, способы ее получения и применения	20
1.6.    Характеристика ПХТ	25
Глава 2. Экспериментальная часть	27
2.1. Постановка целей и задач.	27
2.2. Реализация индукционного источника плазмы с импульсным напуском газа	28
2.3. Расчет основных параметров системы напуска газа	33
2.4. Диагностика источника плазмы	38
2.4.1. Измерение токов поясом Роговского	38
2.4.2. Измерение плазменного потока миниатюрной ячейкой Пеннинга	39
2.4.3. Измерение значения ионного тока	40
2.5. Результаты измерений	40
Заключение	45
Глава 3.    Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	46
<b>3.1. Предпроектный анализ</b>	46
<b>3.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования</b>	46
<b>3.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</b>	47
3.3. SWOT-анализ	50
3.4.    Инициация проекта	52
3.4.1. Организационная структура проекта	53
3.4.2.    Ограничения и допущения проекта.	55
3.5.    План проекта	55
3.6.    Разработка графика проведения НИОКР	56
<b>3.7.    Бюджет научно-технического исследования (НТИ)</b>	58
<b>3.8.    Основная заработная плата исполнителей темы</b>	59
<b>3.9.    Отчисления во внебюджетные фонды</b>	61
<b>3.10.    Накладные расходы</b>	62
	11

<b>3.11. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта</b>	<b>63</b>
<b>3.12. Реестр рисков</b>	<b>64</b>
<b>3.13. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</b>	<b>64</b>
<b>Глава 4. Социальная ответственность</b>	<b>68</b>
Введение	68
4.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	68
4.1.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	69
4.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	71
4.2. Профессиональная социальная безопасность	73
4.2.1. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	75
4.2.2. Электробезопасность	77
Вывод по разделу	81
Список использованных источников	82
Приложение А	85

## Введение

Индукционный плазменный источник “В – типа” предназначен для равномерной очистки материалов и изделий от загрязнений пучком низкоэнергетических ионов. Данный источник основан на индукционном пробое напускаемого газа.

В данной работе был разработан индукционный плазменный источник для создания плазменных потоков различных газов для эффективной очистки материалов и изделий. При проектировании такого источника были учтены недостатки уже существующих источников: невысокая интенсивность плазменного потока, т.к. накладывается ограничение на дальнейшее ускорение (закон Чайлд – Ленгмюра) и недостаточная плотность плазмы, что вводит ограничение на скорость обработки.

В ходе работы описана разработка эффективной системы подачи газа для последующей ионизации. Параметры и геометрия такой системы просчитана через газодинамические функции.

Выполнены необходимая диагностика такого источника. Измерены значения плотности плазмы, плотности ионного тока, давления газового потока, разрядные токи катушки и клапана. Для измерения:

- токов был изготовлен пояс Роговского;
- плазменного потока использовалась ячейка Пеннинга;
- плотности плазмы использовался цилиндр Фарадея.

# Глава 1. Литературный обзор

## 1.1 Воздействие плазмы на поверхность материала

Первая глава посвящена рассмотрению явлений, происходящих при взаимодействии ионов с поверхностью материала. Описание данных процессов необходимо для того, чтобы выявить необходимые параметры плазменного источника.

Основные физические явления представлены на рисунке 1.1.

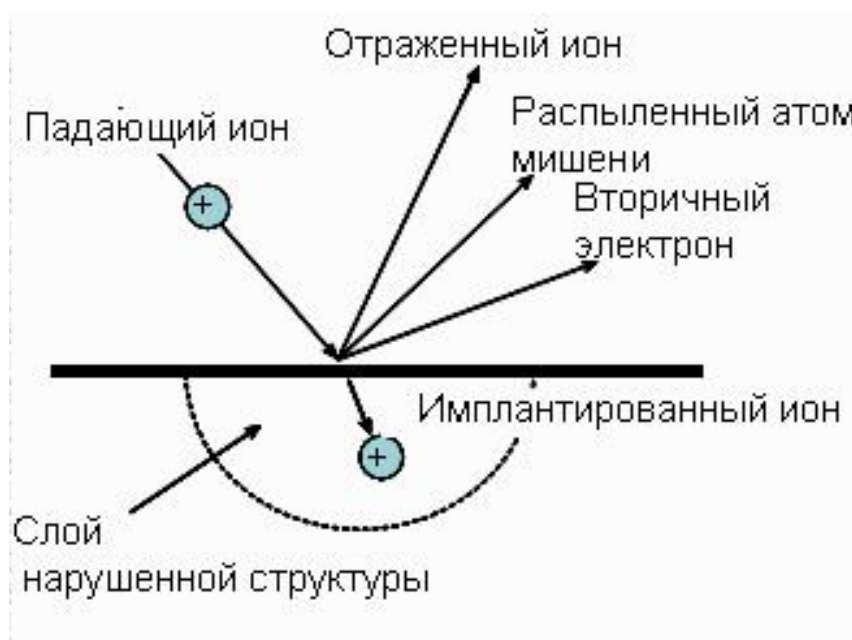


Рисунок 1.1. Физика взаимодействия иона с поверхностью.

В случае высоких энергий, ионы будут внедряться под поверхностный слой материала, частично отражаясь от него, при этом меняя свое зарядовое состояние. Налетающий ион вынуждает атомы материала смещаться и возбуждаться, изменяя структуру этого материала.

Важная роль в данной работе принадлежит процессу распыления - удаление с поверхности атомов материала, а также атомов загрязнения.

Основной механизм при обработке ионами – нагрев поверхности, на него уходит порядка 90% энергии ионов.

Распыление материала происходит при упругом взаимодействии иона с атомом поверхности, в результате которого энергия и импульс налетающего иона передается обратно на поверхность. Помимо этого, может произойти и ряд

других явлений: разогрев материала, смещение атомов, образование точечных дефектов.

Неупругие взаимодействия, в свою очередь, характеризуются возбуждением и ионизацией атомов молекул, а также возбуждением всей электронной подсистемы поверхности материала.

Наряду с физическим травлением вещества существует и химическое, суть процесса которого сводится к вступлению налетающего иона во взаимодействие с атомами поверхности.

В последующих главах очистка тлеющим разрядом рассматриваться не будет, поскольку давление газа для тлеющего разряда намного превышает допустимое фоновое давление во время распыления и является основным ограничением очистки тлеющего разряда.

## **1.2 Ионное распыление.**

Ионные пучки имеют ряд преимуществ перед тлеющими разрядами. Ионные пучки гораздо более избирательны благодаря тому, что высокоэнергетические ионы могут быть направлены на подложку, в конечном итоге удаляя загрязнения только с подложки и поверхностей, расположенных в непосредственной близости от нее. Также важна возможность изменения энергии ионов независимо от других параметров. Для удаления физически адсорбированных примесей, таких как водяной пар и углеводороды, из лабораторной атмосферы, используются низкоэнергетические ионы  $<100$  эВ, и такие энергии позволяют избежать повреждения или значительного распыления поверхности подложки.

Низкое фоновое давление является основным преимуществом очистки ионным пучком.

Перед нанесением покрытия поверхностный слой материала должен пройти этап предварительной обработки.

Ионное распыление - это процесс удаления частиц с поверхности материала под действием ионного пучка. Процесс ионного распыления классифицируют на три режима:

1. *Переходный режим*, характеризуется постоянным ростом распыления. С поверхности удаляются загрязнения, происходит изменение рельефа и структуры материала, меняется энергия связи атомов на поверхности.
2. *Установившийся режим*, является основным в процессе распыления. Оно характеризуется распылением материала и внедрение в него ионов с установившейся концентрацией.
3. *Завершение удаления пленки материала*. Скорость распыления значительно замедляется. Наблюдается влияние подложки на процесс распыления и его скорость. Происходит смешивание атомов пленки и подложки.

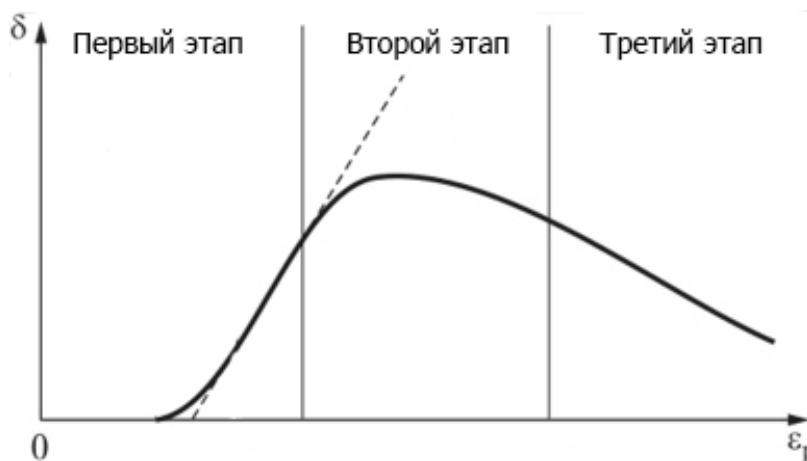


Рисунок 1.2. Три режима распыления поверхности материала.

Обязательное условие ионного распыления: энергия налетающего иона должна превышать некоторое пороговое значение  $E_{\text{пор}}$ . Эта энергия оценивается с помощью соотношения:

$$\frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2} E_{\text{пор}} \geq H \quad (1.1)$$

Процесс ионного распыления зависит от коэффициента распыления  $S$  и производной от него - скорости распыления  $V_p$ .

Коэффициент распыления определяется как количество распыленных атомов, приходящихся на один налетающий ион (атом/ион). Помимо прочего,



используется понятие скорости распыления, обозначающее толщину удаленного слоя материала в единицу времени. Связь скорости и коэффициента распыления:

$$S = \frac{eN_a\rho}{jM_2}V_p, \quad (1.2)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $\rho$  – плотность материала,  $j$  – плотность тока ионов,  $M_2$  – молярная масса атомов материала,  $N_a$  – число Авогадро.

Эффективность процесса распыления определяется:

- 1) зависимостью коэффициента распыления от характеристик налетающих ионов (атомного номера, массы, энергии, направленности движения ионов по отношению к обрабатываемому материалу), а также от характеристик обрабатываемого материала (атомного номера, массы, относительной плотности, энергии связи атомов);
- 2) плотности потока бомбардируемых ионов;
- 3) влиянием среды (давление и т.д.).

### **1.2.1. Характеристика распыленных частиц.**

Кинетическая энергия распыленных частиц значительно превышает энергию испаренных частиц. Распыленные частицы могут находиться в возбужденном состоянии, также им свойственно характерное пространственное распределение. Продукты распыления могут содержать атомные частицы, конгломераты атомов, сложные молекулярные соединения, а также ионы распыляемого материала.

Эффект ионного распыления определяется взаимодействием множества атомных частиц. Лишь малая доля энергии бомбардирующего иона уносится из обрабатываемого материала распыленными частицами.

### **1.3. Формирование рельефа при распылении.**

Под эффектом развития рельефа при ионной бомбардировке принято считать увеличение шероховатости или гладкости поверхности из-за непостоянства локального коэффициента распыления отдельных участков материала.

Развитие рельефа поверхности делят на два этапа: увеличение уже имеющихся неоднородностей расположения атомов на поверхности (при дозе ионов более  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> с преимущественным удалением слабо связанных атомов) и образование каверн при растравливании отдельных участков материала при больших дозах обработки. Усиленное распыление материала на склонах каверн приводит к их расширению и углублению на втором этапе эрозии поверхности [1].

Отличительной особенностью второго этапа является распыление не только атомов с поверхности, но и с нижележащих слоев материала.

При анализе литературных источников, был сделан вывод, что основными причинами шероховатости поверхности материалов при ионном распылении являются: начальное расположение атомов на поверхности, неоднородность распределения компонентов материала, различные дефекты, создаваемые ионной бомбардировкой и загрязнения на поверхности. Размеры образующихся конусов, борозд, сеток при распылении по высоте могут достигать 1 — 10 мкм [1].

Чтобы минимизировать процесс формирования развитого рельефа необходимо подбирать угол падения ионов на поверхность. Этим же методом можно добиться полировки поверхности.

### **1.4. Кинетика химических реакций.**

Продуктом взаимодействия атомов может стать химическая связь, в результате которой может образоваться устойчивая многоатомная система —

молекула, при условии уменьшения потенциальной энергии этих атомов. Этот процесс обусловлен обменом электронов между взаимодействующими атомами [1].

Энергия связи – энергия, необходимая для отрыва одного атома от многоатомной системы. К таким системам относятся: обрабатываемые материалы и многоатомные молекулы рабочего газа, а также продукты их разложения в электрическом разряде.

Относительная электроотрицательность – оттягивание атома на себя общей электронной пары. Этот параметр определяет прочность связи атомов. С помощью нее определяется вероятность протекания реакций присоединения, широко используемой в процессах ПХТ и ИХТ [1].

Условие протекания реакции (образование новой молекулы) сводится к разрыву и ослаблению связи между молекулами исходных веществ. Для этого процесса необходимы затраты энергии (энергия активации поверхности). Если же молекула получит энергию, превышающую энергию активации, то произойдет диссоциация молекулы.

В процессах ПХТ и ИХТ воздействие энергии на газ происходит посредством электрического разряда. Образуются валентные ненасыщенные частицы с высокой химической активностью. Образование ионов менее вероятно.

Одна из важных характеристик химической реакции – скорость ее протекания. Для процессов ПХТ главным фактором, от которого зависит скорость протекания реакции, является энергетическая активация поверхности.

ПХТ реакции связаны с переносом вещества. Ход такой реакции делят на несколько стадий:

1. доставка реагирующего вещества до поверхности травления;
2. химическая реакция на поверхности вещества;
3. отвод результата реакции от поверхности материала.

Для низких энергий активации ограничивающим условием скорости протекания реакции будет скорость переноса вещества (1 и 3 пункты). В случае,

когда энергия активации велика, этим фактором будет химическая реакция на поверхности (2).

Характерной особенностью плазменных и ионно-химических методов обработки поверхности является использование холодной плазмы, которая представляет собой неравновесную термодинамическую систему, обусловленную повышенной энергией частиц плазмы. Энергия частиц на порядок выше уровня, необходимого для эффективного протекания химических реакций, что, в свою очередь, обеспечивает одновременное протекание нескольких реакций одновременно в разных направлениях. Скорость химической реакции возбужденных частиц, ионов и радикалов с материалом, как правило, значительно превышает скорость образования этих частиц. Таким образом, суммарная скорость химических превращений в процессах ПХТ и ИХТ зависит от скоростей образования и расходования этих частиц, т. е. скоростей возбуждения, диссоциации и ионизации. Лимитирующей стадией гетерогенной реакции ПХТ и ИХТ является, в большинстве случаев, стадия переноса [1].

### **1.5. Плазма ВЧ разрядов, способы ее получения и применения**

Обязательное условие (при постоянном токе) для образования и поддержания тлеющего разряда – это нахождение двух металлических электродов в тесном контакте с зоной плазмы. Однако, такой вариант плазмохимического реактора не всегда удобен в использовании, так как на поверхности электродов возможно образование непроводящей пленки, что грозит постепенному затуханию разряда. Основным недостатком такой конструкции принято считать получение не чистой плазмы, то есть потока ионов, загрязненным материалами поверхности электрода.

Таким образом, с учетом вышесказанных недостатков, наиболее рациональным решением является использование систем без внутренних

электродов. Такие системы должны быть основаны на периодических разрядах, образованных переменным электрическим полем. Достаточно рассмотреть случаи:

*Низкие частоты внешнего поля* ( $10^2 - 10^3$  Гц). Данный случай похож на ситуацию с постоянным электрическим полем. Но стоит отметить, что в таком случае разряд будет успевать дважды гаснуть и зажигаться за период изменения поля [1]. Тогда очевидно, что от частоты зависит напряжение повторного зажигания разряда. Отсюда можно вывести следующую зависимость: с увеличением частоты все меньше электронов исчезает за время существования поля и тем ниже потенциал повторного зажигания.

*Средние (промежуточные) частоты внешнего поля.* С дальнейшим увеличением частоты, до тех пор, пока частота гибели зарядов  $\nu_d$  не станет соизмерима с частотой поля  $\omega$ , состояние разряда не успевает ‘контролировать’ изменение питающего напряжения.

*Высокие частоты внешнего поля.* Данный случай соответствует условию  $\nu_d \ll \omega$ . Состояние заряда и концентрация электронов за полупериод остаются неизменными.

Способы возбуждения ВЧ разрядов классифицируют по признаку поведения силовых линий электрического поля в плазме.

Случаю, когда силовые линии замыкаются, соответствует индукционный разряд (рисунок 2.1. б), осуществляемый подачей переменного тока на соленоид. Здесь силовые линии электрического поля имеют вид окружности, а направление магнитного поля совпадает с осью соленоида. Разряд такого вида называют разрядом В-типа.

К другому виду относятся разряды Е-типа, в которых используются электроды с переменным напряжением. Такие электроды, как правило, находятся в контакте с плазмой (рисунок 2.1. в), но бывают и изолированы от нее (рисунок 2.1. а). По принципу возбуждения такая система аналогична конденсатору.

В-тип отличается от Е-типа тем, что в В-типе разряд образуется за счет магнитного поля, в то время как в Е-типе возбуждение происходит за счет

электрического поля. Однако, в В-типе преобладает более высокая концентрация ионов.

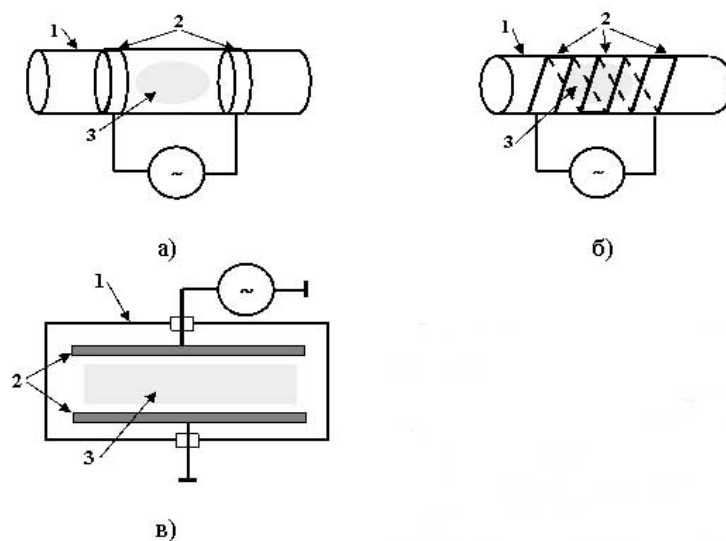


Рисунок 2.1. Конструкции реакторов для возбуждения ВЧ разряда.

#### *Достоинства ВЧ разряда:*

- ВЧ поле способно предавать энергию электронам, необходимую для поддержания разряда, в связи с чем отпадает роль катодной области для генерации электронов;
- низкое напряжение пробоя, возможность использовать электрически изолированные электроды;
- устойчивое поддержание разряда при низких давлениях, относительно разряда постоянного тока.

Отличительная особенность ВЧ разряда с внутренними электродами заключается в распределении электрических полей вблизи области электродов. На электроды подается отрицательный относительно плазмы потенциал.

Движение ионов осуществляется в ускоряющем поле, а электронов – в тормозящем.

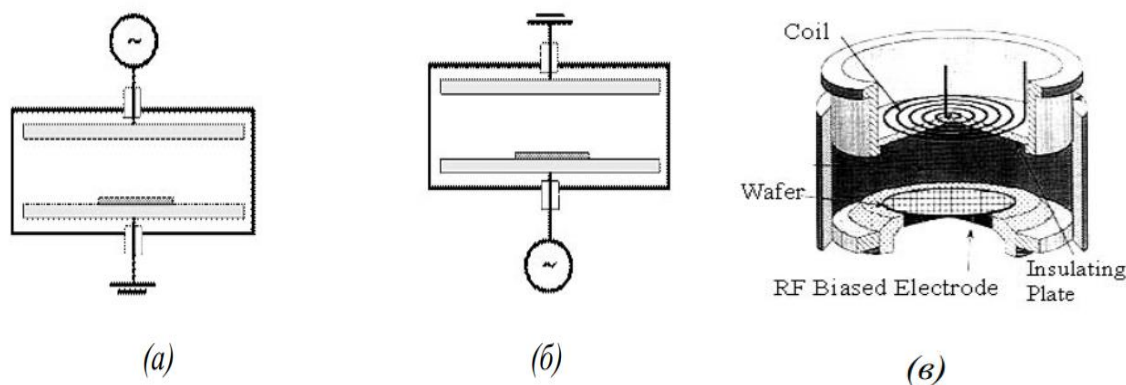


Рисунок 2.1.2. Схематическое изображение плазмохимических реакторов для получения плазмы ВЧ разряда: а, б – диодные реакторы с внутренними электродами и емкостным возбуждением разряда; в - безэлектродный реактор с индукционным возбуждением разряда.

Самым первым и простым вариантом был реактор диодного типа, конструктивной особенностью его было использование плоскопараллельных электродов внутри рабочей камеры. На рисунке 2.1.2. а) представлен реактор плазменного травления, где обрабатываемый материал фиксировался на заземленном электроде и находился под плавающим потенциалом относительно плазмы. Исходя из конструктивных особенностей данного варианта, можно сделать вывод, что процессами физического распыления материала можно пренебречь (энергия ионов 10-30 эВ).

В случае с реактором реактивного ионного травления (рисунок 2.1.2. б) материал располагался на электроде, напрямую подключенным к ВЧ генератору. Особенность такого генератора состоит в том, что травление материала происходит за счет химического и физического травления. Главными недостатком является процесс распыления материала электродов и невозможность регулировки энергии ионов и плотности потока. Эти недостатки являются критичными, так как для обеспечения высокой скорости травления необходима чистая плазма с четко заданным сортом ионов при высокой плотности их потока.

Следующим этапом было создание MERIE – magnetically enhanced reactive ion etching реактора, способного компенсировать

недостатки предыдущих реакторов. В таких реакторах используется постоянное магнитное поле, наложенное параллельно электроду, с целью коррекции движения электрона, вызывая его спиралеобразное движение. Такие системы способны выдать более высокие концентрации и плотности потоков заряженных частиц. У такой системы есть существенный недостаток – неравномерность обработки поверхностей больших площадей.

Безэлектродные источники плазмы лишены таких недостатков. Такая конструкция позволяет выявить следующие преимущества:

- низкий диапазон рабочих давлений (порядка 0.1- 10 Па);
- концентрация заряженных частиц  $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^3$ .

К таким источникам относится индукционный плазменный источник В-типа с плоским спиралеобразным индуктором (рисунок 2.1.2. в), который отделен от зоны разряда слоем диэлектрика. Индуктивно связанная плазма этих источников представляет собой тип газового разряда, возбуждаемого переменным магнитным полем с использованием индукционной катушки. Индукционный разряд зажигается и поддерживается циклически наведенными вихрями электрического тока свободных ионов (и электронов) в плазме.

В таких источниках ионизация газа происходит за счет вихревого электрического поля, образованного за счет токов, проходящих по катушке. Вихревое электрическое поле передает энергию электронам, происходит их “нагрев” и последующая ионизация газа.

Когда внешнее магнитное поле прикладывается к плазме индуктивного разряда, появляются области прозрачности, в которых радиочастотные поля проникают глубоко в плазму, а электроны нагреваются по всему ее объему. Этот эффект используется в плазменных источниках, принцип действия которых основан на электронном циклотронном резонансе.



## 1.6. Характеристика ПХТ

### *Скорость травления*

Характеризуется глубиной вытравленной области ко времени процесса травления. Концентрация химически активных частиц плазмы вблизи обрабатываемой поверхности напрямую влияет на скорость травления.

Скорость плазмохимического травления зависит от мощности электрического разряда, давления газа, температуры подложки и её площади. В процессах ионно-химического травления определяющим параметром считается энергия налетающих ионов.

В рассматриваемых процессах плазмохимического травления достаточно увеличить мощность, для того, чтобы повысить скорость процесса.

Также, похожего результата можно достичь, повышением давления. Однако, поведение при постоянном повышении давления будет следующим: на первом этапе скорость будет практически линейно возрастать, достигая своего максимального значения, после чего начнет спадать. Но, самым значимым условием будет увеличение скорости подачи газа до определенного значения. В таком случае скорость возрастает скачком до максимального значения, но позже рост начинает затухать, а после и вовсе начинается медленный спад.

Немаловажным механизмом повышения скорости при ионно- и плазменном травлении является температура, так как эти процессы вызваны химическими реакциями на поверхностях обрабатываемых материалов:

$$T/V = const, \quad (2.1)$$

где  $T$  – температура подложки,  $V$  – скорость травления.

Если пренебречь зависимостью 2.1., то станет невозможным воспроизвести процесс повторно с тем же результатом при прочих равных условиях.

При обработке больших площадей поверхность в ПХТ возможны случаи, когда скорость процесса снижается. Это происходит, когда скорость отбора частиц из плазмы превышает скорость их образования [3]. Вводится понятие

*эффекта загрузки* - чем больше площадь контактируемой с плазмой поверхности, тем меньше скорость травления.

## **Глава 2. Экспериментальная часть**

На основе выполненного литературного обзора можно заметить, что существующие источники хоть и бывают достаточно практичными и даже порой обладают нужными нам параметрами, но, зачастую имеют массу недостатков. К таким можно отнести контакт плазмы с поверхностью электродов, невозможность поддержания интенсивного пучка низких энергий, влияние пространственного заряда.

По этой причине было предложено использовать индукционный плазменный источник В – типа, но не стандартный, а модифицированный, речь о котором пойдет в данной главе.

### **2.1. Постановка целей и задач.**

Разработка данного индукционного источника тесно связана с доработкой и (или) улучшением параметров описанных выше плазменных источников.

Цель для экспериментальной части формулируется следующим образом: разработка и опробация индукционного плазменного источника для создания плазменных потоков различных газов с целью эффективной очистки материалов и изделий.

Дополнительное управление энергией ионов предполагается осуществлять на изделие заданных значений потенциала смещения.

Формируются следующие задачи работы:

1. написание литературного обзора;
2. разработка системы напуска газа;
3. разработка индуктора (низкоиндуктивной ударной катушки) для ионизации газа в вихревом электрическом поле;
4. диагностика газового и плазменного потоков.

Такой источник необходим для получения чистой плазмы с заданным сортом и энергиями ионов. Такая конструкция способна быстро ионизировать газ, создавая плазму с высокой плотностью. Данная задача включает в себя конструирование всех элементов источника: клапана, сопла Лаваля, ударной катушки.

Следующим шагом стало проектирование способов диагностики и методов замера основных параметров индукционного источника плазмы. Данный пункт включает в себя рассмотрение следующих средств диагностики: миниатюрная ячейка Пеннинга (газового потока), пояс Роговского (токов), коллимированный цилиндр Фарадея (КЦФ).

## **2.2. Реализация индукционного источника плазмы с импульсным напуском газа**

В основе разработки лежит индукционный разряд В-типа. Разгоняя плазму таким образом, можно получить потоки ионов низких энергий, но больших плотностей. Данные параметры позволят в последствии обрабатывать поверхности с большой площадью (за счет высоких плотностей потока) и минимизировать изменение рельефа поверхности. Плюс данной конструкции очевиден – чистота плазмы и отсутствие влияния пространственного заряда, так как плазма не контактирует с электродами и ускоряется посредством силы Ампера.

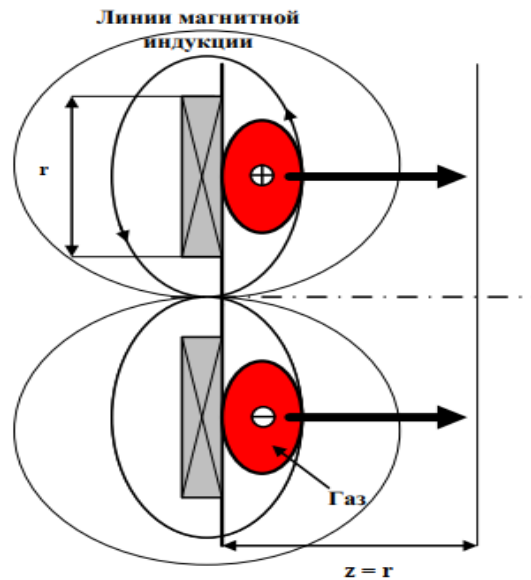


Рисунок 2.1. Принцип работы индуктора В-типа.

Имеется плоская (дисковая) ударная катушка, создающая магнитное поле (рис. 2.1. а). При напуске газа он скапливается у поверхности катушки и образует замкнутое непотенциальное  $E_{\phi}$  индуцированное поле. Ионизация газа происходит за счет вихревого электрического поля, образованного за счет токов, проходящих по катушке. Вихревое электрическое поле передает энергию электронам, происходит их “нагрев” и последующая ионизация газа.

На рисунке 2.2. приведен пример используемой катушки.



Рисунок 2.2. Плоская (дисковая) катушка.

После возникновения поля появляется  $\vec{j}\vec{B}$  — сила ампера, направленная по направлению стрелок на рисунке 2.1. В последствии чего эта сила, суммарно с магнитным полем за плазмой, выталкивает ионизированный газ вперед. По мере продвижения вперед, В-поле и сила Ампера ослабевают, с ростом Z. В связи с этим вводится понятие эффективного расстояния z, при котором значение ускорения будет максимально эффективным. Значение z принято считать равным расстоянию r.

В самой работе используется модификация данного метода, в которой поток плазмы фокусируется при помощи формы катушки

Устройство индукционного плазменного источника приведено на рисунке 2.3.

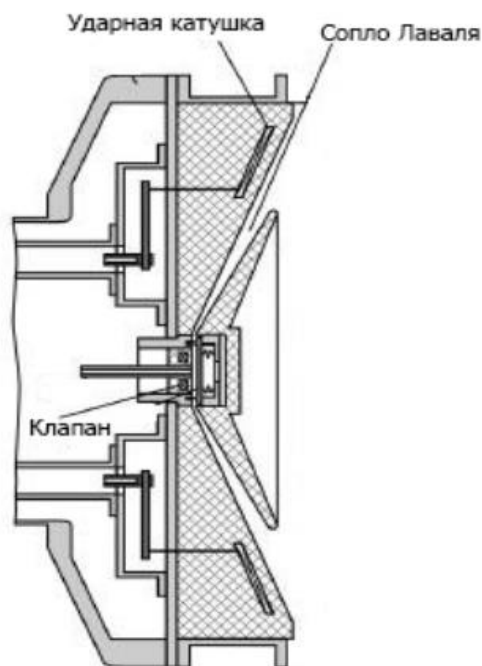


Рисунок 2.3. Устройство индукционного плазменного источника.

Плоская катушка (рисунок 2.2.) позволяет получать индуцированное электрическое поле, необходимое для ионизации газа. Обладает низкой индукцией, т.е. обеспечивает высокую скорость нарастания тока. Помимо этого, она должна обладать высокой азимутальной симметричностью, т.к.

определяет геометрию вихревого электрического поля и азимутальной плотности тока разряда. Диапазон рабочих давлений такой системы  $10^{-1} - 10^{-2}$  Тор. Намотка такой катушки выполнена в виде параллельных 6 витков и помещена в корпус из оргстекла.

Одним из основных узлов источника стоит считать импульсный клапан (рисунок 2.5. а) с соплом Лавалья (рисунок 2.5. б). Одно из требований к газовому клапану – обеспечение его быстродействия. Данная система способна образовывать высоколокализованный в продольном направлении сверхзвуковой газовый поток.

Чертежи данных элементов, с точным указанием размеров, приведены на рисунке 2.5.

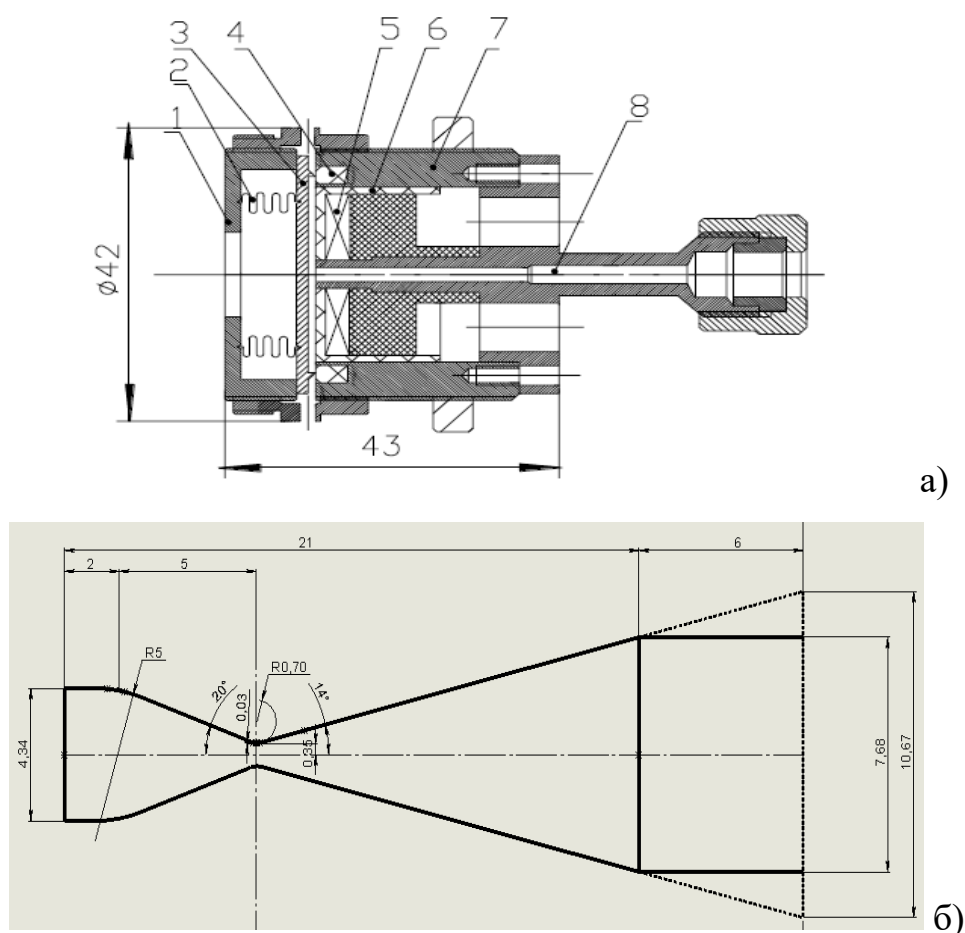


Рисунок 2.5. Конструкция газового клапана (а) и сопла Лавалья (б).

1 – корпус, 2- штуцер, 3- вывод катушки, 4 – втулка, 5 – шайба, 6- переход, 7- изолятор вывода катушки, 8 - катушка.

Материал корпуса клапана – тонкая и легкая дюраль. Число витков катушки – 12. При подаче импульса через катушку происходит отбрасывание чашки клапана от уплотнителя, происходит напуск газа. Необходимый объем газа ( $V_{\text{газа}} < 0,5-1 \text{ см}^3$ ) запасается под чашкой клапана и напускается в рабочую зону разряда при открытии клапана. Регулировка  $V_{\text{газа}}$  в этом случае возможна только за счет давления газа  $P_r$ . Обычно  $P_r$  равно атмосферному давлению. Снижение  $P_r < 1 \text{ атм}$  влияет на скорость газового потока, сформированного соплом Лавалья и, соответственно, на предельный размер газового слоя в рабочей зоне разряда. Локализация газового слоя вблизи ударной катушки является одним из основных требований к системе напуска газа.

При открытии клапана объем напущенного газа существенно превышает объем под чашкой клапана. Причина – поступление газа из газового подвода из-за медленного закрытия пластинок, которые обеспечиваются упругим элементом.

Срабатывание клапана происходит примерно за 15 мкс, при подаваемом токе в районе  $I_m \geq 6,5 \text{ кА}$  и длительности импульса  $T/2 = 55 \text{ мкс}$ .

Сопло Лавалья имеет конструкцию, где соответствующие размеры в радиальном направлении движения газа должны быть небольшими, а в продольном газ должен проходить с большей скоростью, чтобы сформировать газовое облако в рабочей зоне индуктора (ударной катушки). Сопло Лавалья изготовлено из поликарбоната.

Необходимо добиться уменьшения объема напускаемого газа в рабочую зону разряда, за счет уменьшения предельного размера газового слоя, при сохранении постоянства давления в радиальном направлении.

Принцип работы всей описанной системы в совокупности:

1. Происходит напуск газа под чашку клапана;
2. на катушку клапана подается импульс тока, происходит открытие клапана;
3. за счет формы сопла Лавалья образуется расширяющееся газовое облако, движущееся в сторону кольцевого окна;



4. на катушку подается два высоковольтных импульса, образуется индуцированное электрическое поле, которое ионизирует газовое облако;
5. происходит выталкивание плазмы, описанное на примере рисунка 2.1.

### 2.3. Расчет основных параметров системы напуска газа

Первым этапом, исходя из рекомендаций [15], были выбраны необходимые размеры сопла, исходя из рекомендованных значений.

Таблица 2.4. основные параметры сопла Лавая.

Параметр	Значение
<b>h<sub>кр</sub></b>	0,7 мм
<b>h<sub>вх</sub></b>	4,34 мм
<b>h<sub>вых</sub></b>	7,68 мм
<b>D<sub>кр</sub></b>	40 мм
<b>D<sub>вх</sub></b>	54 мм
<b>D<sub>вых</sub></b>	12 мм
<b><math>\alpha</math></b>	20
<b><math>\beta</math></b>	14
<b>R1</b>	5 мм
<b>R2</b>	0,7 мм

В соответствии с данными значениями выстраивается профиль сопла.

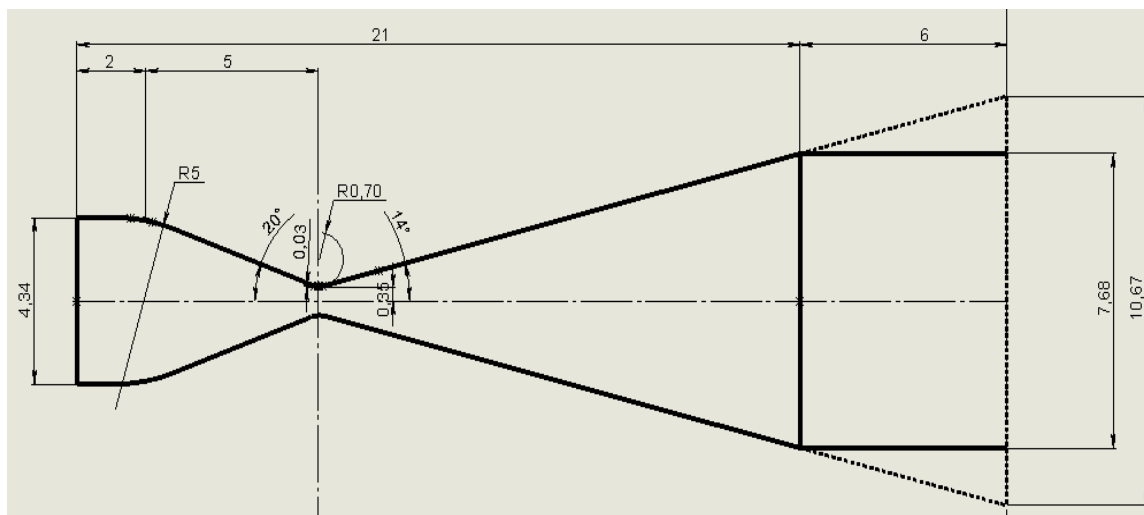


Рисунок 2.6. Геометрия профиля сопла.

Далее, по газодинамическому расчету необходимо определить основные параметра данного сопла, такие как скорость звука и т.д.

Таблица 2.3.1. Газодинамический расчет.

<b>Скорость звука при полной остановке газа</b>	$a_0 = \sqrt{kRT_0} = 327,63 \text{ м/с}$
<b>Скорость звука в критическом сечении</b>	$a_{кр} = a_0 \sqrt{\frac{2}{k+1}} = 298,46 \text{ м/с}$
<b>Максимальная скорость газового потока</b>	$W_{\max} = a_0 \sqrt{\frac{2}{k-1}} = 723,61 \text{ м/с}$
<b>Отношения скорости звука к скорости течения газа в критическом сечении</b>	$\lambda_{кр} = \frac{W_{кр}}{a_{кр}} = 1$

- показатель адиабаты  $k=1,4$ ;
- начальные (входные) значения  $T_0=293\text{K}$  и  $P_0=10^5 \text{ Па}$ .

Для оценки температур (1) и давлений (2) используются следующие соотношения [15]:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau}{\tau_0} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \quad (1)$$

$$\pi(\lambda) = \frac{P}{P_0} = \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

$$q(\lambda) = \frac{F_{кр}}{F} = \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (3)$$

Само сопло же было разделено на 24 сечения для газодинамического расчета.

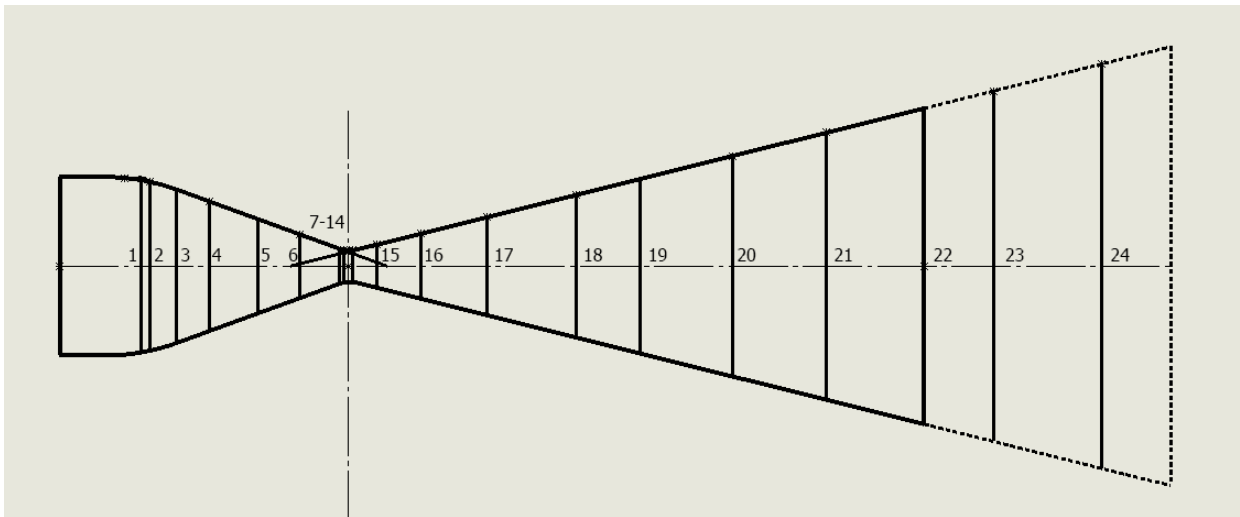


Рисунок 2.7. Сечения сопла.

Однако, для удобства оценки, было найдено отношение критического сечения к каждому, из рассчитанных 1388 сечений. Все сечения были проанализированы по формуле (3), впоследствии чего был построен график зависимости отношения сечений по всей длине сопла.

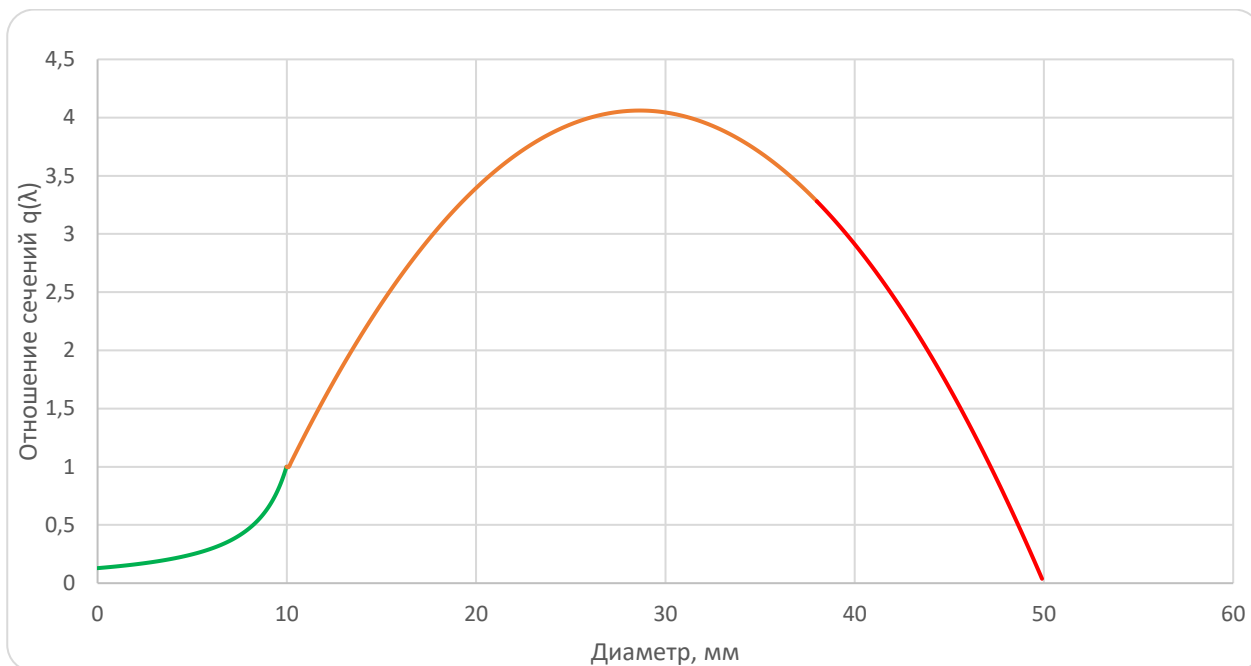


Рисунок 2.8. Отношения сечений по всей длине сопла.

После нахождения зависимости  $q(\lambda)$  необходимо найти обратную зависимость  $\lambda(q)$ , с целью нахождения для каждого значения  $q$  соответствующего значения  $\lambda$ . Поэтому, с помощью пакета WolframMathematica была получена обратная зависимость и найдены соответствующие значения  $\lambda$ . Стоит отметить, что каждому значению  $q$  соответствует два значения  $\lambda$ . Выборку стоит делать исходя из положения сечения в профиле сопла, а именно, необходимо учитывать, в какой части находится анализируемое сечение: в дозвуковой или послезвуковой.

После, воспользовавшись полученными значениями отношений, было найдено отношение скоростей в каждом сечении:

$$\lambda_{кр} = \frac{W_{кр}}{V_m}, \quad (4)$$

где  $V_m$  – скорость потока в рассматриваемом сечении.

Далее были найдены значения температур (1) и давлений (2). Полученные значения представлены в виде графиков:

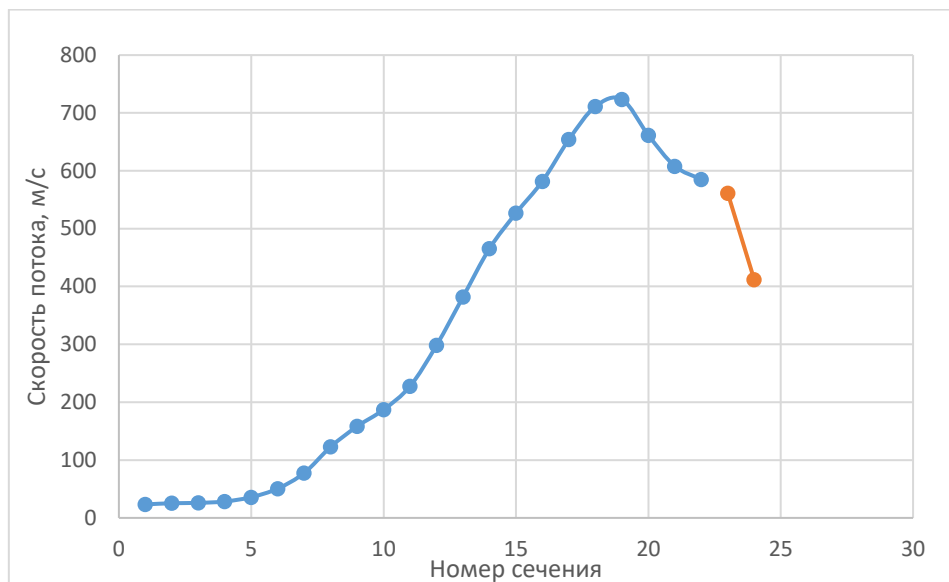


Рисунок 2.9. Изменение скоростей потока в профиле сопла.

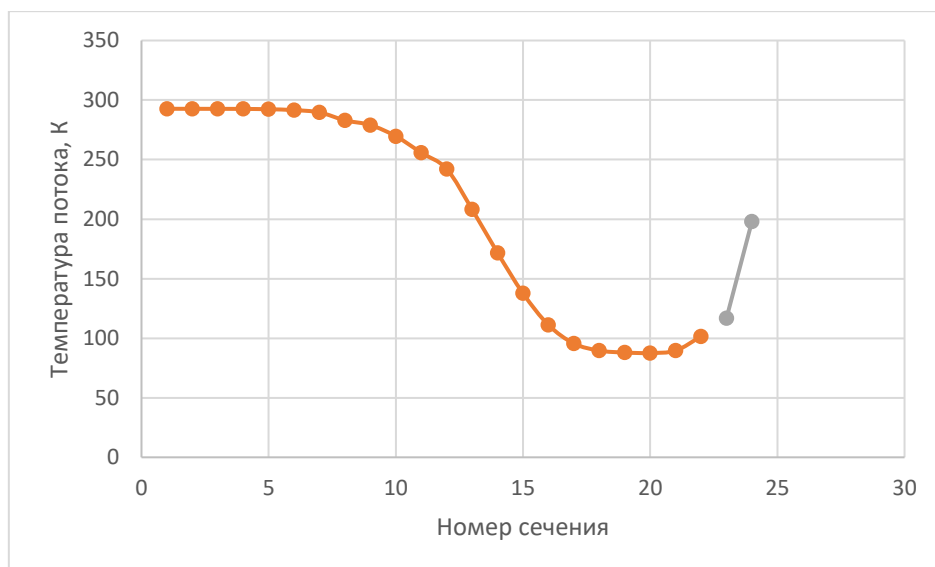


Рисунок 2.10. Изменение температуры газового потока.

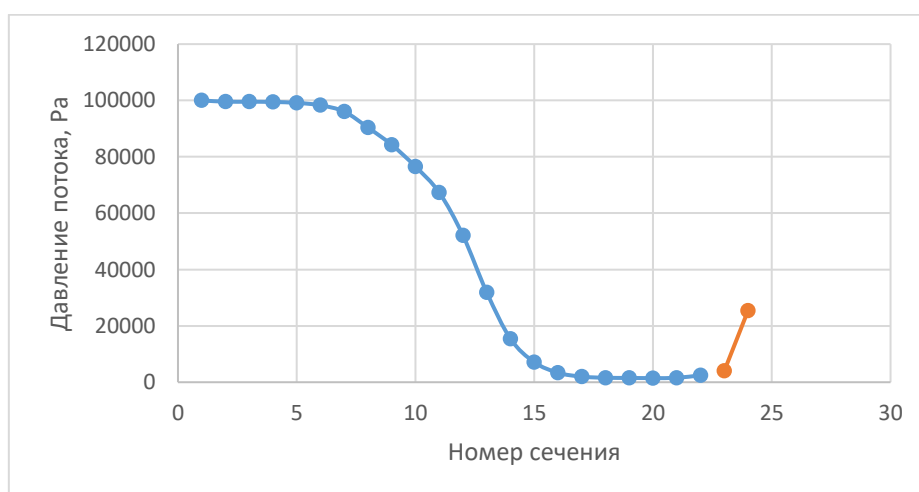


Рисунок 2.11. Изменение давления газового потока.

Критическому сечению соответствует 12 рассматриваемое сечение.

Исходя из представленных значений, делается вывод, что на выходе из сопла формируется сверхзвуковой поток с высокой плотностью. Данное условие являлось необходимым при создании такого источника.

## **2.4. Диагностика источника плазмы**

1. Для измерения токов изготавливался пояс Роговского;
2. Для измерения плазменного потока предлагается использовать ячейку Пеннинга;
3. Для измерения плотности плазмы был выбран цилиндр Фарадея.

### **2.4.1. Измерение токов поясом Роговского**

Для диагностики токов катушки клапана и разрядного тока применялся пояс Роговского, изготовленный собственноручно. Внешний вид и некоторые характеристики приведены ниже.

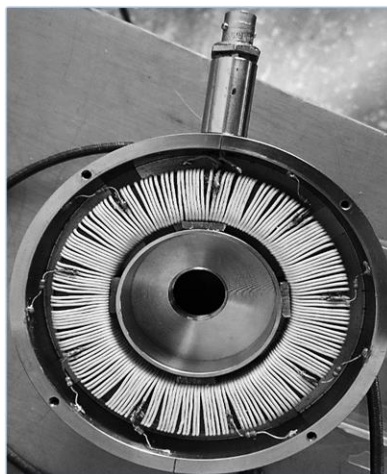


Рисунок 2.5.1. Внешний вид используемого пояса Роговского.

Обмотка пояса состоит из 200 витков, намотанных на ферритовый сердечник. Сам сердечник помещен в корпус из нержавеющей стали и зафиксирован с помощью изолятора. Для устранения искажений были припаяны демпфирующие сопротивления к виткам сердечника и корпусу.

#### 2.4.2. Измерение плазменного потока миниатюрной ячейкой Пеннинга

Для измерения плазменного потока была использована ячейка Пеннинга. Измерение проводилось посредством осциллирующих электронов.

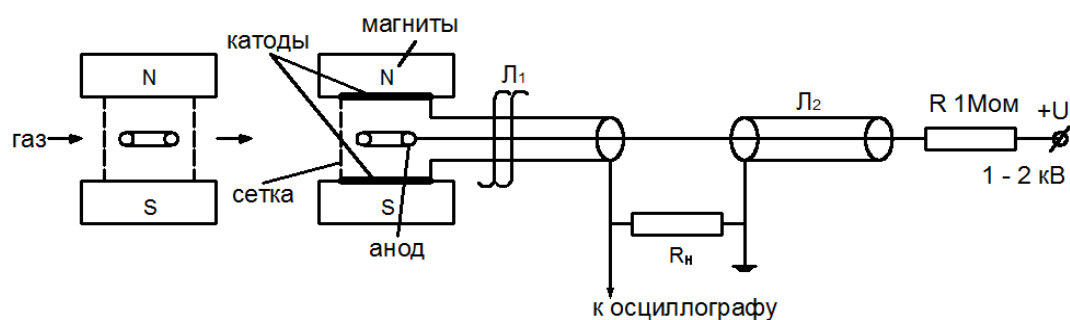


Рисунок 2.5.2. Датчик для измерения импульсного плазменного потока на основе миниатюрной ячейки Пеннинга.

- Диаметр анодного кольца 4мм;
- зазор между катодами 4мм;
- индукция магнитного поля 1,2 Тл.

Принцип работы сводится к следующему: газ напускается в зазор между катодами, в котором в результате отражательного движения электронов ионизуется. Ионы в таком случае начинают поступать на анодное кольцо, значения ионного тока с которого регистрируется на осциллографе. Далее,

каждому значению тока сопоставляется значения давления и строится осциллограмм

### 2.4.3. Измерение значения ионного тока

Для определения значения ионного тока использовался коллимированный цилиндр Фарадея (торцевой зонд).

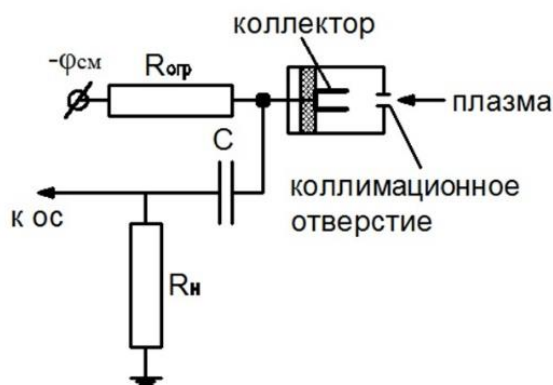


Рисунок 2.5.3. Схема цилиндра Фарадея.

Необходимо отсутствие плазмы в цилиндре, для точного измерения плотности плазмы.

### 2.5. Результаты измерений

Результаты измерения тока в катушке клапана и разрядный ток ударной катушки приведены на следующих осциллограммах:



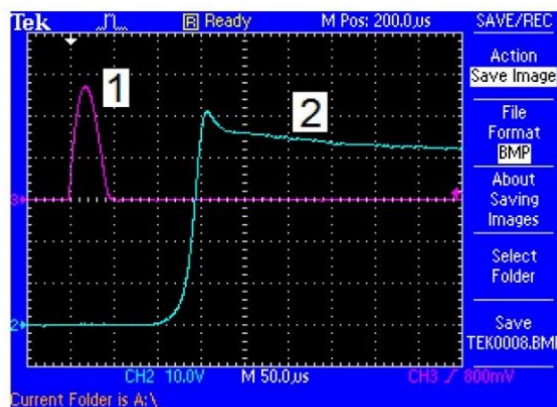
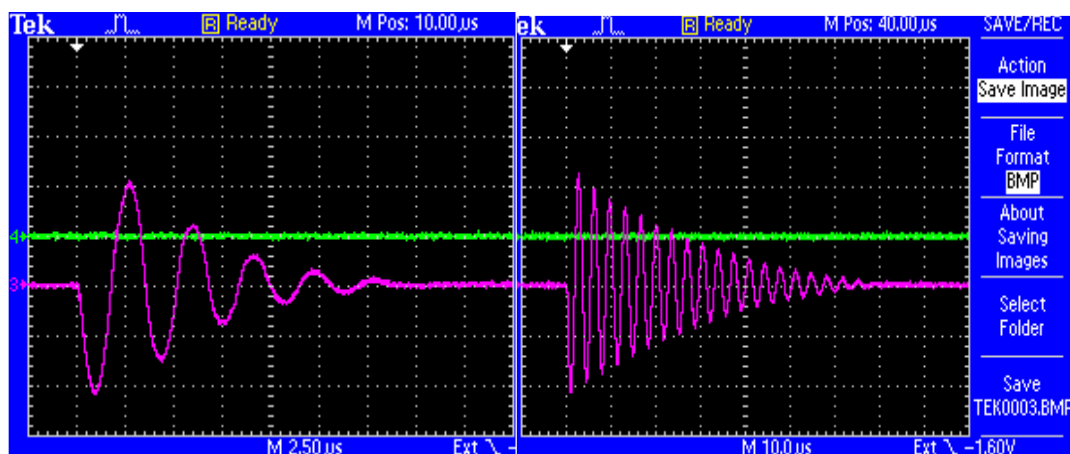


Рисунок 2.6. Типичные осциллограммы давления с датчика Пеннинга, расположенного на расстоянии 19 мм от поверхности ударной катушки на среднем радиусе, газ – H<sub>2</sub>, Укл = 1,4 кВ.

1 – осциллограмма разрядного тока импульсного газового клапана, 2 – осциллограмма давления.



а)

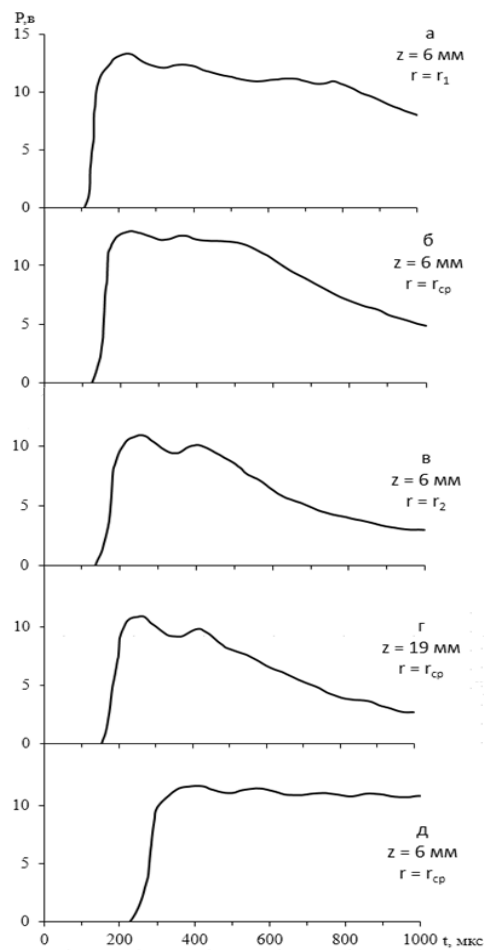
б)

Рисунок 2.6.1. Характерная осциллограмма разрядного тока ударной катушки при напуске газа (водород) в область разряда (а) и без напуска (б).

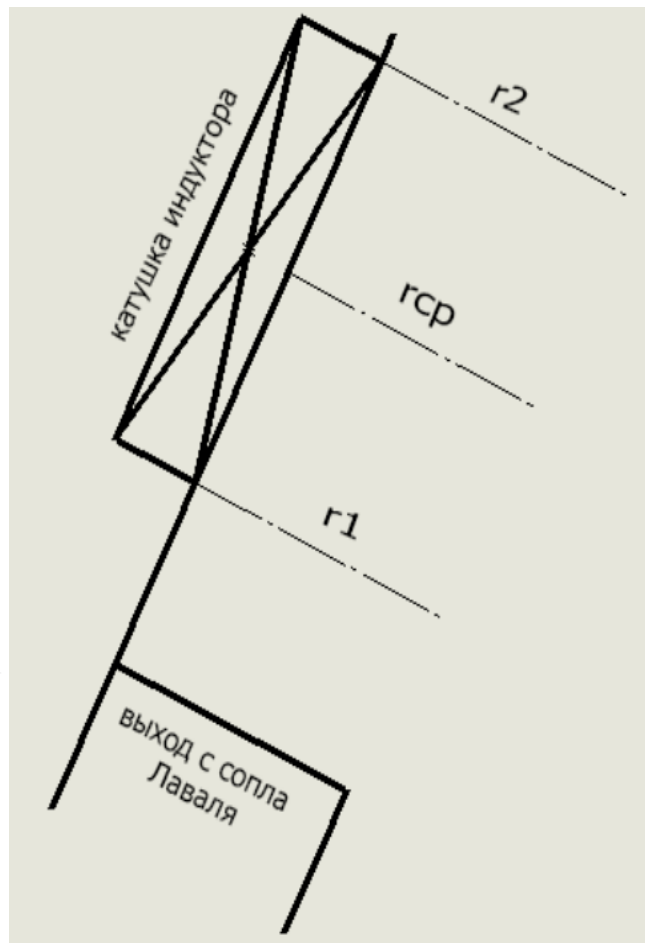
- Необходимо знать ток, который пропускается по катушке клапана, он измерен поясом Роговского;
- в случае без напуска газа, нагрузки на индуктор в цепи нет, соответственно нет вторичного витка в виде плазмы. Однако, с напуском газа происходит его пробой, в результате образуется дополнительное

сопротивление в виде витка плазмы и затухание синусоидального тока (энергия вкладывается в плазменный виток).

Вид осциллограмм для определения газового потока в рабочей зоне индуктора:



а)



б)

Рисунок 2.6.2. а) осциллограммы импульсов давления водорода (а-г), воздуха (д) в непосредственной близости индуктора; б) схема крепления датчиков.

Исходя из осциллограмм делается вывод о том, что:

- вдоль катушки индуктора сформирован равномерный локализованный газовый слой (форма импульсов практически идентична);
- газового потока изначально нет на дальних датчиках (видно по задержкам на осциллограммах, с отдалением датчики срабатывают с небольшой задержкой).

Так как необходимо знать не только характеристики газового потока, но и плазмы в целом, торцевые зонды были зафиксированы по той же схеме, но в отдалении 6 см от анода. Полученные осциллограммы имеют вид:

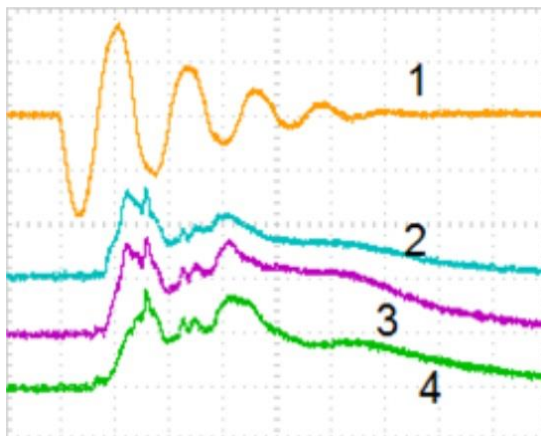


Рисунок 2.6.3. Осциллограммы ионного тока. 1 – ток катушки индуктора;

2,3,4 – осциллограммы ионного тока.

Осциллограммы примерно одинаковые по амплитуде. По задержке начала процесса определяется скорость потока. Начало процесса считается от начала импульса тока с ударной катушки.

Плотность ионного тока складывается из плотности ионного тока насыщения плотности ионного тока по формуле Бома:

$$j_{iн} = j_{iп} + j_{iБ}, \quad (5)$$

$$j_{iБ} \approx 0,4 \cdot e \cdot n \sqrt{\frac{2T_e}{m_p}}, \quad (6)$$

$$j_{iп} \approx e \cdot v_{п} \cdot n, \quad (7)$$

Для анализа скорости плазменного потока необходимо рассмотреть полученную осциллограмму ионного тока (рисунок 2.3.6). Из этих осциллограмм становится ясно, что  $t_{зад} = 2$  мкс.

Тогда:

$$v_{п} = \frac{L}{t_{зад}}, \quad (8)$$

Значение  $L$  характеризует расстояние от датчиков до зондов, но, так как невозможно точно оценить толщину плазмы, было взято значение 4 см. Обычное расстояние от датчиков до анода составляет 6 см.

В таблице 2.5. представлены параметры индукционного плазменного источника:

Таблица 2.5. – полученные параметры плазменного источника

№	$U_{\text{катушки}}$ , кВ	$I_{\text{катушки}}$ , кА	$I_{\text{цф}}$ , А	$T_{\text{задержки}}$ , мкс	$V_{\text{протонов}} \cdot 10^6$ , см/с	Плотность $n_i \cdot 10^{13}$ , см <sup>-3</sup>
1	16	12	0,24	1,9	5	2,2
2	18	13,5	0,26	1,6	6,2	2,5
3	22	16,5	0,29	1,2	8,4	3,6
4	24	18,1	0,31	0,9	10	4,1

## Заключение

В ходе данной диссертационной работы была исследована возможность создания индукционного плазменного источника и дальнейшая его реализация, включая расчеты. Основными критериями такого источника принято считать малое время ионизации и равномерное распределение плазмы по большим площадям обрабатываемых поверхностей.

Одной из основных задач диссертационной работы было создание эффективной системы напуска газа, что было достигнуто в результате проведенных термодинамических расчетов. Полученная система выдала на выходе достаточно плотный сверхзвуковой поток газа, что было представлено для наглядности в графиках.

Были измерены его основные параметры такие как:

- плотность плазмы  $n_i \geq 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;
- плотность ионного тока  $(30 \div 40) \text{ А/см}^2$ ;
- давление газового потока;
- разрядные токи катушки и газового клапана.

## **Глава 3. 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 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. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса. Таким образом была проведена оценка затрат, потенциала и академической привлекательности проводимого исследования.

### **3.1. Предпроектный анализ**

#### **3.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

Объектом исследования является индукционный источник плазмы с импульсным напуском газа.

Потенциальными потребителями данной разработки можно считать НИИ, оборонные комплексы и организации, чей задачей является получать покрытия и модификации поверхностей с хорошей адгезией (как пример: космическая промышленность и авиастроение, где необходимо получить прочные и легкие материалы).

Таблица 3.1 – Карта сегментирования рынка услуг

		Организации		
		Коммерческие организации	Исследовательские центры (ТПУ, РНФ)	Оборонные комплексы
Область применения	Получение чистой плазмы			
	Научно-исследовательская работа			
	Очистка поверхности			

Из карты сегментирования услуг видно, что целевым рынком данного исследования будут исследовательские центры.

К коммерческим и государственным организациям можно отнести все предприятия, которые так или иначе связаны с нанесением покрытий, т.к. для лучшей адгезии необходима очень хорошая очистка поверхностей изделий. Эти организации могут являться как прямыми потребителями, так и компаниями-перекупщиками.

### 3.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Кф – индукционный плазменный источник с импульсным напуском газа.

К1 – первый конкурент, это пассивные источники плазмы [4].

Пассивные источники плазмы, исследованные фактически на всех достигнутых уровнях мощности МИД. Они представляют собой мозаично-диэлектрическое покрытие анодной поверхности в виде отдельных элементов, канавок, заполненных диэлектриком, системы отверстий, игл в диэлектрике и т.д. Суть их сводится к возникновению поверхностных пробоев в местах неоднородностей электрического поля в результате накопления заряда электронного тока утечки, выбирания вторичных электронов и

стимулированной десорбции газов с поверхности анода с последующим их пробоем в электрическом поле. Время процесса формирования анодной плазмы и начало генерации МИП в целом занимает 5—10 нс.

К2 – второй конкурент, это лазерный источник плазмы [4].

Лазерные источники плазмы являются альтернативой УФ-подсветки поверхности анода. Подобный источник плазмы использован в нейтронном источнике, выполненном в виде коаксиального МИД с титановым анодом, насыщенным дейтерием большой концентрации. Образующееся под действием лазерного импульса плазменное облако с плотностью до  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  содержит как ионы дейтерия, так и ионы материала поглотителя. Лазерные источники плазмы, включая создание газового слоя либо контроль и подготовку состояния поверхности анода (ее нагрев и испарение), демонстрируют хорошую эффективность и большие возможности для получения чистых пучков легких ионов.

Таблица 3.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто-эффективность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Высокая скорость нарастания плазмы	0,2	5	1	3	1	0,2	0,6
2. Получение близкого значения к 100% ионизации	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
3. Высокая плотность плазмы около $100 \text{ см}^{-2}$	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
4. Однородность плазмы (на всей площади)	0,2	4	5	4	0,8	1	0,8
5. Согласование источника с геометрией диода	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Высокоточная дозировка газа при	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2



напуске							
7. Оптимизация работы источника в импульсно периодическом режим	0,1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
8. Однородный ионный пучок (все ионы одного сорта)	0,05	5	2	3	0,25	0,1	0,15
9. Создание задержки для образования плазмы и перемещения ее в сторону анода (что приведет к увеличению эффективности при отбирании ионов из плазмы)	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
10. Безэлектродный разряд	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>48</b>	<b>38</b>	<b>41</b>	<b>4,75</b>	<b>3,6</b>	<b>4,05</b>

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 3.1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Анализируя рынок конкурентов (таблица 4.2.), можно сделать вывод, что полученная установка может очень успешно конкурировать с популярными на сегодняшний день лазерными источниками плазмы. В самых весомых критериях (однородность плазмы, высокая скорость нарастания плазмы) наш источник проявил себя не хуже решений конкурентов, а порой даже лучше.

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

### 3.3. SWOT-анализ

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

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

Таблица 3.3. - SWOT - анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
	<p>С1. возможность получения низкоэнергетичных ионов высоких плотностей;</p> <p>С2. возможность работы схемы в нс диапазоне;</p> <p>С3. Возможность очистки любых поверхностей;</p>	<p>Сл1. Использование сопла Лаваля очень сложной формы;</p> <p>Сл2. трудности при подборе необходимых компонентов;</p> <p>Сл3. наличие паразитных ёмкостей и индуктивностей.</p> <p>Сл4. Сложные теоретические расчёты.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1. дальнейшая модернизация схемы, уменьшение размеров и увеличение быстродействия натекания газа;</p> <p>В2. необходимость использования индуктора в серьёзных научных исследованиях, с целью получения чистой плазмы (без сторонних примесей), что в дальнейшем упростит расчёты.</p>	<p>1. Развитие новых подходов для сверхбыстрой системы напуска газа;</p> <p>2. Использование как нового физического инструмента для получения чистой плазмы без сторонних примесей.</p>	<p>1. Возможность получения плотной плазмы;</p> <p>2. Разработка компьютерных программ для упрощения расчётов;</p> <p>3. Использование большого спектра напускаемых газов.</p>

В3. необходимость использования источника с различными измерительными и экспериментально-исследовательскими устройствами, которым требуется индуктор плазмы.		
<b>Угрозы:</b> У1. отсутствие коммерческого интереса к проекту; У2. выход из строя ударной (ионизирующей) катушки; У3. поломка чашки клапана.	1.Возможность повышения безопасности и внимательности при эксплуатации оборудования, а затем и при работе с большим количеством данных. 2. Анализ рынка потребителей.	1. Возникновение трудностей при расчёте большого количества данных. 2. Устранение слабых сторон этого проекта (сложность конструкции сопла), а также повышение технологического пакета данной разработки, помогут решить проблему с отсутствием коммерческого интереса к проекту.

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 общих 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.

Данный прибор и метод ионизации находятся на стадии разработки. Ведутся подготовки к получению экспериментальных значений параметров пучка на данном приборе. Анализ показал, что данное устройство, наряду с

преимуществами имеет ряд недостатков, которые будут устранены на стадии доработки проекта.

### 3.4. Инициация проекта

**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. 3.2.

Таблица 3.4–Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Томский политехнический Университет	Получения результатов исследования образования плазмы и отбора ионов при помощи индукционного плазменного источника
РНФ	

В таб. 3.5 необходимо представить информацию о иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 3.5 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	Создание индукционного плазменного источника для генерации ионов различных газов
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Получение плазмы с необходимыми параметрами для получения ионного пучка
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Собранная диодная секция с индукционным плазменным источником.</li> <li>- Источник питания для ИПИ</li> <li>- Диагностика и анализ всех параметров плазмы</li> </ul>
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	Высокая скорость нарастания плазмы
	Получение близкого значения к 100% ионизации
	Высокая плотность плазмы около $100\text{см}^2$
	Однородность плазмы (по всей площади анода)
	Согласование источника с геометрией диода
	Высокоточная дозировка газа при напуске
	Однородный ионный пучок (все ионы одного сорта)
	Создание задержки для образования плазмы и перемещения ее в сторону анода (что приведет к увеличению эффективности при отбирании ионов из плазмы)
	Оптимизация работы источника в импульсно периодическом режим
	Безэлектродный разряд

### 3.4.1. 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. Данная информация представлена в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Рабочая группа проекта

<b>№ п/п</b>	<b>ФИО, основное место работы, должность</b>	<b>Роль в проекте</b>	<b>Функции</b>	<b>Трудо- затраты, час.</b>
1	Ремнев Г.Е. заведующий кафедрой лаборатории №1 ИФВТ ТПУ	Руководитель проекта	Отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта.	42
2	Вересов А.Е. Магистрант, инженер лаборатории №1	Исполнитель по проекту	Выполнение отдельных работ по проекту.	558
<b>ИТОГО:</b>				<b>600</b>

В ходе реализации научного проекта, помимо магистранта, задействован ряд специалистов:

*Руководитель проекта* – отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта. В большинстве случаев эту роль выполняет руководитель магистерской диссертации.

*Исполнитель проекта* – специалист, выполняющий отдельные работы по проекту. В случае, если магистерская работа является законченным научным исследованием – исполнителем проекта является магистрант. В случае, если магистерская работа является частью научного проекта, исполнителей может быть несколько.

### 3.4.2. Ограничения и допущения проекта.

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

<b>Фактор</b>	<b>Ограничения/ допущения</b>
3.1. Бюджет проекта	<b>263 680 руб.</b>
3.1.1. Источник финансирования	<b>РНФ</b>
3.2. Сроки проекта:	<b>16.06.2019</b>
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	<b>01.02.2019</b>
3.2.2. Дата завершения проекта	<b>01.06.2019</b>

*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.

### 3.5. План проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – План проекта с этапами работ и распределением исполнителей по их видам

Номер работы	Название	Длительность, дни	Дата начало работ	Дата окончания работ	Должность исполнителя
1	Составление и утверждение технического задания	2	01.02.2019	02.02.2019	Руководитель
2	Изучение литературы и анализ существующих ИПИ	17	03.02.2019	21.02.2019	Магистр
3	Поиск инновационного решения, опираясь на поставленные задачи	5 6	22.02.2019	27.02.2019	Руководитель, Магистр
4	Изучение конструкторских чертежей ИПИ	4	28.02.2019	05.03.2019	Магистр
5	Создание чертежа модернизированного ИПИ с учетом инновационного решения	5	06.03.2019	11.03.2019	Магистр
6	Покупка комплектующих для создания ИПИ	5	12.03.2019	17.03.2019	Магистр
7	Сборка ИПИ в единое целое	18	18.03.2019	07.04.2019	Магистр
8	Диагностика и испытание ИПИ	8 20	08.04.2019	07.05.2019	Руководитель, Магистр
9	Анализ полученных результатов	6 18	08.05.2019	31.05.2019	Руководитель, Магистр
<b>Итоги</b>		95			

### 3.6. Разработка графика проведения НИОКР

Для удобства и наглядности была выбрана «Диаграмма Ганта».

Календарный план-график строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в таблице 3.9.



Таблица 3.9 – Диаграмма Ганта

Код работ ы	Вид работ	Исполнител и	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	Руководи- тель	2	■															
2	Изучение литературы и анализ существующих ПИ	Магистр	19	■	■	■	■												
3	Поиск инновационного решения, опираясь на поставленные задачи	Руководи- тель  Магистр	5 7				■												
4	Изучение конструкторских чертежей ИПИ	Магистр	7				■												
5	Создание чертежа модернизированно го ИПИ с учетом инновационного решения	Магистр	7					■											
6	Покупка комплектующих для создания ИПИ	Магистр	7						■										
7	Сборка ИПИ в единое целое	Руководи- тель Магистр	21							■	■	■	■	■	■				
8	Диагностика и испытание ИПИ	Руководи- тель Магистр	15 30												■	■	■	■	■
9	Анализ полученных результатов	Магистр Руководи- тель	147															■	■

■ - руководитель, ■ - магистр.

### **3.7. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)**

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в табл. (табл. 4.11).

Основные работы для ВКР проводились за персональным компьютером (ноутбуком) в пределах научного комплекса. Время, проведенное работой у компьютера, примем равным 558 часам. Мощность ноутбука: 0,09 кВт. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = \Pi_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 5,8 \cdot 0,09 \cdot 558 = 291,3 ,$$

где  $\Pi_{\text{эл}}$  – тариф на промышленную электроэнергию (5.8 руб. за 1 кВт·ч);  $P$  – мощность оборудования, кВт;  $F_{\text{об}}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 291,3 рублей.

#### **Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)**

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Таблица 3.10 – Сырье, материалы, комплектующие изделия, покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Круг нержавеющей стали	304L	4 шт.	1100	4400
Круг Плекса (оргстекло)	-	1 шт.	3500	3500
Клей компаунд	ПЭО610 0,3л.	2 шт.	800	1600
Конденсаторы	K75-92	5 шт.	300	1500
Диод	Д143-800-24	1 шт.	2000	2000
Резисторы 800 Ом	MF-0,25	10 шт.	5	50
Резисторы 3 Ом	MF-2	10 шт.	15	150
Дюраль	Д16АМ	6 шт.	200	1200
Всего за материалы				14400
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				660
<b>Итого по статье С<sub>м</sub></b>				<b>15060</b>

Таблица 3.11 – Цифровые продукты.

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
SolidWorks	Подписка на 3 месяца	1	63 000	63 000
Windows 10 Домашняя	-	1	12 857	12 857
TPUNet	Оплата за 1 месяц	3	350	1050
Microsoft Office	Подписка на 1 месяц	3	375	1125
<b>Итого</b>				<b>78 032</b>
<b>С учетом статьи С<sub>м</sub></b>				<b>93 092</b>

### 3.8. Основная заработная плата исполнителей темы

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

$$З_{\text{зп}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}, \quad (4.4)$$

где,  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата,  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.5)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – *основная* заработная плата одного работника,  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.,  $Z_{\text{дн}}$  – *среднедневная* заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (4.6)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года.; при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.12).

Таблица 3.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр
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:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.7)$$

где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

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

$k_d$  – 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 4.13.

Таблица 3.13 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З <sub>те</sub> , руб.	k <sub>пр</sub>	k <sub>д</sub>	k <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб.	З <sub>дн</sub> , руб.	T <sub>р</sub> , раб. дн.	З <sub>осн</sub> , руб.	З <sub>доп</sub> , руб.
Руководитель	49664	0,3	-	1,3	83932	3478	7	24344	2434
Магистр	12663	0	-	1,3	16 462	682	93	63 426	6343
<b>Итого З<sub>осн</sub></b>								<b>87770</b>	<b>8777</b>

\*Дополнительная з/п 10% от основной для руководителя и инженера.

$$З_{осн} + З_{доп} = 95\,547$$

### **Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями**

На эту статью относится стоимость контрагентных работ, т.е. работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями по заказу данной научно-технической организации, результаты которых используются в конкретном НТИ.

Стоимость работ опытного производства по договору с лабораторией №1 ТПУ ИФВТ составляет 250 рублей за час работы одного из работника.

Время, потраченное на изготовление всех деталей для ИПИ составляет 14 календарных дней, что в переводе на рабочие дни:

$$T_p = \frac{T_k}{k} = \frac{14}{1,48} = 9,46 \text{ раб.дн.}$$

Сумма, затраченная на изготовление деталей

$$\Sigma = 9,46 * 8 * 250 = 18920 \text{ руб.}$$

### **3.9. Отчисления во внебюджетные фонды**

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.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (4.11)$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным закона 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 2017 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в таблице 4.14.

Таблица 3.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Магистр
Основная заработная плата, руб.+дополнит.	26 778	69769
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	0,271
Сумма отчислений	7 257	18 908
<b>Итого</b>	26 165	

### 3.10. Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозинвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

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

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.12)$$

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

Накладные расходы составят:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (95\,547) = 28\,664 \text{ руб.}$$

### 3.11. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	93 092
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	87 770
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	8 777
4. Сумма, затраченная на изготовление деталей	18920
5. Отчисления во внебюджетные фонды	26 165
6. Прочие прямые затраты (электроэнергия)	291,3
7. Накладные расходы	28 664
<b>Бюджет затрат НТИ</b>	<b>263 679</b>

### 3.12. Реестр рисков

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 4.16.

Таблица 3.16 - Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность	Влияние	Уровень риска*	Способы смягчения риска
1	Неточность экспериментальных данных	Сложности при сравнении расчетных и реальных характеристик пучка	1	3	Низкий	Поиск данных с других источников плазмы и индукторов
2	Поломка ноутбука	Затруднение проведения вычислений	3	4	Выше среднего	Предоставление студенту рабочего места с компьютером и необходимым ПО

### 3.13. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

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 соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (14)$$

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

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (15)$$

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. 16).

Исп.1 – Диагностика пучка с помощью коллимированного цилиндра Фарадея;

Исп.2 – Диагностика пучка с помощью миниатюрной ячейки Пеннинга;

Таблица 3.17 - 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	3
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	16

$$I_{p-ucn1} = 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,30 + 4 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 = 4,4 \quad (16)$$

$$I_{p-ucn2} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,30 + 3 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 = 3,1 \quad (17)$$

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

$$I_{ucn.1} = \frac{I_{p-ucn1}}{I_{финр.1}}, \quad I_{ucn.2} = \frac{I_{p-ucn2}}{I_{финр.2}} \text{ и т.д.} \quad (18)$$

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 ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{ucn.1}}{I_{ucn.2}} \quad (19)$$

Таблица 4318 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.4	3.1
3	Интегральный показатель эффективности	4.4	3.1
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.42	0.7

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## **Глава4. Социальная ответственность**

### **Введение**

Данная работа посвящена разработке индукционного источника плазмы. Помимо этого, разрабатываются средства его диагностики. Индукционный источник плазмы предназначен для очистки и полировки поверхностей изделий и материалов.

Использование полученной установки планируется в лаборатории №1 НИТПУ (город Томск), для получения чистых поверхностей образцов с последующей модификацией поверхностей (нанесение покрытий, имплантация ионами) в пределах лаборатории, среди своего научного состава.

Необходимость данной разработки обусловлена получением пучков ионов низких энергий и высоких плотностей потока, что в свою очередь очень редко получается реализовывать без использования предлагаемой технологии.

Помимо разработки в задачи работы входила сборка объекта исследования. Из-за незначительных размеров сборка производилась непосредственно за рабочим местом.

### **4.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

1. ГОСТ 12.4.154-85 “ССБТ. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты”.
2. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
4. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

5. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.
6. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
7. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
8. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
9. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности.
10. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха.
11. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.
12. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.
13. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры
14. СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение".

#### **4.1.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства**

Все работники организации, в том числе ее руководитель, обязаны проходить обучение по охране труда и проверку знаний требований охраны труда в порядке, определенном Правительством Российской Федерации.

Для всех поступающих на работу лиц, а также для лиц, переводимых на другую работу, работодатель (или уполномоченное им лицо) обязан проводить инструктаж по охране труда, организовывать обучение безопасным методам и приемам выполнения работ и оказания первой помощи пострадавшим.

Для лиц, поступающих на работу с вредными или опасными условиями труда, на которой в соответствии с законодательством об охране труда

требуется профессиональный отбор, работодатель обеспечивает обучение безопасным методам и приемам выполнения работ со стажировкой на рабочем месте и сдачей экзаменов, а в процессе трудовой деятельности – проведение периодического обучения по охране труда и проверки знаний требований охраны труда [1].

Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда в организации возлагаются на работодателя.

Работодатель обязан обеспечить:

- безопасность работников при эксплуатации оборудования, осуществлении технологических процессов, а также применяемых в производстве сырья и материалов;
- применение средств индивидуальной и коллективной защиты работников;
- соответствующие требованиям охраны труда условия труда на рабочем месте;
- проведение за счет собственных средств обязательных предварительных (при поступлении на работу) и периодических (в течение трудовой деятельности) медицинских осмотров (обследований) работников, внеочередных медицинских осмотров (обследований) работников по их просьбам в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ними места работы (должности) и среднего заработка на время прохождения указанных медицинских осмотров;
- ознакомление работников с требованиями охраны труда [1].

Работник обязан:

- соблюдать требования охраны труда;
- правильно применять средства индивидуальной и коллективной защиты;
- проходить обязательные предварительные (при поступлении на работу) и периодические (в течение трудовой деятельности) медицинские осмотры (обследования) [1].

#### 4.1.2. 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.

При размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора), должно быть не менее 2 м, расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов – не менее 1,2 м.

Рабочие места с ПЭВМ в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом.

Рабочие места с ПЭВМ при выполнении творческой работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 – 2,0 м.

Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 5.

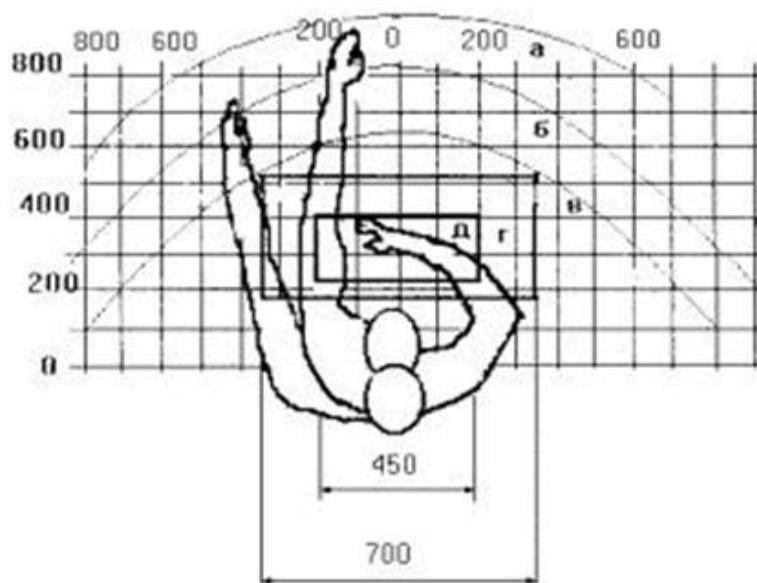


Рисунок 5 – Зоны досягаемости рук.

- 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.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура - в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) - литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола - литература, не используемая постоянно.

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.; рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же 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. При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

В случае со сборкой оборудования (клапан, индуктор, сопло Лаваля) следует освободить рабочее место от клавиатуры и производить сборку на образовавшемся пространстве.

## **4.2. Профессиональная социальная безопасность**

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 [1] при проектировании какой – либо установки за

компьютером (и ее расчетах) и ПЭВМ на сотрудников могут воздействовать опасные и вредные факторы, приведенные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Исследо вание	
1. Неблагоприятный микроклимат	+	+	+	<ul style="list-style-type: none"> <li>- СанПиН 2.2.2.542-96;</li> <li>- ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ.</li> <li>- Электробезопасность;</li> <li>- ГОСТ 12.1.029-80;</li> <li>- ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) ССБТ;</li> <li>- ПБ 10-115-96;</li> <li>- ГОСТ 12.2.085-82</li> </ul>
2. Превышение уровня шума	+	+	+	
3. Повышенное электромагнитное излучение	+	-	-	
4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	-	-	

На инженера, проектирующего какую – либо установку или собирающего ее (в частности индукционный плазменный источник) и ПЭВМ, воздействуют следующие факторы:

1. физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, освещённость;
2. психофизиологические: физические перегрузки (статические, динамические), нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Основные мероприятия для устранения вышеуказанных факторов представлены в последующих разделах.

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

Основные параметры, характеризующие условия труда при работе с ПЭВМ это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещенность.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [4] и приведены в табл. 5.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40-60	0,1

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. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20..25 °С, зимой –

13..15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери.

Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

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 внимание, 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. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [34] 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 при экранных фильтрах, 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 50мкбэр/час. По нормам [4] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05м от экрана не более  $7,7 \cdot 10^{-4}$  А/кг, что соответствует эквивалентной дозе, равной 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

#### **4.2.2 Электробезопасность**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электронными установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, указанных в табл. 5.3

Таблица 5.3 – значения напряжения и токов.

Род тока	$U$ , В	$I$ , мА
	не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0
<p align="center"><b>Примечания:</b></p> <p align="center">1 Напряжения прикосновения и токи приведены при продолжительности воздействий не более 10 мин в сутки и установлены, исходя из реакции ощущения.</p> <p align="center">2 Напряжения прикосновения и токи для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 25°C) и влажности (относительная влажность более 75%), должны быть уменьшены в три раза.</p>		

### 5.3 Экологическая безопасность

Необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика.

Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

### 5.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [6], 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. Так как помещение по

степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- 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:

- 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 101 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.

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

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов.

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

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.



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

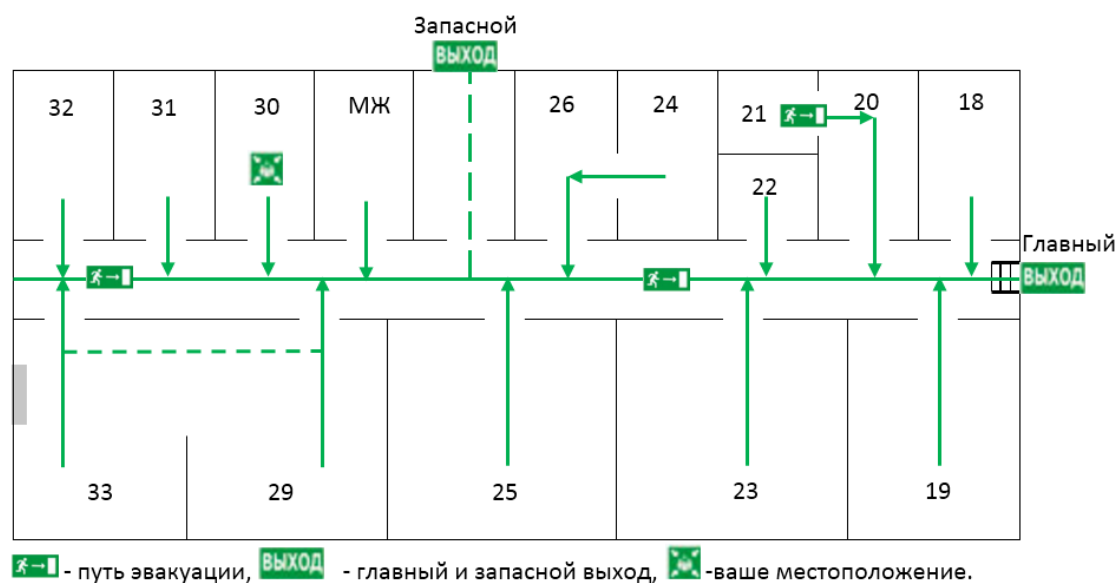


Рисунок 5.1 – план пожарной эвакуации из помещений лаборатории №1 ТПУ.

## Вывод по разделу

В данной главе были определены вредные и опасные факторы, формируемые при моделировании и сборке индукционного плазменного источника, среди которых можно выделить повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, повышенный уровень шума, пожаровзрывоопасность. Описаны методики снижения воздействия вредных факторов, а также регламент действий при возникновении чрезвычайных ситуаций, к которым могут привести опасные факторы.

## Список использованных источников

- 1) Быстрицкий В.М. мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152с.
- 2) Месяц Г.А. Генерация мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974
- 3) Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М.: Атомиздат, 1979.
- 4) Быстрицкий В.М., Месяц Г.А., Красик Я.Е. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1991. Том 22. Вып. 5. С. 1171-1198.
- 5) Википедия свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>
- 6) Кралькина Е.А. // Успехи физических наук. 2008. Том 178. № 5. С. 519-540.
- 7) Kurt A. Polzin // Journal of propulsion and power. Vol. 27, No. 3, May – June 2011.
- 8) Russell, Derrek; Dailey, C.; Goldstein, Wayne; Lovberg, Ralph; Poylio, James; Jackson, Bernard; Lovberg, Ralph H.; Dailey, C. Lee (September 2004). “The PIT Mark VI Pulsed Inductive Thruster”. Space 2004 Conference and Exhibit. San Diego.
- 9) TIMOTHY J. RENK, PAULA P. PROVENCIO, SOMURI V. PRASAD, ANATOLI S. SHLAPAKOVSKI, MEMBER, IEEE, ANATOLY V. PETROV. “Materials Modification Using Intense Ion Beams”. PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 7, JULY 2004.
- 10) J. B. Greenly, M. Ueda, G. D. Rondeau, and D. A. Hammer, “Magnetically insulated ion diode with a gas-breakdown plasma anode,” J. Appl. Phys., vol. 63, pp. 1872–1876, 1988.
- 11) Prehenzer A.L. //J. Apple. Phys. 1985. Vol. 58. P. 4509.
- 12) Mc Kay P. F., Gerber R. A., Prehenzer A.L.// IEEE Trans. on Plasma Sci. 1987. Vol. PS-15. N 4. P. 339.

- 13) Greenly J. B., Ueda M., Rondeau G. D., Hammer D. A. //J. Appl. Phys. 1988. Vol. 33. P. 1872.
- 14) Донец Д.Е., Донец Е. Д., Донец Е. Е. «Электронно-струйные источники многозарядных ионов с линейной и трубчатой геометрией струны». Прикладная физика. №3. 2010. С 34-41.
- 15) Teske C., Jacoby J., Schweizer W. «Thyristor stack for pulsed inductive plasma generation». Review of Scientific Instruments 80, 034702 (2009).
- 16) G. E. Remnev et al., “A high-current ion accelerator for short-pulse ion implantation,” Instrum. Exp. Tech., vol. 40, no. 5, pp. 727–731, 1997.
- 17) G. E. Remnev, A. N. Zakutaev, Yu. F. Ivanov, M. V. Matvienko, and A. V. Potemkin, “Deposition of thin metal films by intense ion beams on metals,” Tech. Phys. Lett., vol. 22, no. 4, pp. 336–337, 1996.
- 18) Ельчанинов А. С., Месяц Г. А.//Физика и техника мощных импульсных систем. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 179—188.
- 19) Кияшко В. А. Формирование и ускорение сильноточных ионных пучков в плазме индукционными электрическими полями: Автореф. дис. на соискание степени канд. физ.-мат. наук. Харьков, 1985.
- 20) Быстрицкий В. М., Волков С. Н., Красин Я. Е. и др.// Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 10. С. 1178-1183.
- 21) J. B. Greenly, M. Ueda, G. D. Rondeau, and D. A. Hammer, “Magnetically insulated ion diode with a gas-breakdown plasma anode,” J. Appl. Phys., vol. 63, pp. 1872–1876, 1988.
- 22) K. P. Lamppa, R. W. Stinnett, T. J. Renk, M. T. Crawford, and J. B. Greenly, “Active plasma source formation in the MAP diode,” in Proc. 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf., 1995, pp. 649–654.
- 23) Petrov et al., “Processes of material surface modification under combined treatment by pulsed ion beams of different power and plasma flows,” in Proc. 13th Int. Conf. High Power Particle Beams (BEAMS 2000), pp. 98–101.
- 24) Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181–ФЗ.

- 25) ГОСТ 12.0.003–74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 26) ГОСТ 12.0.002–80. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
- 27) СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно–эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
- 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) Пожаро– и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004–85 ССБТ Пожарная безопасность.

## Приложение А

### Раздел 1

Сильноточный индукционный плазменный источник для обработки поверхностей материалов и изделий

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ71	Вересов Александр Евгеньевич		

Консультант НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ:

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

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

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

Pulsed inductive plasma thrusters [7] are spacecraft propulsion devices in which energy is capacitively stored and then discharged through an inductive coil. While there are many pulsed inductive plasma accelerator concepts in existence [7] this review is limited to a discussion of planar pulsed inductive thrusters (PITs), where the inductive coil takes the shape of a flat spiral (as illustrated schematically in Fig. 1.3). The thruster is electrodeless, with the time-varying current in the coil interacting with a plasma covering the face of the coil to induce a plasma current. Propellant is accelerated and expelled at a high exhaust velocity ( $10\div 100$  km/s) by the Lorentz body force arising from the interaction of the magnetic field and the induced plasma current.

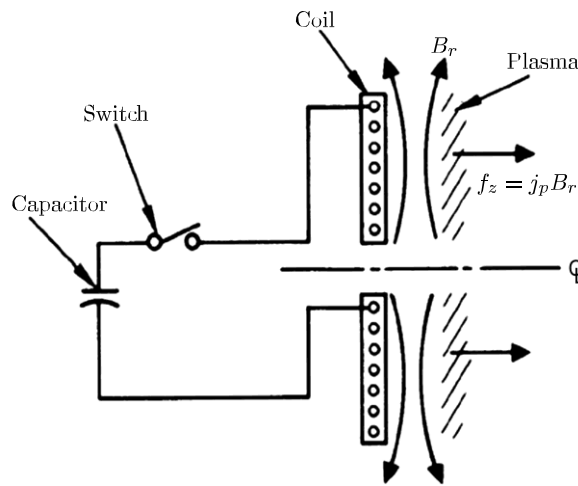


Figure 1.3 – Schematic showing the basic operation of a planar pulsed inductive plasma accelerator, where  $j_p$  is the azimuthal plasma current density [7].

Development of an efficient pulsed inductive plasma accelerator is a challenging proposition. Difficulties pertaining to ionization and acceleration that must be overcome for efficient inductive thruster operation:

First, any delay in breakdown of the gas after application of the primary field pulse results in energy being dissipated in the external circuit, which, unlike that of the direct electrode devices, is complete without the gas loop. This difficulty might be relieved by providing a separate preionization mechanism or by operation at a

sufficiently rapid repetition rate, but it is indicative of an inherent inefficiency in coupling of the external circuit to the plasma.

Equally troublesome is the need to accomplish all the energy input to the gas before much motion of it has occurred. The current induced in the gas loop “secondary” depends on its mutual inductance with the external primary, and thus is a strong function of the physical separation of these two current paths. As they separate under the acceleration, the coupling rapidly becomes weaker.

Devices of this type possess many demonstrated and potential benefits that make them worthy of continued investigation. The electrodeless nature of these thrusters eliminates the lifetime and contamination issues associated with electrode erosion in conventional electric thrusters. It is well known that pulsed accelerators can maintain constant specific impulse  $I_{sp}$  and thrust efficiency over a wide range of input power levels by adjusting the pulse rate to maintain a constant discharge energy per pulse [7].

#### *Pulsed Inductive Thruster.*

The PIT operates in the manner illustrated in Figs. 1.3 and 1.5, where the capacitor bank is charged to high voltage and propellant is injected over the face of the acceleration coil through a nozzle located on the thruster centerline. The capacitors are discharged through the acceleration coil using triggered spark gaps. Current flowing in the coil inductively ionizes the gas, forming a current sheet, and then electromagnetically couples with it to inductively accelerate the current sheet in the axial direction away from the face of the coil, generating thrust.

The earliest research focused on determining the plasma acceleration mechanism and quantifying the behavior of ions in the current sheet[7]. The approach allows not only for the determination of the plasma momentum in both the axial and azimuthal directions but also a temporal and spatial breakdown of the relative contributions of individual acceleration mechanisms to the total momentum.

Measurements of the current sheet were performed on a device possessing a 20-cm-diam coil comprising nine two-turn spirals connected in parallel to a 3:9  $\mu\text{F}$  capacitor bank. The discharge energy was nominally 285 J at a charge voltage of 12

kV. The stray inductance was  $\sim 60$  nH, while the coil inductance was  $\sim 460$  nH. Experiments were performed using an ambient argon fill at a pressure of 500 mtorr.

The results of the study are summarized as follows. The axial electric field alone was sufficient to accelerate the ions to the observed sheet speed. This field was due to a combination of the charge separation (polarization field) between the ions and the accelerating electrons that were carrying the current  $j_\theta$ , and the large negative electron pressure gradient at the leading edge of the sheet, which served to enhance the axial electric field. There was very little additional acceleration on the trailing side of the current sheet, where the  $j_\theta B_r$  force is mostly balanced by the positive electron pressure gradient and serves only to maintain the sheet's cohesiveness. The ions do not acquire momentum in the azimuthal direction and, consequently, do not carry current, because the force exerted on the ions by the induced, azimuthal electric field  $E_\theta$  was balanced by the resistive drag of the current carrying electrons.

Following a 30-cm-diam version accelerator [7] was fabricated and tested. This thruster had a capacitance of 6  $\mu$ F, with a discharge energy of 675 J per pulse at a nominal charge voltage of 15 kV. The acceleration coil consisted of 12 two-turn spirals, each connected in parallel to the capacitor bank, producing a coil inductance of roughly 680 nH. Performance was estimated using probes to measure the current density and magnetic field in the  $r$ - $z$  plane, with thrust calculated from the measurements by computing the  $j \times B$  body force and integrating throughout the volume.

Testing was performed using three different propellants ( $N_2$ , Ar, and Xe). Gas was introduced as either a static fill or through pulsed gas injection with a nominal injected mass bit of 1:8 mg per shot. The pulsed gas propellant distribution on the face of the inductive coil at this mass bit was measured using an ionization gauge and found to be nonuniform, which may have led to reduced performance. Propellant preionization methods employed a second capacitor charged to 15 kV and discharged just before the main capacitor bank using an independently triggered spark-gap switch.

In the late 1980s, two new thruster models, the PIT MK I and MK IV [7], were fabricated and tested. In addition to studying the effect of changing bank



capacitance on thruster performance, the standard resistive inductive capacitive (RLC) circuit was modified in the MK IV to permit the use of a diode clamps, which were used to minimize voltage reversal on the capacitor bank.

The PIT MK I thruster was roughly the electrical equivalent of the thruster described in Sec. II.B. It possessed a 1-m-diam coil comprising 36 one-turn spirals connected in parallel to a 20  $\mu\text{F}$  capacitor bank. The accelerator was also operated using a 10  $\mu\text{F}$  capacitor bank. The parasitic circuit inductance was "60–80 nH, while the coil had an inductance of 700 nH and an electromagnetic stroke length of 12 cm. Over the outer 6 cm radius, the pitch of the coils was decreased to double the current density in that region, compensating for the loss in magnetic pressure due to field fringing. Current was switched using a triggered spark gap.

The lessons learned in the 1980s gave rise in the early 1990s to the PIT MK V design [7]. Testing with the MK I and MK IV thrusters highlighted the importance of having a high initial current rise rate,  $dI=dt$ , in the coil to form an impermeable current sheet during the first half-cycle of the discharge that could efficiently entrain and accelerate propellant. The strategy to increase the rise rate in the MK V was to both minimize the parasitic inductance of the thruster and substantially increase the azimuthal voltage applied to the acceleration coil.

### *Theory of Operation*

The basic principal of PIT operation is best illustrated by the repulsion of two perfectly conducting inductively coupled rings shown in Fig. 1.4aA pulsed electromotive force ( $\epsilon$ ) is applied to the bottom ring and results in a current pulse and its associated magnetic field. The magnetic field induces a current in the second ring but induces no electromotive force in the second ring, since it is a perfect conductor. As a consequence, according to Faraday's law ( $\epsilon=-d\Phi/dt$ ), there can be no net passage of time-varying magnetic flux through the second ring. The current in the first ring induces a current in the second ring so that the resulting time-varying magnetic flux through the second ring is exactly zero. This is best illustrated in Fig. 1.4b, which shows the calculated magnetic flux lines of the system in Fig. 1.4a Note that for every line of flux looping through the second coil, there is another line

looping through in the opposite direction so that the net passage of flux is zero. Note also in Fig. 1.4b that this canceling of flux through the second coil results in significant flux compression between the coils. The Lorentz force associated with the current in both loops, and the high magnetic field between them, results in an electromagnetic repulsive force between the two rings. This electromagnetic repulsive force is the basis of PIT operation [8].

Applying the concept of fig. 1.4 to electromagnetic propulsion requires that the second ring should not be metallic but rather, a gaseous propellant. The efficient operation of the thruster requires the propellant to be compressed against, and uniformly distributed across the first ring. For this reason, the first ring in Fig. 1.4 is a flat, annular coil. The difficult problem of distributing propellant uniformly across a flat surface, compressed within a layer that is a small percentage of its diameter, is the reason why the coil is necessarily large, at least one meter in diameter [8].

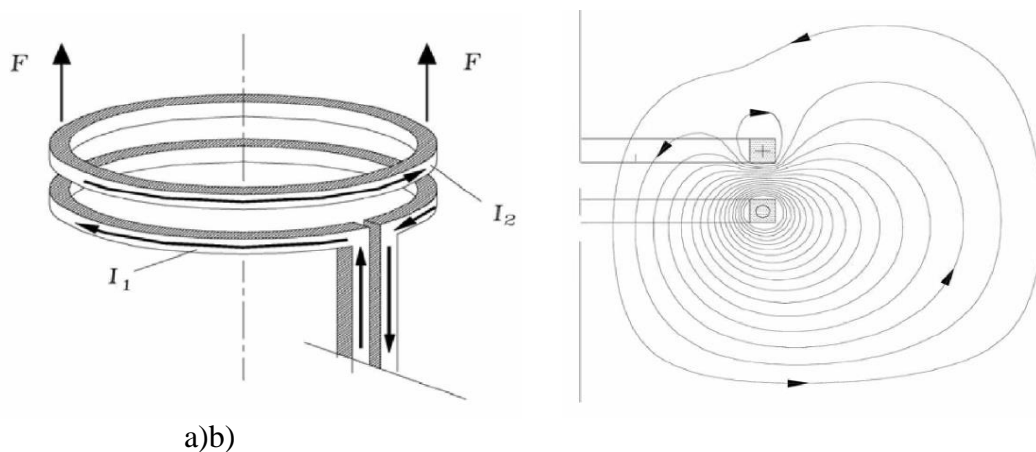


Figure 1.4– a) Electromagnetic repulsion of two conducting rings. b) Calculated magnetic flux lines of the system in Fig. a in cylindrical coordinates.

The “ideal” PIT operational sequence is shown in Fig 1.5 [8]. A small (typically 2 mg) mass of propellant is injected, with azimuthal symmetry, by a valve that opens and closes in less than one ms. The propellant is diverted and accelerated to supersonic velocity by a conical nozzle. At the coil surface, it is compressed into a ring and then expands across the coil face. At some critical time, the propellant is uniformly distributed across and compressed to within a few centimeters of the face of the coil [8]. At this moment the capacitor bank, charged to ~15 kV, is discharged

through the coil. The azimuthal current in the coil induces a radial magnetic field above the surface of the coil of roughly 5kGauss [8]. Once the propellant breaks down at the surface of the coil, a current sheet quickly moves through the propellant and entrains it as a whole. This is known as snowplowing. After the entire propellant puff is entrained into a plasma sheet, the magnetic pressure between the plasma and the coil accelerates the propellant as a slug to a velocity of 20 to 80 km/s ( $I_{sp} = 2000$  to 8000 s). Note the compression of the magnetic flux between the coil and the plasma ring in Fig. 1.5.

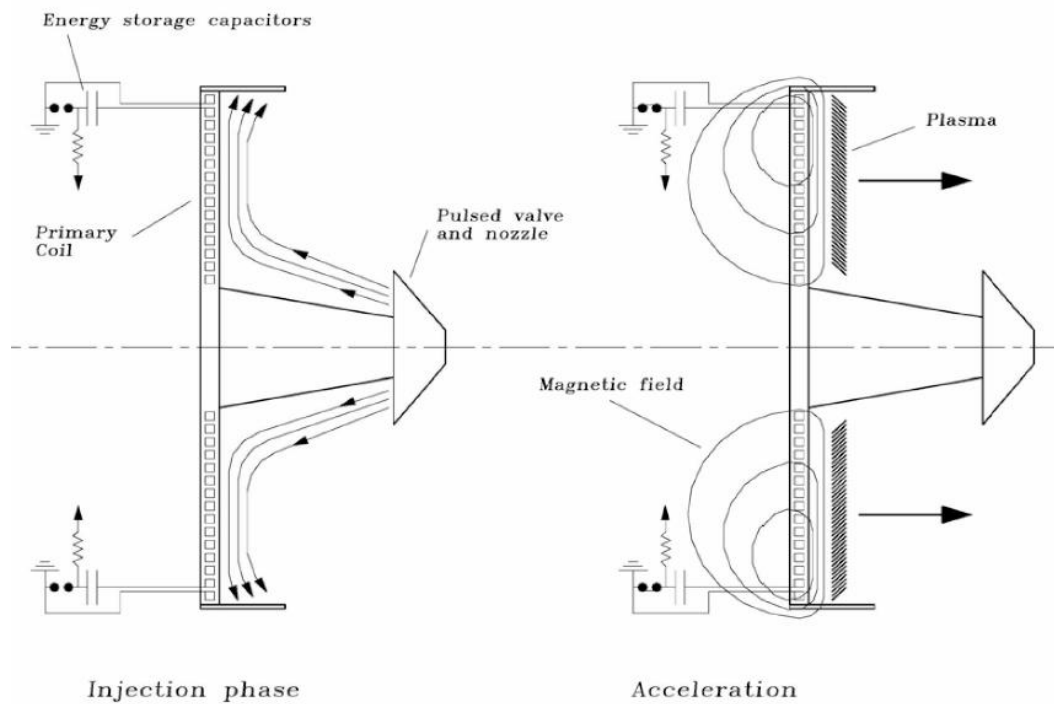


Figure 1.5– Operational sequence of the Pulsed Inductive Thruster

The “ideal” operational sequence, resulting in high energy-efficiency, is contingent upon certain conditions being satisfied. First, the entire propellant mass must be uniformly distributed across and immediately adjacent to the coil surface when the capacitor bank is discharged [8]. Non-uniform acceleration of the propellant sheet will lead to diminished  $I_{sp}$  and efficiency. Also, since the plasma becomes decoupled at about 7.5 cm from the surface of the coil, the thickness of the propellant sheet must be only several cm[8].

Another condition for efficient operation is the ionization time which ( $\tau_{ion}$ ) must be short in comparison to the transit time ( $\tau_{trans}$ ) of the propellant slug. The

transit time is the time required for the propellant slug to travel beyond the decoupling length ( $\sim 7.5$  cm) [8]. If the plasma is poorly ionized during the acceleration phase, it will be highly resistive and the energy of the shot will be dissipated as heat in the propellant rather than being converted into directional kinetic energy of the propellant slug.

Another consequence of poor ionization is that magnetic flux will leak through the plasma and will be unavailable to accelerate the propellant. The condition  $\tau_{\text{ion}} \ll \tau_{\text{trans}}$  tends to limit the  $I_{\text{sp}}$  of the PIT for a given capacitor bank voltage, since higher  $I_{\text{sp}}$  is associated with lower propellant mass, which is more difficult to ionize. In practice, the maximum  $I_{\text{sp}}$  is limited by the minimum propellant mass that can be well ionized.

Another condition for high energy-efficiency is the “impedance matching” condition. This states that the maximum thruster efficiency is achieved when the transit time of the propellant slug is “matched” with the LC ringing period ( $\tau_{\text{LC}}$ ) of the coil/bank circuit. The Mark V single shot tests showed that energy efficiency is maximized when the transit time of the propellant  $\tau_{\text{trans}} = 0.2\tau_{\text{LC}}$  [8]. The reason for this is as follows: Rapid breakdown and entrainment of the propellant results in the creation of a current sheet that “loads” the coil/bank circuit. The inductance of the loaded coil is much smaller than the inductance of the unloaded coil. The result is a much faster ( $\sim 4\times$ ) current rise time. The B field near the surface follows the coil current. The natural ringing period of the thruster is approximately  $15\ \mu\text{s}$  but the B field and coil current rise time are approximately one  $\mu\text{s}$ . Maximum propellant acceleration is achieved at maximum magnetic pressure, i.e., maximum plasma and coil current. If the propellant is expelled before the coil current is maximized, the capacitor bank energy will not have a chance to be converted into propellant kinetic energy and will be dissipated as heat in the unloaded coil [8]. On the other hand, if the propellant is not expelled from the coil until after the current reaches its maximum, it will be expelled when the magnetic pressure is less than its maximum value and more of the bank energy will be dissipated in the plasma as heat. In this case, the propellant has been lingering near the coil longer than necessary. The main

point here is that the coil and capacitor bank must be designed specifically for a desired  $I_{sp}$  or efficiency will suffer.

### *Hardware Design*

The condition of rapid breakdown ( $\tau_{LC} \ll \tau_{trans}$ ) requires that the coil must generate a very high azimuthal electric field  $E_\theta$ . The terminal voltage (V) required to generate the electric field is given by the relation  $V = 2\pi R N E_\theta$ . For  $R = 50$  cm, even a single turn coil can yield a terminal voltage that is difficult to manage in a vacuum environment. A better solution is a coil consisting of half turns, which yields half the terminal voltage of a single turn coil. This is known as a Marx generator and is shown in Fig. 1.6a. Each coil consists of two capacitors in series and two half turns. Each half turn is divided into two one-quarter turns, one traversing the front side of the coil plate, and the other one traversing the rear side. The capacitors are discharged simultaneously so that the effective  $e_{mf}$  ( $\epsilon$ ) is twice the individual capacitor terminal voltage. The layout of the PIT coil, shown in Fig. 1.6b, consists of nine pairs of these half turn coils arranged at  $20^\circ$  increments from one another around the circumference of the inductor plate [8]. Each coil in the actual thruster contains a pair of capacitors and each coil segment shown in Fig. 1.6b is broken up into four physical strands, running in parallel, to smooth out the magnetic field. Note also that each coil segment carries a radial current component but the complementary coil segment on the opposing side of the plate acts to cancel this current component. When the coil is arranged in this way, it generates an azimuthally uniform current density ( $J_\theta$ ) within the coil, and an azimuthal electric field ( $E_\theta$ ) on either side of the coil when the capacitor bank is discharged.

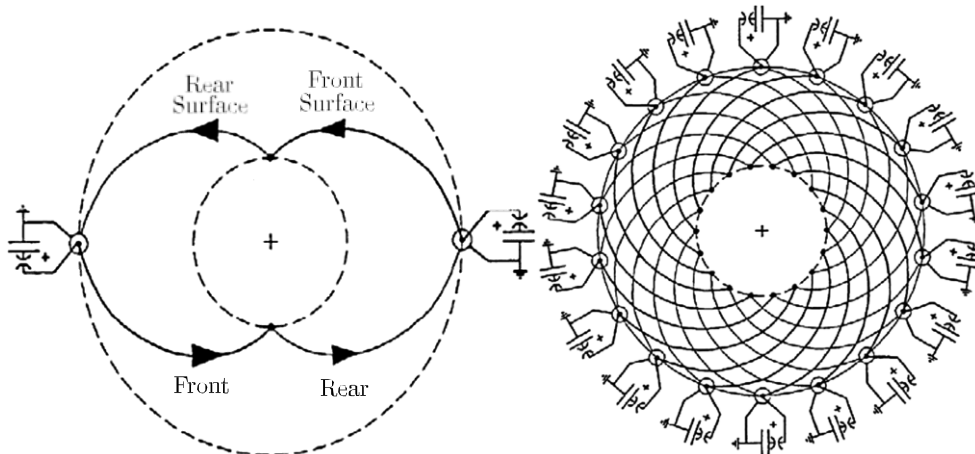


Figure 1.6– a) Layout of individual coil and capacitor bank. b) Layout of PIT coil and capacitor bank.

Mark V consists of a driver coil wrapped around a ceramic coil form that is bonded to a diaphragm that seats against an o-ring to seal the propellant from vacuum. A D.C. magnetic field is applied to the coil form and a valve driver delivers a current pulse through the coil to activate the valve. The valve opens and shuts in less than one ms to deliver a very short pulse of propellant to the coil surface.

Each capacitor is discharged through the coil by a separate spark gap. Before firing, one of the capacitor electrodes is connected to the grounded capacitor plate (through the coil) while the opposite electrode is charged to ~15 kV and stood off by a gap from a grounded stud. The gap is pressurized with nitrogen to stand off the voltage between shots. A trigger electrode, inserted into the center of the gap, is biased to roughly one half of the capacitor voltage.

A pulse supplied to the trigger electrode by the trigger unit initiates breakdown of the spark gap. The trigger unit is in turn controlled by a master spark gap. When the master spark gap is fired it sends a high voltage pulse, with a 5 ns rise time, to each trigger line [8]. This pulse initiates a breakdown in each of the spark gaps and discharges all 18 capacitors through the coil simultaneously.

Pulsed intense ion beams have been developed for applications including surface modification and alloying, and thin-film and nanopowder synthesis. Rapid thermal processing with ions is quite promising for large-scale commercial use, due to the high specific ion energy deposition (joules per cubic centimeter) without reflection.

The past few decades have seen the emergence of the field of materials processing and synthesis using pulsed intense ion beams. Beams of short duration (tens to hundreds of nanoseconds pulse width), ~0.2÷2 MeV, ~100 A÷1 kA/cm<sup>2</sup> directed ions are capable of rapidly heating and cooling the near-surface region of treated materials including metals, ceramics, polymers, and mixed materials.

Intense ion beams were originally developed as drivers for inertial confinement fusion (ICF) research [9]. Stored energy was switched out of Marx

capacitor banks into vacuum power flow sections, feeding into a high-power ion diode. Such diodes were required to generate voltages and currents in the 10 MeV, ~few mega-ampere range, respectively. High beam brightness with a chosen ion species was necessary to deliver energy to a small fusion pellet located some distance from the diode.

Transport to the target was in ~few torr background gas. For materials processing applications, the requirements are quite different. TW-power beams of non-repetitively pulsed beams are replaced by more modestly powered beams propagating in  $10^{-5}$  torr vacuums, but with high duty cycles and robust operation for an anticipated industrial treatment environment. For beam voltages in the ~ few hundred kilovolts range, standoff and propagation in vacuum to a processing region located some 50 cm away can be accomplished without significant beam instabilities or attenuation. The main energy-loss mechanism is collisional scattering with the residual background gas. At these voltages, the penetration depth can be 1–10  $\mu\text{m}$ , depending upon the ion species and target material. High beam brightness is not a requirement; indeed, for surface modification purposes, the beam should be as unfocussed as possible. Even for ablation and thin-film applications, there is no need to focus beam on a few square millimeter area, but more like a few square centimeters or tens of square centimeters, to optimize processing throughput.

To generate such an intense ion beam, two major requirements must be satisfied: 1) electron flow must be suppressed and 2) a high-current density ion source must be employed. Electrons can be restricted from crossing the anode–cathode (A–K) gap of a high-power ion diode by the application of a pulsed transverse magnetic field, of duration long compared to the 100-ns power pulsewidth. This is referred to as an applied magnetically insulated diode (MID) [9]. Electrons emitted from the cathode are returned to it, while ions, with their much larger Larmor radius, execute S-shaped trajectories as they cross the main transverse magnetic flux, then the return flux. In addition, and depending upon the magnetic field topology, electron drift can lead to the formation of an electron sheath, which can occupy varying amounts of the A–K gap. The sheath acts to reduce the space charge of the ions and, hence, can enhance the ion current density above the normal two-species

Child–Langmuir (C–L) [9] amount. For A–K gap spacings of  $\sim 1$  cm, and transverse B-field strengths of  $\sim$ few kilogauss, C–L enhancements of  $\sim 10$ – $50$  are possible, leading to source current densities in the  $10$ – $100$  A/cm<sup>2</sup> range. For focusing diode geometries, current densities on target of several hundred A to kA/cm<sup>2</sup> are possible. The resultant specific energy deposition (in kilojoules per gram) leads to a melt depth of  $1$ – $10$   $\mu$ m in the treated material and, at higher ion fluencies, to its ablation and redeposition onto a secondary surface.

It is, thus, fortunate that the ion voltages and currents that are required for melt ablation in target materials are also those that facilitate beam generation and transport. This is an advantageous situation compared to electron beam processing.

The key technology developments required for ion-beam processing on a commercial scale are twofold:

1) high repetition-rate operation of the pulsed power for enhanced throughput and 2) a robust, repetitively operated, high-purity ion source of selectable ion species.

Sources for intense ion-beam generation were originally developed for both high source current density (up to  $\sim$  kiloamperes per square centimeter) and beam brightness, irrespective of robustness considerations, since such sources could be refurbished after every pulse. One example of such a source is a set of narrow grooves filled with epoxy, separated by metal. When the power pulse arrives, the triple point formed by the intersection of the epoxy, metal, and vacuum experiences high field stress. The resulting breakdown of the surface leads to the formation of a dense plasma, from which the beam can be extracted. Such a “flashover” source suffers from several defects.

1) The surface is subject to erosion from the breakdown process and so is not robust.

2) The breakdown process is “passive,” in that the formation process requires the arrival of the beam power pulse.

3) Ion species composition of the resulting beam is not controllable.

For application to beams of commercial interest, ion sources are required that are robust, i.e., that can be cycled for millions of pulses without appreciable



maintenance, “active,” i.e., operable independent of the pulsed power delivery, and of selectable ion species. We discuss here the development of several such ion sources.

The most convenient way to form a beam with source of ion current density approximately tens to hundreds of amperes per square centimeter from an anode is to create a plasma from the which the beam can be drawn. This plasma must be dense enough ( $n > 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ), with the given ion species, and over a large area (hundreds of square centimeters). Such a source must also operate within, and be compatible with, the operation of the Applied B MID configuration. This limits the possible methods of plasma production, requires matching the plasma source to the geometry of the diode, and also requires proper synchronization of the plasma source and high-voltage pulse generator. In both cases discussed below, the beam source is an injected gas that has been ionized to form plasma. The concept of a gas discharge as an ion source for an ion diode was proposed in [9]. For a beam with extractor geometry, as discussed here, there is cylindrical symmetry about the center line, and so a gas source located on-axis and with an outward-directed annular flow fits well with the geometry of an MID with a radial insulating B-field (Br diode). There must be a pressure differential between the discharge point (typical pressure is  $10^{-1} \div 10^{-2}$  torr) and the region of ion acceleration. This is achieved by using a fast, pulsed gas valve with radially directed flow into a narrow region where supersonic gas flow can be achieved. Once the expanding gas reaches the radius where beam formation takes place, secondary fields can be employed to ionize the gas.

#### *MAP Diode (SNL)*

The first advanced gas-discharge ion source is referred to as the magnetically confined anode plasma (MAP) ion source, a collaborative development between SNL and Cornell University, Ithaca, NY [10]. An initial version was operated at a 100-pulse per second (pps) rep-rate in the burst of 10 pulses [9]. Fig. 1.7 shows a schematic side view of the MAP diode.

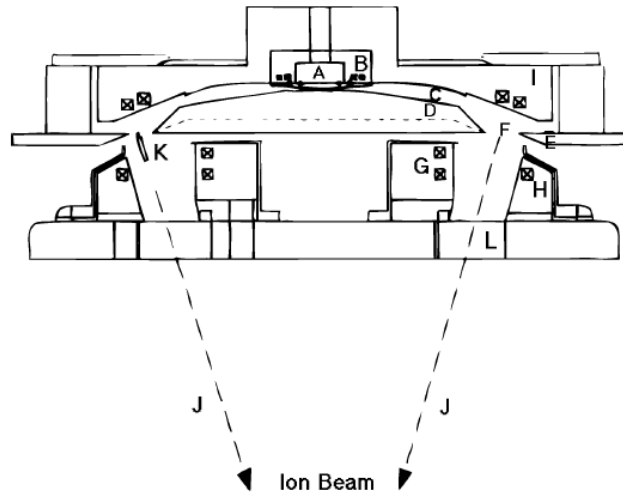


Figure 1.7– MAP diode. The fast puff valve gas plenum (A) with the puff valve magnetic field coil (B); the gas delivery nozzle (C); the inner (D) and outer (E) anode flux excluders; the gas annulus for plasma formation (F); the inner (G) and outer (H) cathode slow magnetic field coils; the fast anode magnetic field coils (I); the ion-beam propagation path (J); Langmuir probe position (K); cathode annulus gap (L).

The beam is intended to focus to the centerline. The electron insulation field is provided by two “slow” coils (G and H). The ion beam passes between them through the cathode annulus gap. The plasma source is located within the anode assembly and includes the plenum and gas-puff valve (A, B) at the axis, and the “fast” two-turn coil positioned at  $22^\circ$  to the vertical (I). The surfaces of the inner anode (D) and the fast coil form a supersonic nozzle for a gas flow radially outward when the puff valve is opened. When the expanding gas arrives at the fast coil position, it is energized. The fast coil waveform contains a RF ringing structure that helps to fully ionize the gas. The interaction between the slow and fast coils pushes the plasma into the annular region between the inner and outer parts of the anode as the power pulse arrives. The inner and outer anodes are made of copper, which conserves the flux from the slow coil during the power pulse. The resulting beam is accelerated through the annulus (area approximately  $150 \text{ cm}^2$ ) between inner and outer anodes, through the inner and outer slow coils in the cathode side and into the propagation and treatment region.

In order to provide the formation of a supersonic gas flow, the puff valve must open on a time scale short compared to the gas transit time to the fast coil position. In the puff valve, a diaphragm covers an annular gas plenum between two O-rings. The diaphragm is made of a high conductivity, heat-treated beryllium–copper alloy which is stamped into a conical shape to form a Belleville spring. Behind the diaphragm is a magnetic coil. When the coil is pulsed, the magnetic field flexes the diaphragm edge to release the gas.

The entire system, including the supersonic nozzle profile, was optimized in calculations and measurements [9] allowing for the formation of reproducible gas flows separated from the accelerating gap.

Because the MAP diode uses injected gas as the source of accelerated ions, beams of many different species can be formed by changing the gas supply. To date, various charge-state beams have been formed from H, He, N, Ne, Ar, Xe, and Kr injection, as well as from compound gases such as CH. Different beam compositions have been used depending upon the application (see below). In particular, protons are almost never used in recent experiments, because the resulting surface morphology is the roughest.

The total current at the treatment location (8-cm radius) is estimated at 7 kA. Faraday cup measurements taken near the A–K gap indicate a 50–100-A/cm<sup>2</sup> source current. Averaged over the ~100-cm<sup>2</sup> ion emission area yields a total ion current as high as 10 kA at the beam source. The remaining current is evidently lost in transmission through the 10<sup>-5</sup>torr to the treatment location.