

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика  
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

<b>Тема работы</b> <b>Исследование характеристик компактного ЭЦР источника ионов на основе коаксиального четвертьволнового резонатора</b>
--

УДК 621.384.633.8

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ01	Берестов Кирилл Игоревич		

Руководитель

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

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник СИИ, ЛЯР, ОИЯИ	Богомолов С.Л.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Т.Б.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Д.В.	к.т.н.		

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способность организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способность применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способность определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы её совершенствования на основе самооценки
ОПК(У)-1	Способность к профессиональной эксплуатации современного научного и технологического оборудования и приборов, предназначенных для использования в области технической физики
ОПК(У)-2	Способность демонстрировать и использовать углублённые теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, в том числе из области технической физики
ОПК(У)-3	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
ОПК(У)-4	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности в области технической физики
ОПК(У)-5	Способность осуществлять научный поиск и разработку новых перспективных подходов и методов к решению профессиональных задач, готовность к профессиональному росту, к активному участию в научной деятельности, конференциях, выставках и презентациях
ПК(У)-1	Способность критически анализировать современные проблемы технической физики, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты
ПК(У)-2	Способность самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для оптимизации параметров объектов и процессов с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств
ПК(У)-3	Готовность осваивать и применять современные физико-математические методы для решения профессиональных задач в области технической физики, составлять практические рекомендации по использованию полученных результатов
ПК(У)-4	Способность представлять результаты исследования в формах отчётов, рефератов, публикаций и презентаций
ПК(У)-5	Готовность принимать непосредственное участие в учебной и учебно-методической работе по направлению «Техническая физика», участвовать в разработке программ учебных дисциплин и курсов
ПК(У)-6	Способность проводить учебные занятия, лабораторные работы, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся
ПК(У)-7	Способность применять и разрабатывать новые образовательные технологии
ПК(У)-8	Способность разрабатывать и оптимизировать современные наукоёмкие технологии в областях технической физики, связанных с применением пучковых и плазменных технологий, с учетом экономических и экологических требований
ПК(У)-9	Способность разрабатывать, проводить наладку и испытания, эксплуатировать наукоёмкое технологическое и аналитическое оборудование
ПК(У)-10	Готовность решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ

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  
 \_\_\_\_\_ Сиделёв Д.В.  
 (Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ01	Берестовому Кириллу Игоревичу

Тема работы:

Исследование характеристик компактного ЭЦР источника ионов на основе коаксиального четвертьволнового резонатора	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	Приказ №47-1/с от 16.02.2022 г

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2022 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p>	<p>Задание. Литературный источники по физике плазмы и принципам работы ионных источников. Компактный ЭЦР—источник ионов на основе коаксиального четвертьволнового резонатора</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор и анализ литературы</li> <li>2. Испытания компактного ЭЦР-источника ионов на основе коаксиального четвертьволнового резонатора на экспериментальном стенде в целях определения его оптимальных рабочих параметров</li> <li>3. Результаты испытаний, их анализ</li> <li>4. Экономический расчет</li> </ol>

	5. Охрана труда и техника безопасности 6. Выводы. Заключение
<b>Перечень графического материала</b>	1. Титульный лист 2. Актуальность работы 3. ЭЦР-источник ионов 4. Цели и задачи 5. Моделирование магнитной системы компактного ЭЦР-источника (COMSOL Multiphysics) 6. Компактный 2,45 ГГц ЭЦР-источник ионов 7. Испытание источника при конфигурации ввода мощности №1 8. Испытание источника при конфигурации ввода мощности №1 $I(P)$ и $I(f)$ 9. Испытание источника при конфигурации ввода мощности №1 $I(f)$ 10. Испытание источника при конфигурации ввода мощности №2 11. Испытание источника при конфигурации ввода мощности №2 $I(W)$ 12. Испытание источника при конфигурации ввода мощности №2 $I(P)$ 13. Испытание источника при конфигурации ввода мощности №3 14. Испытание источника при конфигурации ввода мощности №3 $I(f)$ и $I(P)$ 15. Научное положение, выносимое на защиту 16. Выводы

#### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент Отделения социально-гуманитарных наук, к.э.н. Якимова Т.Б.
Социальная ответственность	Профессор ТПУ, д.т.н. Федорчук Ю.М.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	07.02.2022
--	------------

#### Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор, НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф-м.н.		
Начальник СИИ, ЛЯР, ОИЯИ	Богомолов С.Л.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ01	Берестов К.И.		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОДМ01	Берестов Кирилл Игоревич

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>НОЦ им. Б.П. Вейнберга</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/специальность</b>	16.04.01 Техническая физика / Пучковые и плазменные технологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Дубна, Московской области. Тарифная ставка исполнителя определена штатным расписанием НИИ ТПУ, ставка руководителя определена расписанием ОИЯИ ЛЯР
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	-30% премии; 30% районный коэффициент..
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2%.

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	Анализ и оценка конкурентоспособности НИИ; SWOT-анализ.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1.Цели и результат проекта. 2.Организационная структура проекта. 3.Ограничения и допущения проекта
3. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки: - организация работ НИИ; - определение структуры работ; - разработка графика Гантта. Формирование бюджета затрат на научное исследование
1. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	1.Определение интегрального финансового показателя разработки; 2.Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3.Определение интегрального показателя эффективности.

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

1. <i>Сегментирование рынка</i>
2. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
3. <i>Матрица SWOT</i>
4. <i>График проведения и бюджет НИИ</i>
5. <i>Потенциальные риски</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.02.2022
--	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОДМ01	Берестов Кирилл Игоревич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b> ОДМ01	<b>ФИО</b> Берестовому Кириллу Игоревичу
------------------------	---

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>НОЦ Б.П. Вейнберга</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	16.04.01 Пучковые и плазменные технологии

**Тема дипломной работы: «Исследование характеристик компактного ЭЦР источника ионов на основе коаксиального четвертьволнового резонатора»**

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Исследование характеристик 2.45 ГГц источника ионов на основе коаксиального четвертьволнового резонатора. Область применения: физика плазмы, физика конденсированного состояния вещества, физика ускорителей. Работы проводились на базе ЛЯР (ОИЯИ).
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов <ul style="list-style-type: none"> <li>• Природа воздействия</li> <li>• Действие на организм человека</li> <li>• Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов)</li> <li>• СИЗ коллективные и индивидуальные</li> </ul> 1.2. Анализ выявленных опасных факторов: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Термические источники опасности</li> <li>• Электроопасность</li> <li>• Пожароопасность</li> </ul>	1. Вредные факторы: 1.1 Недостаточная освещенность; 1.2 Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры; 1.3 Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 1.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 2. Опасные факторы: 2.1 Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R <sub>заземления</sub> , СКЗ, СИЗ; Проведен расчет освещения рабочего места; представлен рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ; 2.2 Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.
<b>2. Экологическая безопасность:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Выбросы в окружающую среду</li> <li>• Решения по обеспечению экологической безопасности</li> </ul>	Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, вторцвет- и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника, обрезки монтажных проводов,) и способы их утилизации;
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>• разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>• разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	Рассмотрены 2 ситуации ЧС: 1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте); 2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства в том и другом случае.
<b>4. Перечень нормативно-технической документации.</b>	ГОСТы, СанПиНы, СНиПы.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.02.2022
--	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор, ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОДМ01	Берестов К.И.		

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация включает в себя: 116 страниц, 24 таблицы, 58 рисунков, 37 литературных источников.

Ключевые слова: ЭЦР, компактный ЭЦР-источник, резонатор, СВЧ, плазма.

Объектом исследования является компактный ЭЦР-источник на основе четвертьволнового коаксиального резонатора.

Цель работы: определение оптимальных рабочих параметров компактного ЭЦР-источника ионов на основе коаксиального четвертьволнового резонатора.

В процессе исследования была промоделирована магнитная система 2,45 ГГц ЭЦР-источника ионов на основе коаксиального четвертьволнового резонатора, а также были определены его оптимальные рабочие параметры.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, по теме диссертации включающий разделы в которых обсуждаются вопросы физики плазмы, такие как: квазинейтральность плазмы, степень ионизации, способы классификации плазмы и элементарные процессы в плазме ЭЦР-источника.

Во второй главе представлены существующие представления о компактных 2,45 ГГц ЭЦР-источниках ионов. Представлены примеры конструкций компактных ЭЦР-источников ионов, такие как: ионный источник *Minimono*, протонный источник и источник *SOMIS*.

В третьей главе представлены результаты проектирования компактного ЭЦР-источника ионов в ЛЯР ОИЯИ: представлены результаты моделирования электродинамических характеристик (ЭДХ) резонатора источника, результаты расчётов магнитной системы. Показано, что данная магнитная система обеспечивает псевдо-замкнутые поверхности с уровнем поля от  $V_{рез}$  (875 Гс) до  $2V_{рез}$  (1750 Гс), что соответствует частоте 2,45 ГГц.

В четвертой главе представлены результаты испытаний компактного ЭЦР-источника ионов, а именно измерение тока извлеченных ионов при разных мощностях и частотах генератора, при разных вводах мощности (используя

петли связи с разными длинами) и при изменении потока напускаемого в камеру газа

Установлено, что при эксплуатации источника для достижения наибольшего значения тока ионов предпочтительно использовать ввод мощности №2 с 18 мм петлей связи при следующих параметрах:  $f = 2500$  МГц,  $W = 30$  Вт,  $P \approx 1,4 \cdot 10^{-5}$  торр. Так как при вышеописанных параметрах обеспечивается лучшее согласование с линией передачи.

## Оглавление

Введение.....	13
1 Вопросы физики плазмы .....	20
1.1 Квазинейтральность плазмы .....	20
1.2 Степень ионизации.....	22
1.3 Способы классификация плазмы.....	22
1.4 Элементарные процессы в плазме ЭЦР-источника ионов.....	25
2 2,45 ГГц ЭЦР-источники ионов.....	28
2.1 Компактные ЭЦР-источники ионов .....	32
3 2,45 ГГц ЭЦР-источник ионов на основе четвертьволнового коаксиального резонатора .....	35
3.1 Разработка компактного ЭЦР-источника ЛЯР (ОИЯИ) .....	35
3.2 Моделирование коаксиального резонатора для 2,45 ЭЦР-источника ионов	37
3.3 Ввод мощности.....	41
4 Практическая часть .....	48
4.1 Конструкция источника.....	48
4.2 Испытание источника .....	49
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	63
5.1 Предпроектный анализ .....	63
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	63
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений .....	65
5.1.3 SWOT-анализ.....	67
5.1.4 Инициация проекта .....	68
5.2 Организационная структура проекта .....	69
5.3 Ограничения и допущения проекта.....	70
5.4 План проекта.....	71
5.5 Разработка графика проведения НИОКР.....	72
5.6 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	73
5.7 Основная заработная плата исполнителей темы .....	76
5.8 Реестр рисков.....	79

5.9	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	80
6	Социальная ответственность .....	83
6.1	Производственная безопасность.....	83
6.1.1	Освещенность .....	83
6.1.2	Отклонение показателей микроклимата в помещении .....	87
6.1.3	Превышение уровня шума .....	88
6.1.4	Повышенный уровень электромагнитных излучений.....	89
6.2	Поражение электрическим током .....	91
6.3	Пожарная безопасность .....	93
6.4	Экологическая безопасность .....	96
6.5	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	97
	Заключение .....	101
	Список литературы .....	102
	Приложение II.....	106

## Введение

Ионные источники на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) используются на протяжении десятков лет, они нашли широкое применение во многих лабораториях мира для получения пучков ионов, применяемых в ионной имплантации, для ускорителей, для получения пучков радиоактивных ионов и т. д.

Принцип работы ЭЦР источников ионов основан на явлении электронно-циклотронного резонанса. Электрон, будучи помещенным в постоянное магнитное поле будет двигаться по окружности с определенной частотой, называемой электронной:

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m} \quad (1)$$

Если частота введенной в плазму электромагнитной волны равна циклотронной частоте электронов в магнитном поле, то между волной и электронами происходит чрезвычайно эффективный обмен энергией. Такие электроны, приобретая энергию (до сотен кэВ), способны эффективно ионизировать атомы различных веществ до высоких зарядовых состояний. При этом, если частота электромагнитной волны окажется меньше плазменной частоты, то произойдет отражение волны. Схема ионного источника представлена на рисунке 1 [1].

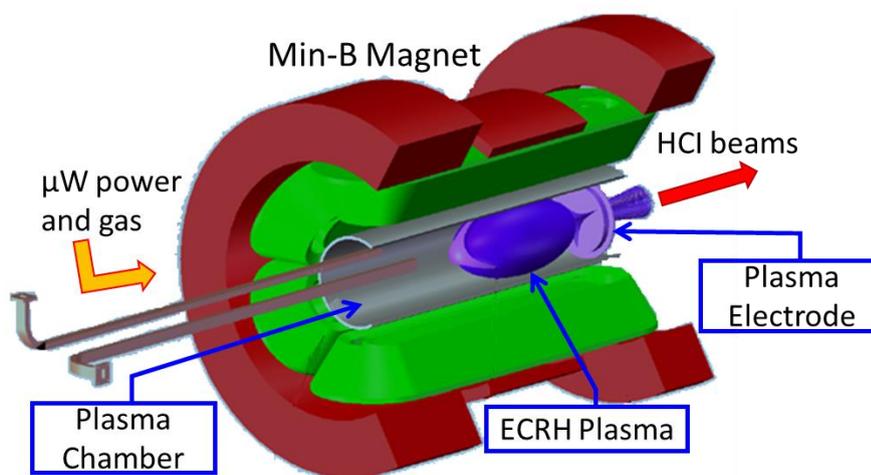


Рисунок 1 – ЭЦР источник ионов [1]

Неотъемлемой частью ЭЦР источника является магнитная система, необходимая для удержания плазмы. Удержание плазмы в продольном и поперечных направлениях осуществляется с помощью гексапольных и соленоидальных магнитов (рис. 2, 3) [2]. Суперпозиция аксиального и радиального магнитных полей создает т.н. конфигурацию “minimum B” (рис.4) [3].

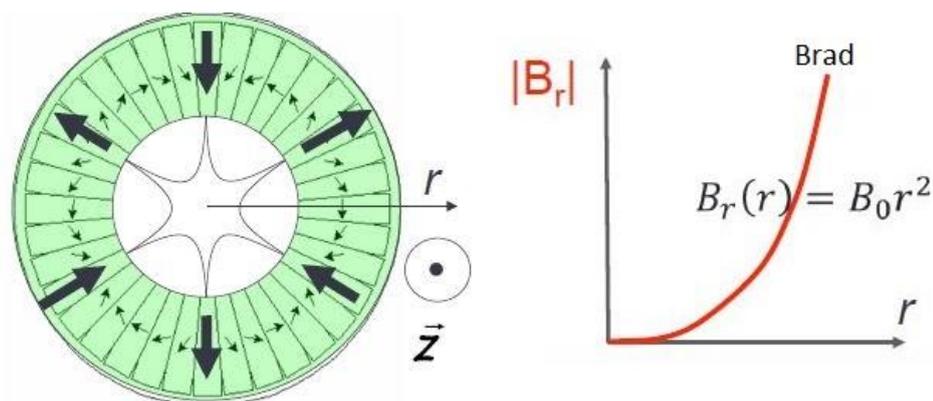


Рисунок 2 – Гексапольный магнит ЭЦР источника и его поле

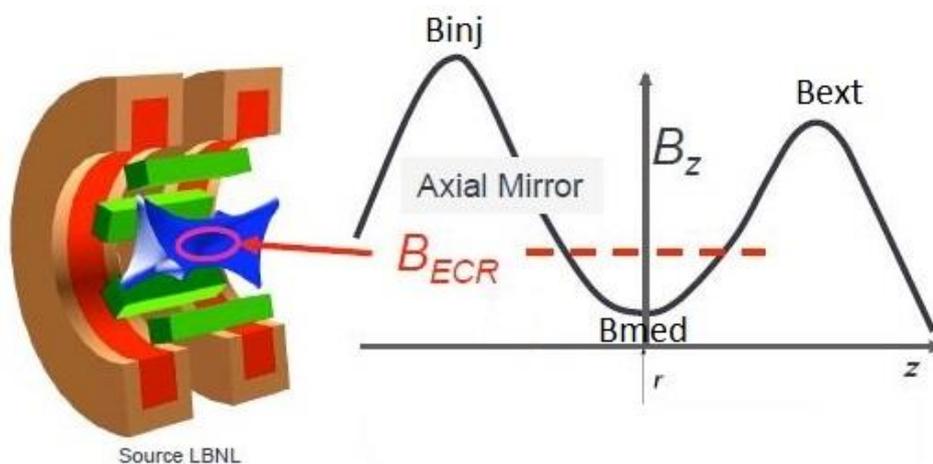


Рисунок 3 – Соленоидальный магнит ЭЦР источника и его поле

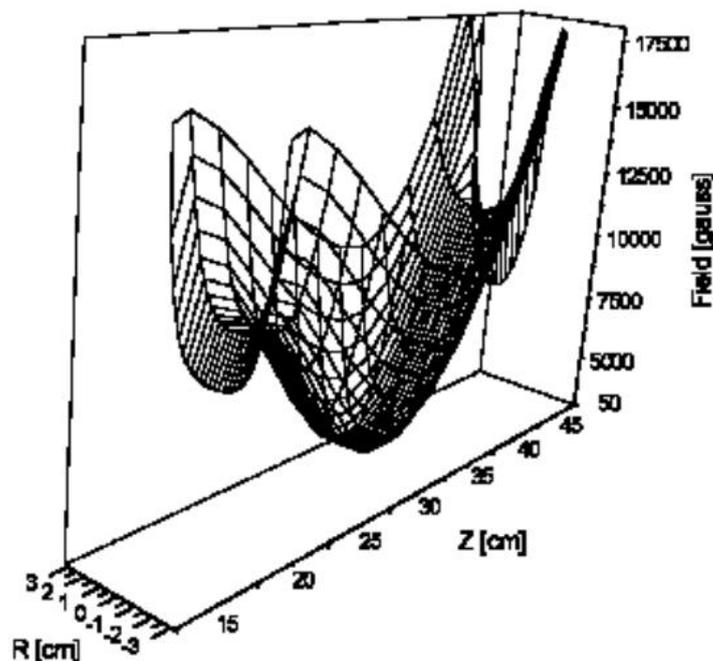


Рисунок 4 – Суммарное распределение магнитного поля [3]

Для создания радиального поля обычно используются постоянные магниты, состоящие из секторов. Вектора намагниченности секторов подбираются таким образом, чтобы получить желаемое распределение магнитного поля по радиусу. Для осевого удержания плазмы можно использовать как постоянные, так и электромагниты.

Согласно результатам работы [3] установлено, что наиболее эффективно образование многозарядных ионов происходит при определенных соотношениях магнитной индукции (рис. 3):

$$B_{radial} = 2 \div 2,2 B_{ECR}; \quad (2)$$

$$B_{injection} = 3 \div 4 B_{ECR}; \quad (3)$$

$$B_{extr} \geq B_{radial}; \quad (4)$$

$$B_{min} = 0,3 \div 0,45 B_{radial}; \quad (5)$$

где  $B_{ECR}$  – резонансное магнитное поле,  $B_{injection}$  – магнитное поле в области инжекции,  $B_{extr}$  – магнитное поле в области экстракции,  $B_{radial}$  – радиальное магнитное поле,  $B_{min}$  – минимальное магнитное поле.

Плотность плазмы определяется рабочей частотой ионного источника, максимальный ток на выходе ЭЦР источника в свою очередь пропорционален плотности плазмы:

$$I_{peak} \sim \omega_{rf}^2 \quad (6)$$

На рисунке 5 приведены экспериментальные результаты, полученные из ЭЦР источников с различной рабочей частотой.

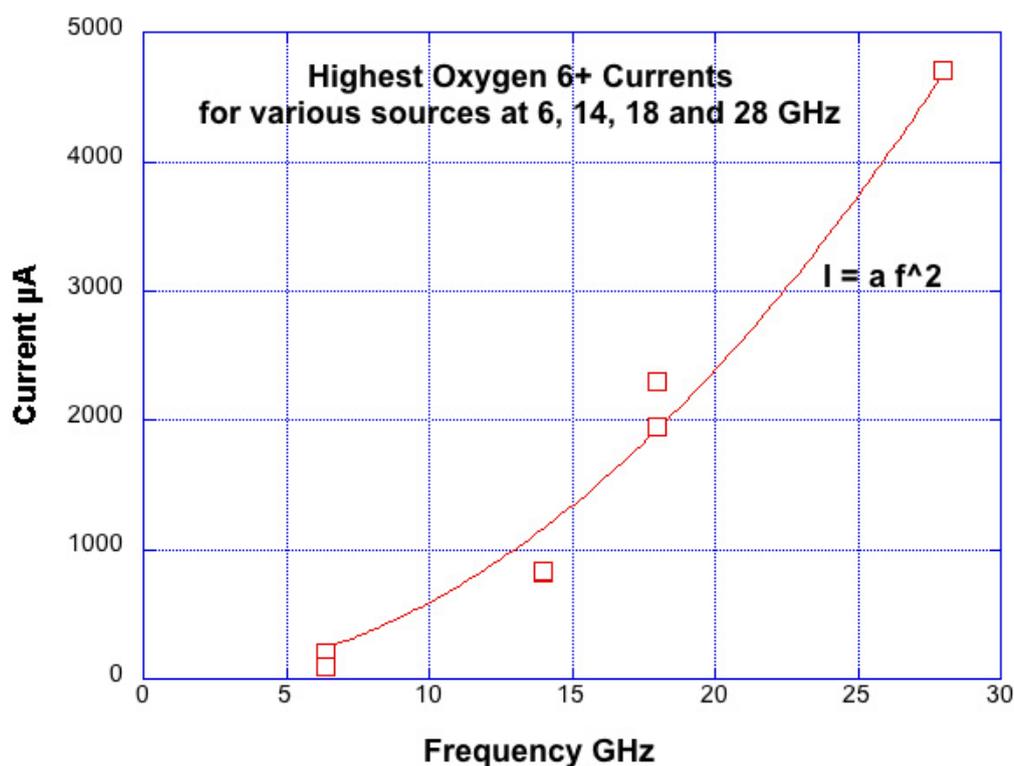


Рисунок 5— Зависимость тока ионов  $O^{6+}$  от частоты для 6, 14, 18 и 28 ГГц  
источниках ионов

В качестве примера современного ЭЦР-источника можно привести источник SECRAI-II, работающий на частоте 28 ГГц, построенный для ускорительного комплекса тяжелых ионов (HIRFL). На рисунке 6 показан ЭЦР-источник SECRAI-II. Конфигурация магнитного поля источника SECRAI-II создается сверхпроводящими обмотками - три соленоида для формирования аксиального поля, и секступольный магнит из 6 обмоток, расположенных

снаружи соленоидальных обмоток (рис. 7) [4]. В таблице 1 представлены технические параметры ионного источника SECRAL-II [4].

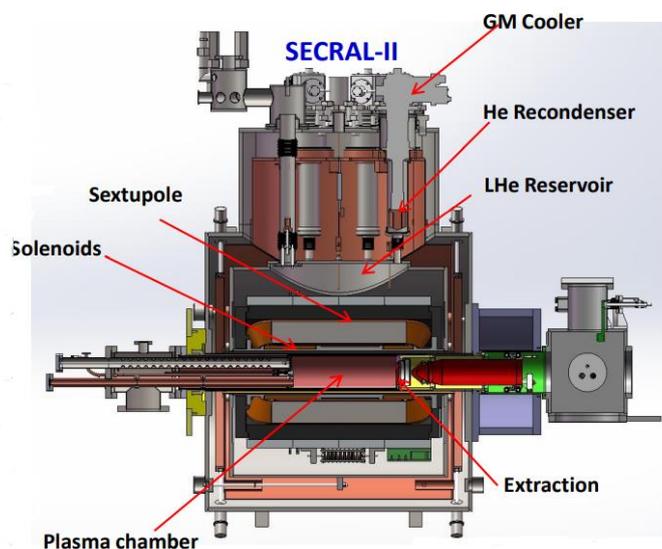


Рисунок 6 – ЭЦР-источник ионов SECRAL-II [4]

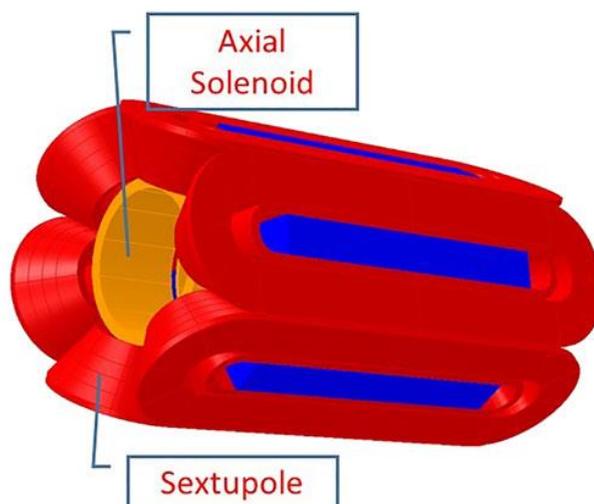


Рисунок 7 – Магнитная система источника SECRAL-II [4]

Таблица 1 – Технические параметры ионного источника SECRAL-II [4]

Параметры	Значения
Рабочая частота (ГГц)	18-28
Аксиальное магнитное поле (Т)	3,7 (инж.), 2,2 (экстр.)
Длина ловушки (мм)	420
Количество соленоидов аксиального поля	3
$B_r$ на стенках камеры (Т)	2,0
Длина холодной массы (мм)	~810
Материал сверхпроводника	NbTi
Охлаждение магнитной системы	LHe
Внутренний диаметр «теплого» отверстия, мм	~142
Внутренний диаметр камеры (мм)	~126
Динамическая мощность охлаждения (Вт)	~5

На рисунке 8 показана конфигурация магнитного поля ЭЦР-источника ионов SECRAL-II для работы на частотах 18 и 24 ГГц [5].

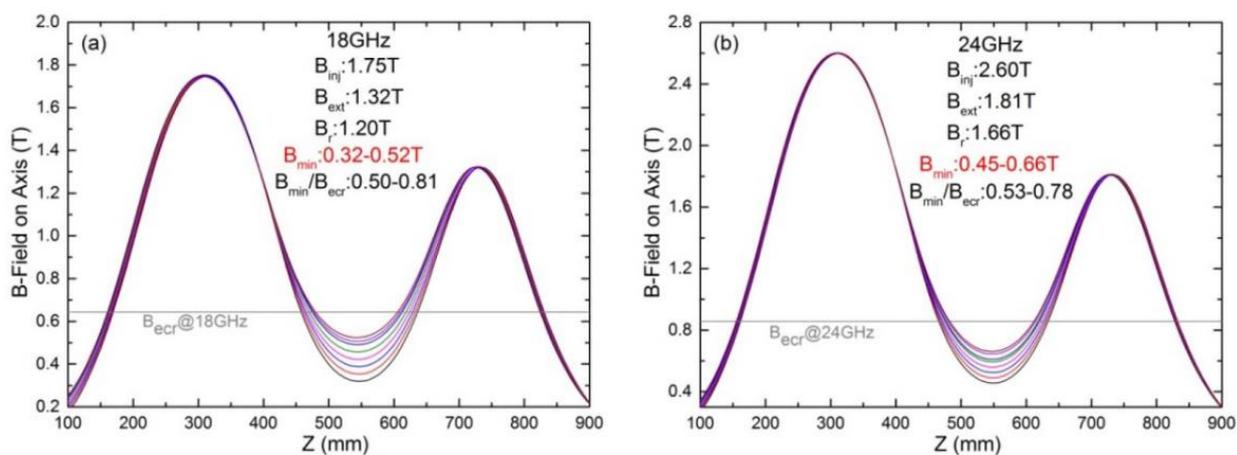


Рисунок 8 – Конфигурация магнитного поля ЭЦР-источника ионов SECRAL-II, (a) – 18 ГГц, (b) – 24 ГГц [5]

Результаты работы [5] показали, что интенсивность пучков высокозарядных ионов увеличивается при работе на высокой мощности и использовании двухчастотного нагрева. На рисунке 9 представлена зависимость интенсивности пучка  ${}_{86}\text{Kr}^{25+}$  от СВЧ-мощности, вводимой в источник SECRAL-II.

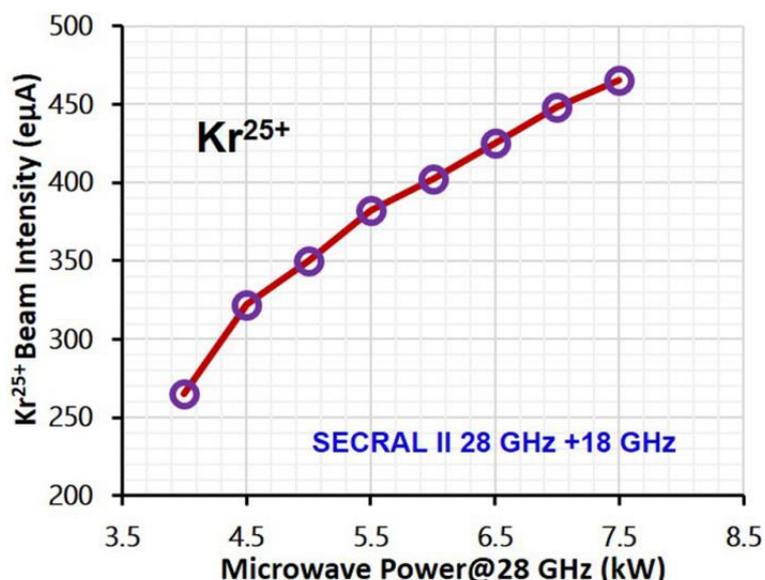


Рисунок 9 – Зависимость интенсивности пучка  ${}_{86}\text{Kr}^{25+}$  от СВЧ-мощности, достигаемой на источнике SECRAL-II [5]

На рисунке 9 показано, что интенсивность пучка продолжает увеличиваться с увеличением мощности микроволн и не достигает насыщения даже при общей мощности более 7,5 кВт, что означает, что для достижения более высоких интенсивностей пучка необходима более высокая мощность.

В ядерной физике также востребованы источники однозарядных ионов, в частности для получения пучков радиоактивных ионов методом ISOL (Isotope Separation On Line).

Темой моей дипломной работы является исследование характеристик компактного ЭЦР источника ионов на основе коаксиального четвертьволнового резонатора.

В следующих разделах будут рассмотрены основные процессы в плазме ионных источниках, приводящих к образованию ионов, принцип работы компактных ЭЦР-источников и результаты измерения параметров 2,45 ГГц ЭЦР-источника ионов.

# 1 Вопросы физики плазмы

## 1.1 Квазинейтральность плазмы

Плазма является наиболее распространенным состоянием вещества в природе. Она представляет собой смесь трех компонент, а именно нейтральные атомы, положительно заряженные ионы и электроны. Исходя из данного выше определения можно сделать вывод, что электрические силы связывая разноименные заряды в плазме обеспечивают её квазинейтральность. Всякое изменение концентрации электронов относительно концентрации ионов приводит к возникновению электрических полей, т.е. полем из области, где произошла декомпенсация заряда будут выталкиваться частицы одного знака и втягиваться частицы противоположного знака. В случае достаточно малых объемов квазинейтральность может не сохраняться, так как электрические поля, создаваемые избыточностью одноименных зарядов, будут недостаточно сильны для того, чтобы повлиять на движение частиц.

Электростатический потенциал отдельной частицы с зарядом  $q$  описывается следующим выражением:

$$\varphi = \frac{q}{r} \quad (7)$$

Электроны, в плазме, в некоторой окрестности иона притягиваются к нему и экранируют его электростатическое поле, “неподвижный” электрон точно также отталкивает другие электроны и притягивает ионы. Благодаря этому эффекту поле вокруг заряженной частицы изменяется. Поле, покоящегося в плазме заряда описывается потенциалом:

$$\varphi = \frac{q}{r} \exp\left(-\frac{r}{\delta_D}\right); \quad (8)$$

где  $\delta_D$  – дебаевский радиус экранирования, для электрон-протонной плазмы:

$$\delta_D = \left(\frac{kT}{8\pi n e^2}\right)^{\frac{1}{2}} = 4.9 \left(\frac{T}{n}\right)^{\frac{1}{2}}; \quad (9)$$

Здесь  $n$  – концентрация электронов или ионов ( $\text{см}^{-3}$ ),  $T$  – температура (К),  $k$  – постоянная Больцмана (эрг/К).

Дебаевский радиус определяет сферу влияния выделенного пробного заряда в плазме и в общем случае зависит от скорости движения пробного заряда относительно плазмы. Зависимость Дебаевского радиуса от концентрации заряженных частиц в плазме представлена на рисунке 10 [6].

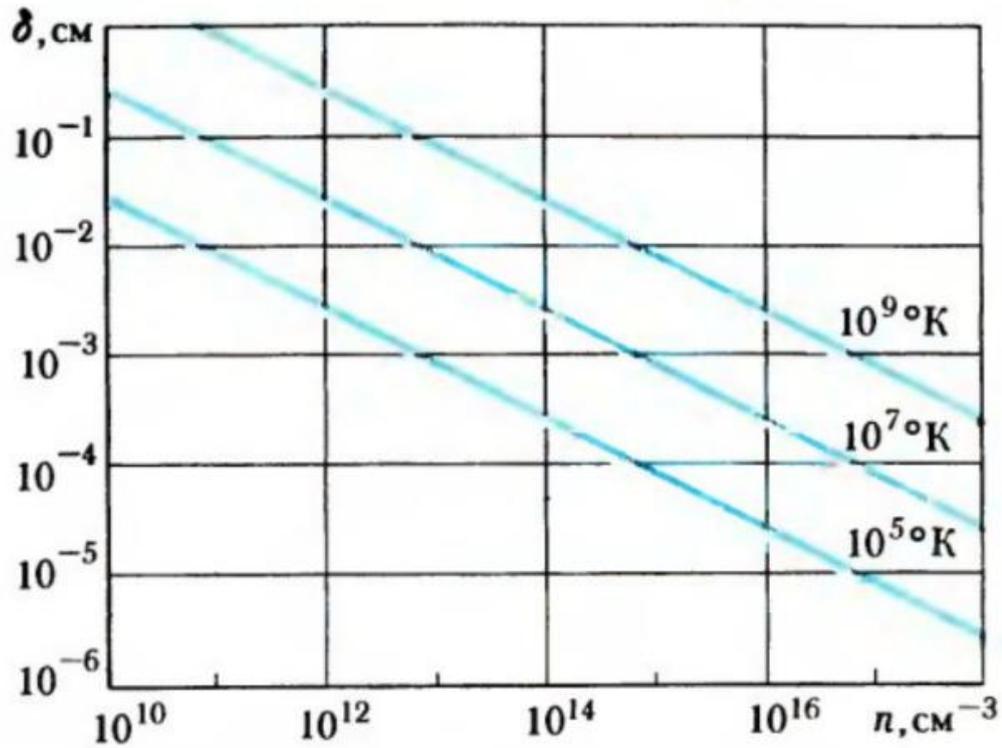


Рисунок 10 – Зависимость радиуса Дебая от плотности при нескольких значениях температуры [6]

Время, в течении которого существуют области декомпенсации определяется следующим образом:

$$\tau = \frac{\delta}{v_e} = \sqrt{\frac{kT}{4\pi n e^2}} \sqrt{\frac{m_e}{kT}} = \sqrt{\frac{m_e}{4\pi n e^2}} \quad (10)$$

Частота электростатических плазменных колебаний (плазменная или ленгмюровская частота) является функцией плотности плазмы:

$$\omega_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m}} \quad (11)$$

## 1.2 Степень ионизации

Степенью ионизации плазмы называется отношение концентрации ионов к концентрации нейтральных атомов:

$$\gamma = \frac{n_i}{n_{\gamma_0}} \quad (12)$$

Тогда:

$$n_e = n_i = \gamma n_{\gamma_0} \quad (13)$$

$$n_{\gamma} = (1 - \gamma)n_{\gamma_0}. \quad (14)$$

При  $\gamma \geq 10\%$  говорят, что плазма является сильноионизированной, физика среды в данном случае определяется в основном плазменными эффектами. При  $\gamma \leq 1\%$  говорят, что плазма является слабоионизированной, при рассмотрении физики данной среды необходимо рассматривать влияние нейтрального газа.

## 1.3 Способы классификация плазмы

### Квантовые эффекты

По роли квантовых эффектов разделяют вырожденную и классическую плазму. Плазма называется вырожденной, когда среднее расстояние между частицами плазмы соизмеримо с длиной волны де Бройля:

$$\lambda_B = 2\pi h/p \quad (15)$$

где  $p$  – импульс частицы,  $h$  – редуцированная постоянная планка.

С увеличением плотности частиц в единице объёма плазмы квантовые эффекты становятся более существенными, в то время как относительно разряженная плазма может быть описана классической теорией.

Если среднее расстояние между частицами плазмы  $n^{-1/3}$  намного превышает расстояние длины волны де Бройля, то плазма считается классической:

$$\lambda_B = n^{-1/3}. \quad (16)$$

С учётом уравнения (16) можно записать в следующем виде:

$$T \gg \frac{4\pi^2 \hbar^2 n^{2/3}}{m}. \quad (17)$$

### **Межчастичное взаимодействие**

По роли электростатического взаимодействия заряженных частиц друг с другом плазму можно разделить на идеальную и неидеальную.

Плазма, в которой средняя кинетическая энергия взаимодействия частиц гораздо больше средней потенциальной энергии называется идеальной. Для идеальной плазмы справедливо следующее выражение:

$$W_K : T. \quad (18)$$

Потенциальная энергия, приходящаяся на одну частицу для однократно ионизированной плазмы:

$$W_E \sim - \frac{e^2}{n^{-1/3}}. \quad (19)$$

Тогда условия идеальности плазмы запишется в следующем виде:

$$T \gg e^2 n^{1/3}. \quad (20)$$

Неидеальной плазме соответствует выражение:

$$\gamma = \frac{e^6 n}{T^3}. \quad (21)$$

В случае, когда  $\gamma \ll 1$ , плазма называется идеальной. Термодинамические свойства плазмы мало отличаются от свойств идеального газа.

### Температура

Распределение частиц плазмы может быть описано распределением Максвелла в равновесном состоянии (как идеальный газ):

$$f(v_x) = n \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} \rightarrow \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}. \quad (22)$$

$$\bar{v}_e = 67 \cdot 10^4 \sqrt{T_e [eV]} \text{ м/с}, \quad (23)$$

$$\bar{v}_i = 1,57 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T_i [eV]}{A}} \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (24)$$

Как правило, в плазме источника ионов ионы и электроны имеют отличающуюся друг от друга энергию,  $T_e \gg T_i$ . Обычно температура электронов составляет  $\geq 10^4$  К, в то время как температура ионов и нейтралей составляет  $10^3$  К. Общепринятым стало использовать знак  $T$  не только по отношению к термодинамической температуре (К), а для характеристической энергии  $k_B T$  выраженной в эВ. В области экстракции температура ионов и электронов за счет столкновений становится одинаковой ( $T_e = T_i$ ) [7].

В зависимости от температуры плазма бывает высокотемпературная ( $T \gg 10$  эВ) и низкотемпературная ( $T < 10$  эВ). Подразумевается, что высокотемпературная плазма полностью ионизирована, а в низкотемпературной плазме важным является учёт наличия нейтральных частиц.

### Термодинамическое равновесие

Плазма в условиях изоляции от окружающей среды требует достаточно большой промежуток времени для перехода к термодинамическому равновесию. В условиях термодинамического равновесия концентрация электронов, ионов и нейтральных атомов постоянны, скорости прямых и обратных реакций равны. Если эти условия нарушаются, то плазма называется неравновесной. Плазма, у которой температуры всех компонентов равны между собой называется изотермической.

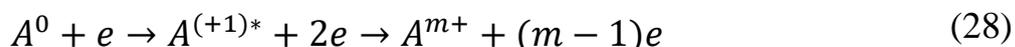
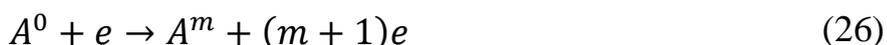
## Время существования

По времени существования плазма делится на стационарную и нестационарную. Плазму называют стационарной, когда она обладает большим временем жизни по сравнению с временем релаксации. Нестационарная плазма живет ограниченное время, определяемое как период установления равновесия в плазме. Плазма, время жизни которой превышает характерное время переходных процессов, называется квазистационарной.

### 1.4 Элементарные процессы в плазме ЭЦР-источника ионов

Возможность получения многозарядных ионов в плазме ионного источника определяется соотношением процессов ионизации и потерь ионов, происходящих в объеме плазмы или за счет ухода ионов из области ионизации. Процессы наработки и потерь ионов в объеме плазмы зависят от неупругих столкновений таких как атом-электрон, ион-электрон, ион-ион и ион-атом. За процессы потери ионов на стенках камеры и процесса нагрева ионов горячими электронами отвечают упругие столкновения.

Механизмы наработки многозарядных ионов электронным ударом можно представить следующим образом:



Выражение (25) и (26) представляют механизмы прямой ударной ионизации, выражение (27) описывает процесс возбуждения-автоионизации, выражение (28) представляет процесс эмиссии электронов, после первоначального выбивания электрона с внутренней оболочки. Для ионизации атома необходимо, чтобы энергия налетающего электрона была не меньше, чем потенциал ионизации атома. На рисунке 11 представлена зависимость первой энергии ионизации от порядкового номера элемента  $Z$  [8].

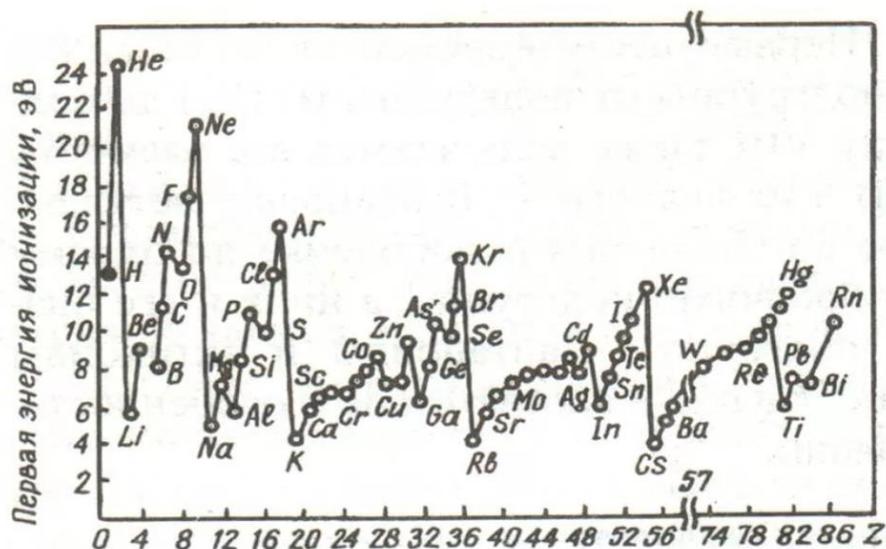


Рисунок 11 - Зависимость первой энергии ионизации от порядкового номера элемента Z [8]

Однако максимальная эффективность ионизации достигается тогда, когда энергия электрона превышает первый потенциал ионизации в 2-5 раз (рис. 12) [8].

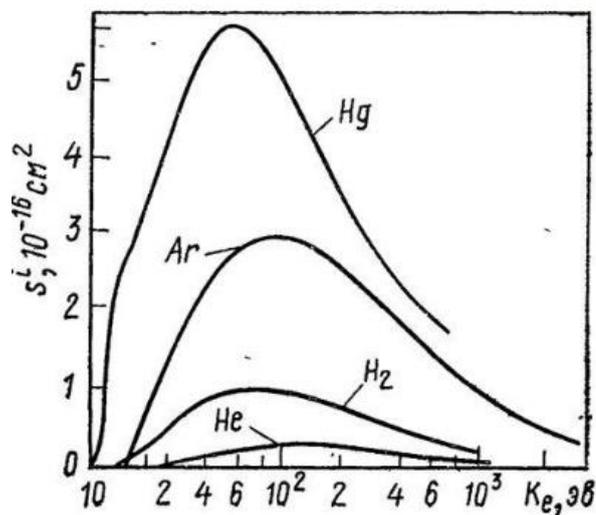
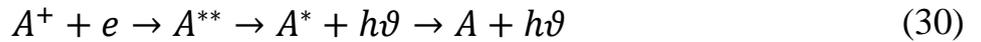


Рисунок 12 – Зависимость сечений ионизации различных атомов от энергии электрона [8]

Также в плазме наблюдается рекомбинация, т.е. процесс обратный ионизации. В ходе рекомбинации происходит выделение энергии, затраченной на ионизацию, этот процесс происходит с испусканием кванта света или

передается третьему телу, участвующему в процессе – электрону или атому. Механизмы рекомбинации можно представить следующим образом:



Выражение (29) представляет процесс фото- или радиационной рекомбинации, выражение (30) описывает процесс диэлектронной рекомбинации, выражения (31) и (32) описывают рекомбинацию в тройных столкновениях с образованием атома в основном состоянии и ударно-радиационную рекомбинацию в тройных столкновениях.

К механизмам потери многозарядных ионов в плазме следует отнести процесс перезарядки:



Процесс перезарядки является доминирующим при энергиях 40 кэВ/н, при увеличении заряда иона сечение перезарядки возрастает в соответствии со следующим соотношением:

$$\sigma_{\text{пер}} = z^{1,2} \sigma_H \quad (34)$$

Исходя из имеющихся данных следует, что сечения перезарядки имеют тот же порядок, что и сечения ионизации, а иногда превышают их.

Для уменьшения влияния процесса перезарядки необходимо, чтобы концентрация электронов в плазме намного превышала концентрацию нейтральных атомов:

$$n_e \gg n_0 \quad (35)$$

Потери ионов на стенках камеры вызваны уходом ионов из плазмы. Данный процесс можно охарактеризовать временем нахождения иона в области ионизации  $\tau_i$  [8]:

$$\tau_i \sim \exp \frac{Z_i e |\Delta\varphi|}{kT_i} \quad (36)$$

где  $Z_i$  и  $T_i$  – заряд и температура иона,  $\Delta\varphi$  – потенциал плазмы.

Для источников многозарядных ионов важным параметром является произведение концентрации электронов на время нахождения иона в плазме ( $n_e \tau_i \geq 10^{10}$  для получения многозарядных ионов).

Для эффективной ионизации атомов электронным ударом, электронные температуры должны быть порядка 1-10 кэВ, с другой стороны, температура ионов должна быть более низкой, так как она влияет на величину эмиттанса и разброса по энергиям в извлекаемом пучке:

$$\epsilon_{n-rms}^{th} = 0,016 \cdot r \sqrt{\frac{k_B T_i}{A}}. \quad (37)$$

Использование ЭЦР позволяет осуществить метод селективного нагревания электронов. При вводе в плазму электромагнитной волны с частотой, равной циклотронной частоте электронов в магнитном поле, происходит чрезвычайно эффективный обмен энергией между волной и электронами.

## **2 2.45 ГГц ЭЦР-источники ионов**

В Лаборатории ядерных реакций им. Флерова (ЛЯР ОИЯИ) разработаны ЭЦР-источники для получения пучков радиоактивных ионов, работающих на частоте 2,45 ГГц [8]. Источника ионов такого типа используются в проекте DRIBs для получения пучков ионов  ${}^6\text{He}^+$ , а также на анализаторе MASHA (Mass Analyzer of Superheavy Atoms) (рис. 13) [9].

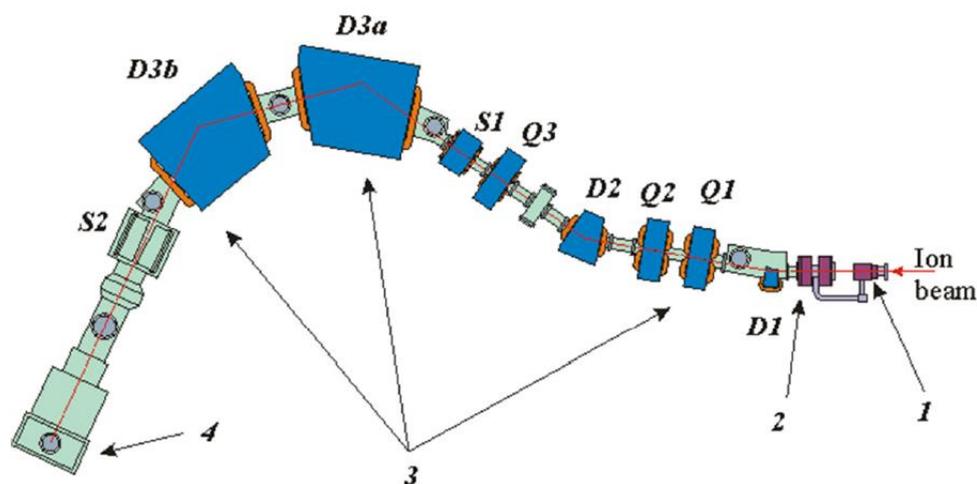


Рисунок 13 – Масс-анализатор сверхтяжелых элементов MASHA: 1 – мишень с горячей ловушкой, 2 – ЭЦР источник ионов, 3 – анализирующий магнит (D – дипольные, Q – квадрупольные, S – секступольные), 4 – фокальные детекторы [9]

Принцип работы масс-анализатора сверхтяжелых элементов MASHA (принцип ISOL) основан на разделении продуктов реакции пучка с мишенью по массам сразу после извлечения его из ионного источника.

Продукты реакции слияния вылетают из тонкой мишени и осаждаются на графитовом поглотителе, нагретым до температуры 1500 – 2000 К. Атомы сверхтяжелых элементов диффундируют в вакуумный объем и доставляются в ЭЦР источник, где ионизируются до заряда +1. Время диффузии атомов из графитового поглотителя и их доставка до камеры ионного источника не превышает 0,3 секунды. Затем, ионы сверхтяжелых элементов, ускоренные до энергий 38 кэВ, проходя через магнитную систему анализируются по массе и регистрируются детекторной системой. Схема ионного источника представлена на рисунке 14 [10].

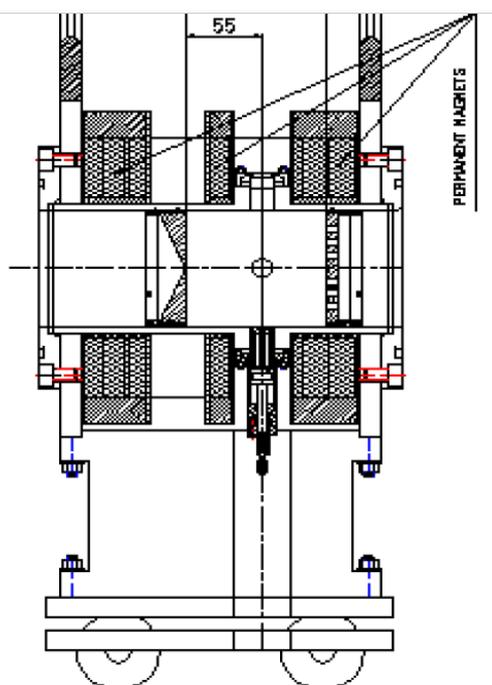


Рисунок 14 – 2,45 ГГц источник ионов [10]

2,45 ГГц источник ионов, представленный на рисунке 14, имеет два варианта магнитной конфигурации, основанной на постоянных кольцевых магнитах с разной намагниченностью. Первая конфигурация включает в себя три радиально намагниченных кольцевых постоянных магнитов, что позволяет создавать псевдозамкнутые резонансные поверхности (рис. 15) [10].

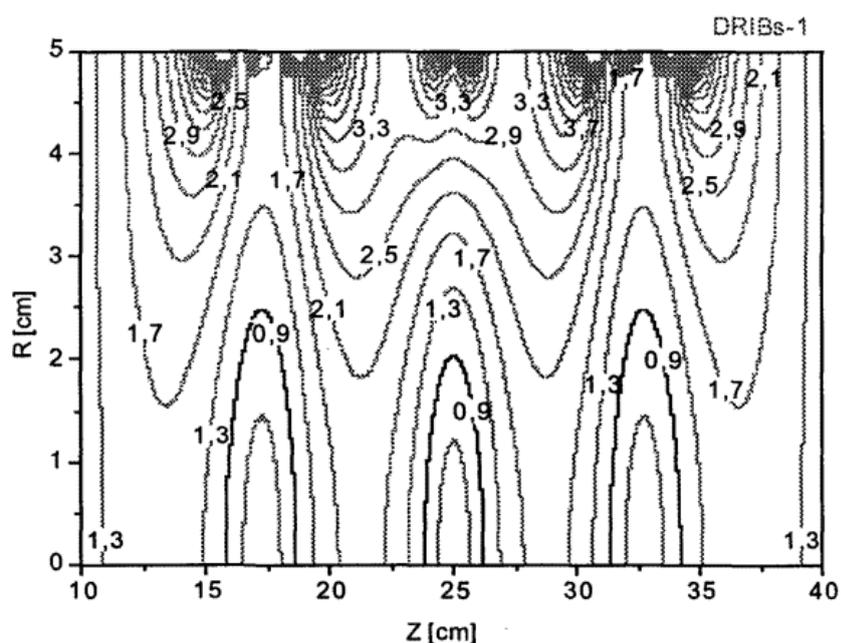


Рисунок 15 – Контуры магнитного поля ЭЦР-источника ионов (первый вариант сборки) [10]

Вторая магнитная конфигурация включает в себя два постоянных кольцевых магнита. Ось вращения каждого магнита наклонена к оси магнитной системы. Преимуществом такой конфигурации является возможность установить радиальные порты. Эти порты могут использоваться как для системы подачи СВЧ излучения, так и для системы ввода радиоактивных атомов. Контуры магнитного поля 2,45 ГГц ЭЦР-источника ионов представлены на рисунке 16 [10].

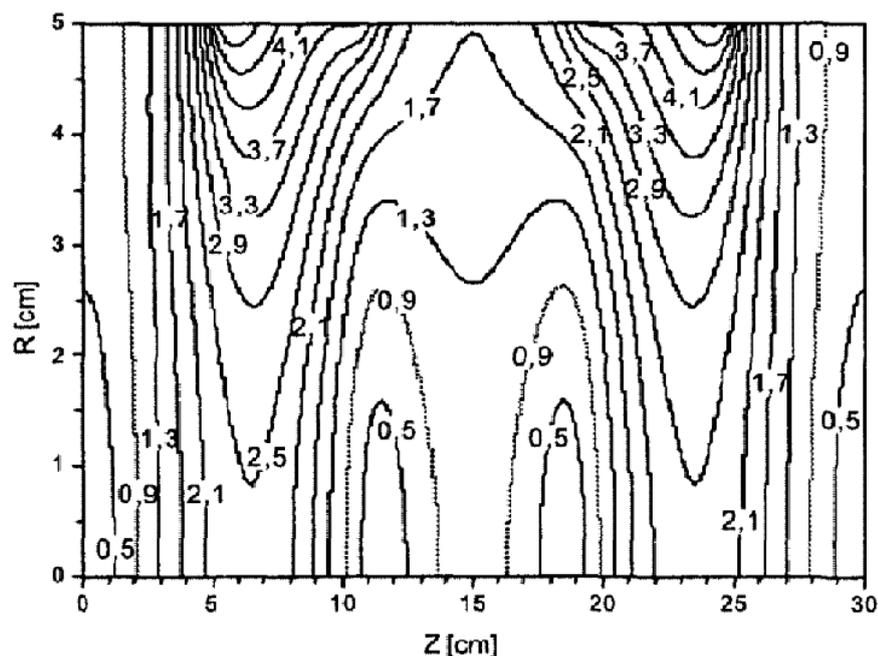


Рисунок 16 – Контуры магнитного поля ЭЦР-источника ионов (второй вариант сборки) [10]

Для предотвращения размагничивания постоянных магнитов под действием высокой температуры, плазменная камера оснащена водяной системой охлаждения. Система экстракции состоит из двух электродов. Диаметр отверстия плазменного электрода, находящегося в магнитном поле 1700 Гс, составляет 5 мм.

В Лаборатории также проводится разработка компактного ЭЦР источника на основе четвертьволнового коаксиального резонатора [11].

В работах [11, 12] показано, что время превращения атомов в ионы уменьшается с уменьшением объема плазменной камеры.

Применение компактного ЭЦР источника позволит снизить время ионизации и повысить эффективность имеющейся системы.

## 2.1 Компактные ЭЦР-источники ионов

Конструирование компактных ЭЦР-источников ионов идет во многих лабораториях мира (таблица 2).

Таблица 2 – Компактные ЭЦР-источники ионов

Лаборатория, название	Размеры	Частота	Ток	Магнитная система	Ввод СВЧ	Год
Франция, LPSC, (SUPERCOMIC 5,8 GHz) [12]	Ø41x15 мм (сборка)	5,8 ГГц	2,25 мА (Ar <sup>+</sup> ), 10 Вт, 6 мм	4 сегмента (кольцо)	Антенна	2014
Франция, LPSC, (COMIC 2,45 GHz) [12]	Ø70x150 мм (сборка)	2,45 ГГц	3 мкА (Ar <sup>+</sup> ). 5 Вт, Ø0,3 мм	4 сегмента (кольцо)	Антенна	2009
Франция, GANIL, (Minimono) [13]	Ø130x105 мм (сборка)	2,45 ГГц	252 мА (Ar <sup>+</sup> ), 30 Вт, Ø4 мм	2 кольца (NdFeB)	Антенна	2002
Китай, IMP (ECRIS 2,45 GHz) [14]	Ø70x70 мм (плазменная камера)	2,45 ГГц	90 мА (H <sup>+</sup> )	Кольцо (NdFeB) + соленоид	Волновод	1999
Корея, KUICR, JAEA [15]	Ø34x34 мм (пл. кам.), Ø120x60 (сборка)	6 ГГц	9 мА (H <sup>+</sup> ), 60 Вт, Ø5 мм	2 кольца (п. м)	Антенна	2016
Швейцария, PSI [16]	Ø56x42 мм (пл. кам), Ø140x80 (сборка)	2,5 ГГц	10 мА (H <sup>+</sup> ), 400 Вт, Ø3,8 мм	3 кольца (SmCo)	Прямоуг. волновод	2007
США, ORNL [17]	Ø64x51 мм (пл. кам)	2,45 ГГц	1 мА (Ar <sup>+</sup> ), 100 Вт, Ø6,2 мм	Подвижное кольцо	Антенна	1996
США, Microscience [18]	Ø55x120 мм (пл. кам)	2,45 ГГц	2 мА (Ar <sup>+</sup> ), 50 Вт, Ø2x65 мм	2 кольца (SmCo) + соленоид	Антенна	1994

Эффективность получения короткоживущих радиоактивных ионов сильно зависит от эффективности системы “мишень – источник ионов”, которая

включает в себя и тракт транспортировки продуктов реакции от мишени до источника. При этом система должна быть надежной, простой и дешевой. Для решения вышеописанной задачи во Франции (лаборатория GANIL) разработан источник «Minimono» [13] (рис. 17). Магнитная система состоит из двух кольцевых магнитов (NdFeB). Подача ВЧ мощности осуществляется по коаксиальному кабелю, номинальная рабочая мощность для большинства газов порядка 30 Вт.

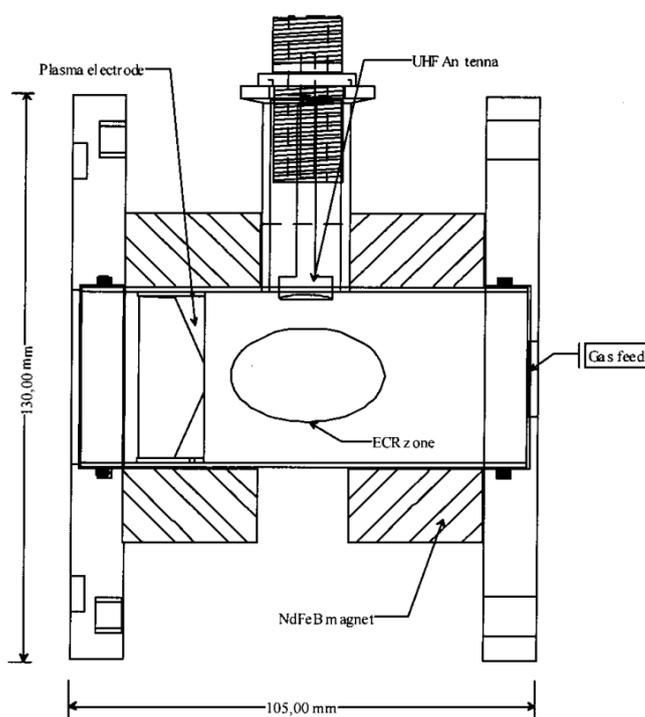


Рисунок 17 – Ионный источник Minimono [13]

Изменение свойств материалов после их облучения протонами, электронами, рентгеновскими лучами и т.д. в последнее время являются очень важной темой исследований в областях атомной и космической промышленности. Поэтому в лаборатории института современной физики (IMP) был разработан компактный микроволновый источник ионов (рис. 18), целью которого являлось создание интенсивного протонного пучка для исследования свойств материала после облучения ионным пучком. Подача ВЧ мощности осуществляется от магнетронного генератора по прямоугольному волноводу. Удержание плазмы осуществляется при помощи постоянных магнитов [14].

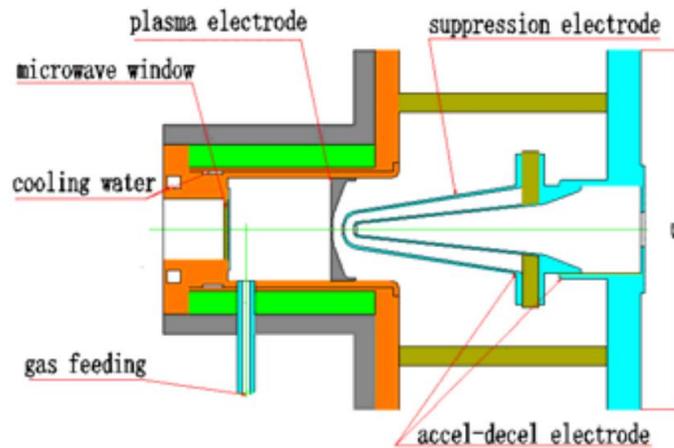


Рисунок 18 – Схема протонного источника [14]

Конструкция очень маленьких и маломощных источников ионов не обязательно предполагает получение очень малых токов. Так, например, в Лаборатории субатомной физики и космологии LPSC построили микроволновый источник ЭЦР, подходящий для производства малых или средних токов, которые могут производить большие токи путем объединения произвольно большого количества небольших устройств. Объединение систем происходило путем создания «сотовой структуры» (рис. 19) [12]. Несмотря на большое количество объединенных источников COMIC, мощность устройства составляет 3 Вт.

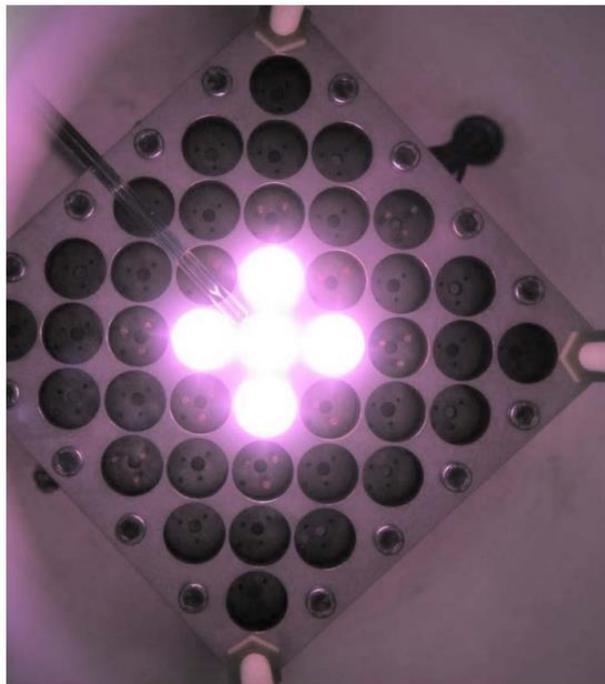


Рисунок 19 – Устройство из 41 источника COMIC [12]

### 3 2,45 ГГц ЭЦР-источник ионов на основе четвертьволнового коаксиального резонатора

#### 3.1 Разработка компактного ЭЦР-источника ЛЯР (ОИЯИ)

В 2016 году в Лаборатории Ядерных Реакций им. Г. Н. Флерова начались работы по созданию миниатюрного 2,45 ГГц ЭЦР источника, магнитная система которого состоит из радиально намагниченного кольца, изготовленного из постоянных магнитов (NdFeB) [19]. Источник планируется использовать на масс-сепараторе MASHA в качестве ЭЦР источника с высоким быстродействием.

Плазменная камера ЭЦР-источника представляет собой четвертьволновой коаксиальный резонатор (рис. 20), в котором создается электрическое поле с высоким значением напряженности между коаксиальным проводником и стенкой резонатора.

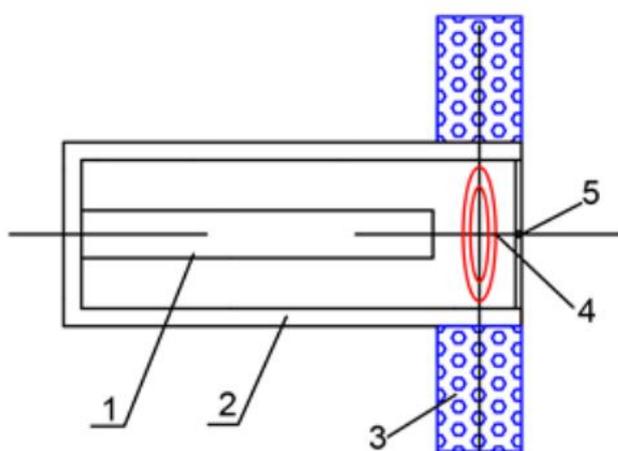


Рисунок 20 – ЭЦР-источник ионов на основе четвертьволнового коаксиального резонатора: 1 – центральный проводник коаксиального резонатора; 2 – корпус резонатора; 3 – магнитное кольцо; 4 – замкнутые поверхности магнитного поля; 5 – отверстие экстракции [19]

Магнитная система вышеописанного источника состоит из радиально намагниченного кольца с внешним диаметром 52 мм и внутренним диаметром 22 мм, толщина кольца составляет 10 мм (рис. 21). Аксиальное распределение

магнитного поля представлено на рисунке 22, контуры магнитного поля показаны на рисунке 23.

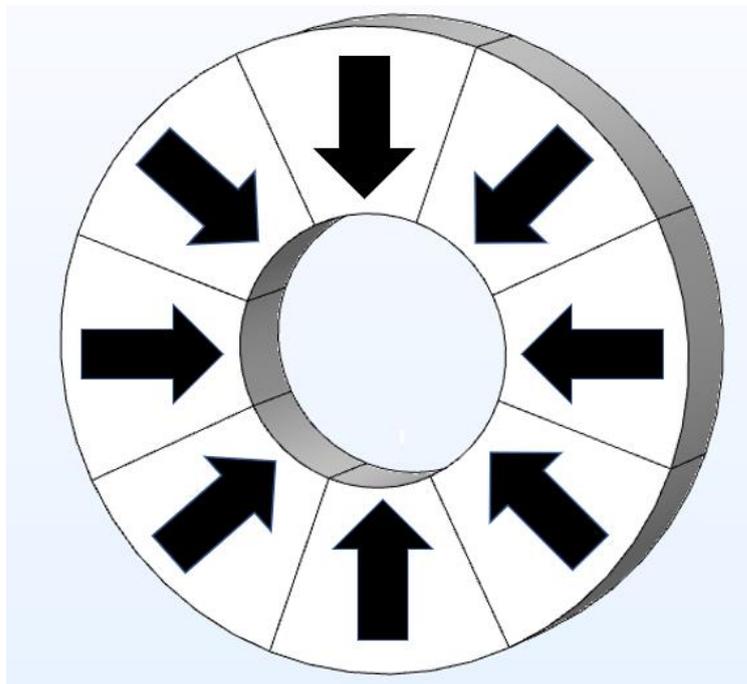


Рисунок 21 – Магнитное кольцо (направление намагниченности показано стрелками)

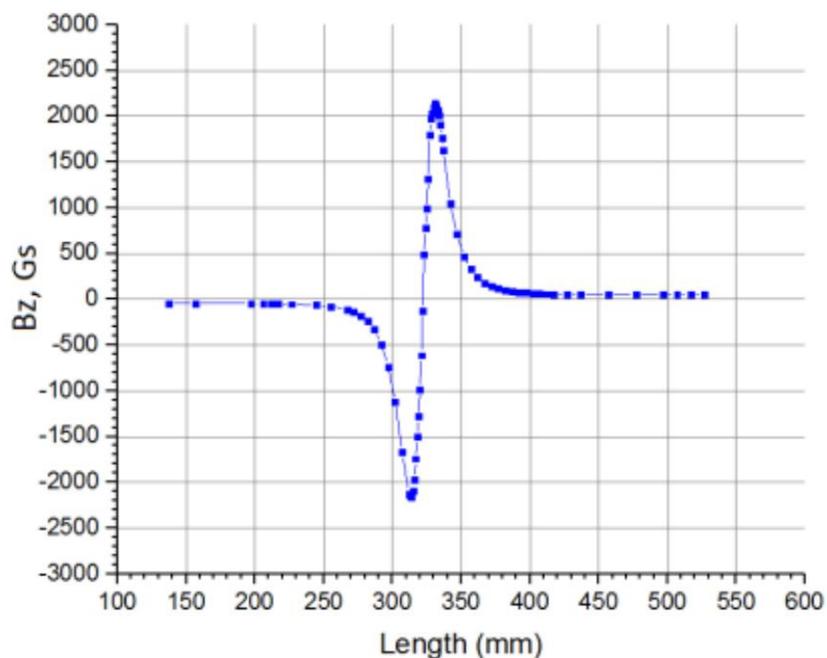


Рисунок 22 – Аксиальное распределение магнитного поля кольцевого магнита

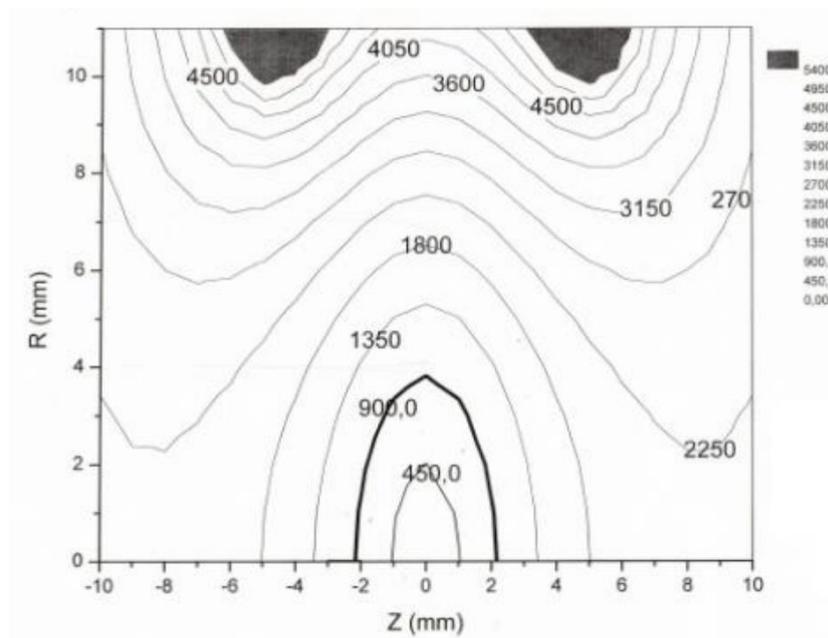


Рисунок 23 – Контуры магнитного поля, создаваемые магнитным кольцом [19]

### 3.2 Моделирование коаксиального резонатора для 2,45 ЭЦР-источника ионов

Для ввода СВЧ мощности использовался коннектор N-типа с KF16 фланцем (внутренний диаметр 16 мм, диаметр центрального проводника 7 мм). С конструктивной точки зрения была выбрана геометрия резонатора с коническим переходом (с 25 до 16 мм), диаметр которой соответствует внутреннему диаметру магнита. Модель резонатора с коническим переходом представлена на рисунке 24.

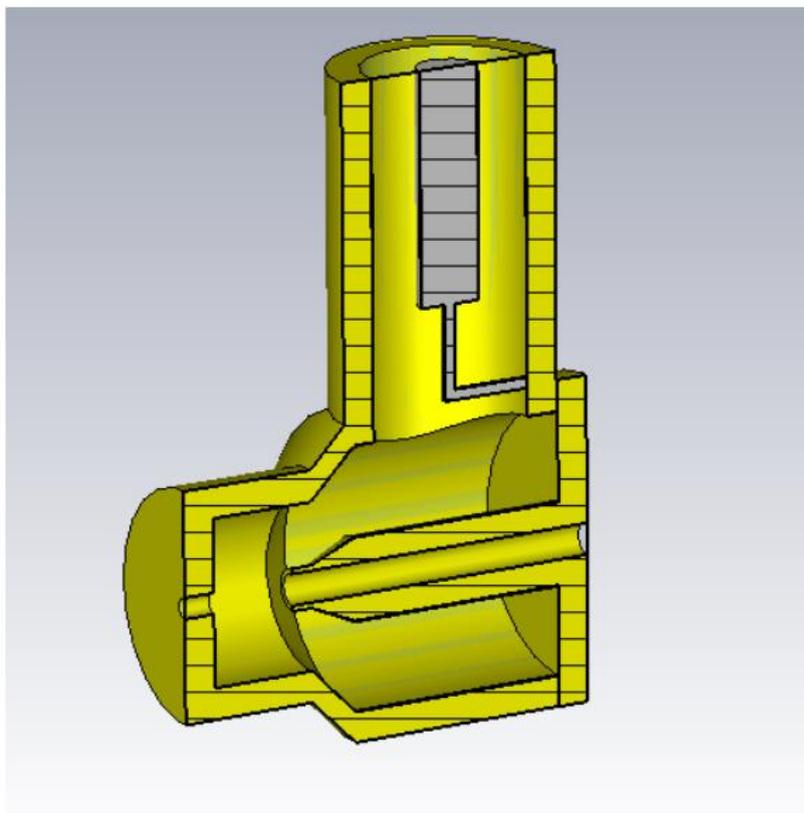


Рисунок 24 – Коаксиальный резонатор с петлей связи

Моделирование резонатора заключается в расчете геометрии источника для заданной частоты (2,45 ГГц) [19]. Для разрядного промежутка (5, 8, 10 мм), параметра  $G_{ap}$ , определялась необходимая длина широкой части резонатора  $L$ , для частоты 2,45 ГГц. Промежутки в 5, 8 и 10 мм позволяют производить захват замкнутых магнитных поверхностей в 850, 1313 и 1750 Гс. Размер  $S$  изменялся вместе с  $G_{ap}$  (в диапазоне от 1 до 3,5 мм) для того, чтобы центр магнита (центральная ось замкнутых магнитных линий) совпадал с центром разрядного промежутка (рис. 25). Выбор остальных размеров резонатора основывался на размерах имеющегося магнитного кольца, а также на размерах коаксиального ввода мощности (средства ввода мощности будут рассмотрены в следующей главе) [19]. Диаметр отверстия экстракции составил 2 мм.

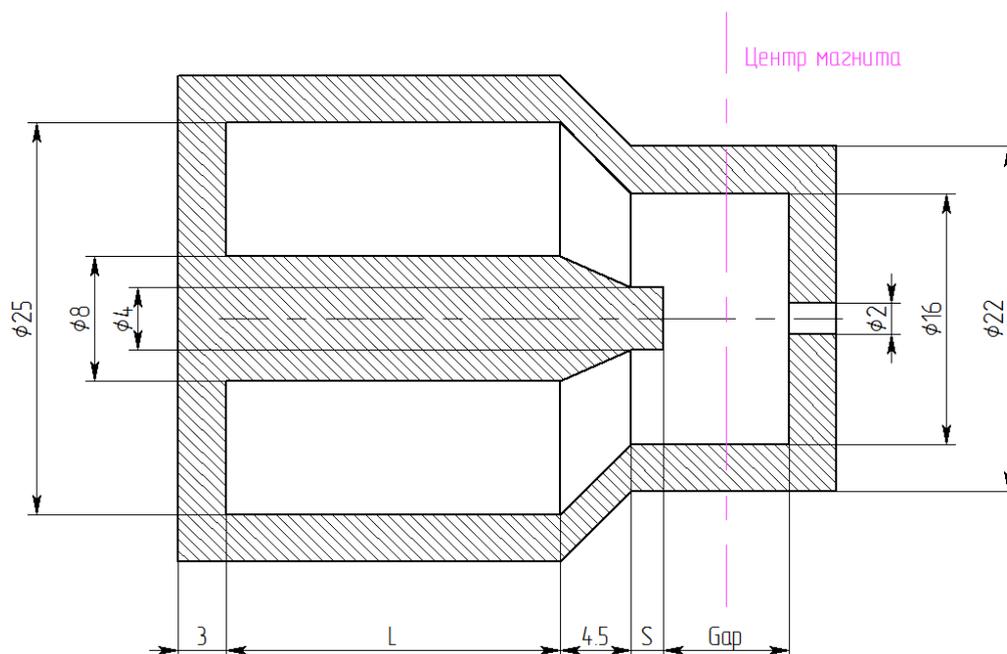


Рисунок 25 – Коаксиальный резонатор (плазменная камера источника)

Также было построено распределение магнитного и электрического полей в коаксиальном резонаторе (рис. 26). Исходя из рисунка 26, можно сделать вывод, что электрическое поле сосредоточено в зазоре, магнитное поле сосредоточено в основании центрального коаксиального проводника. Зависимость частоты резонатора  $f$  от длины его широкой  $L$  ( $14 \div 30$  мм) части представлена на рисунке 27. Значения длины широкой части резонатора  $L$  для различных зазоров (Gap), соответствующие частоте 2,45 ГГц представлены в таблице 3.

На рисунке 28 показаны значения электрического поля в зазоре резонатора в зависимости от мощности для различных размеров зазора 5, 8, 10 мм.

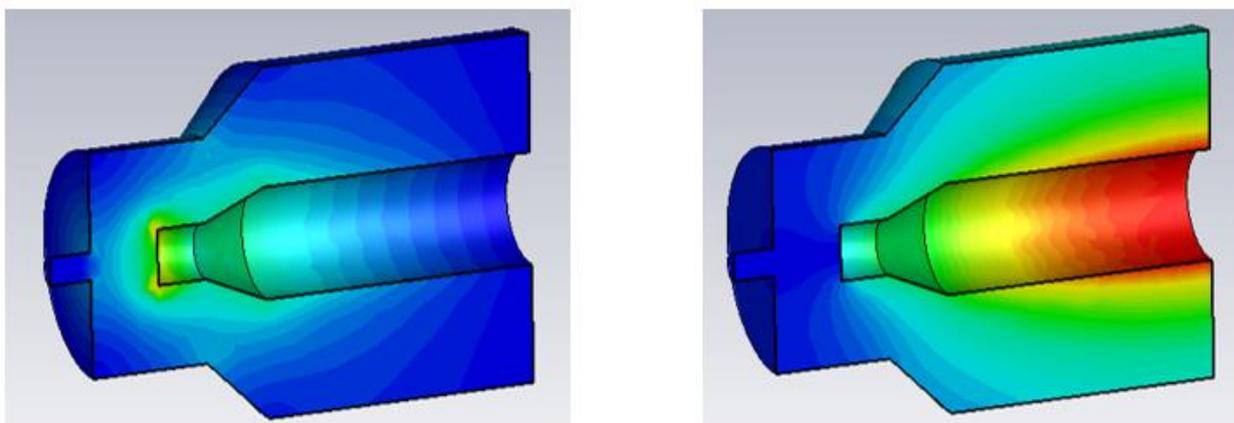


Рисунок 26 – Распределение электрического (слева) и магнитного полей (справа)

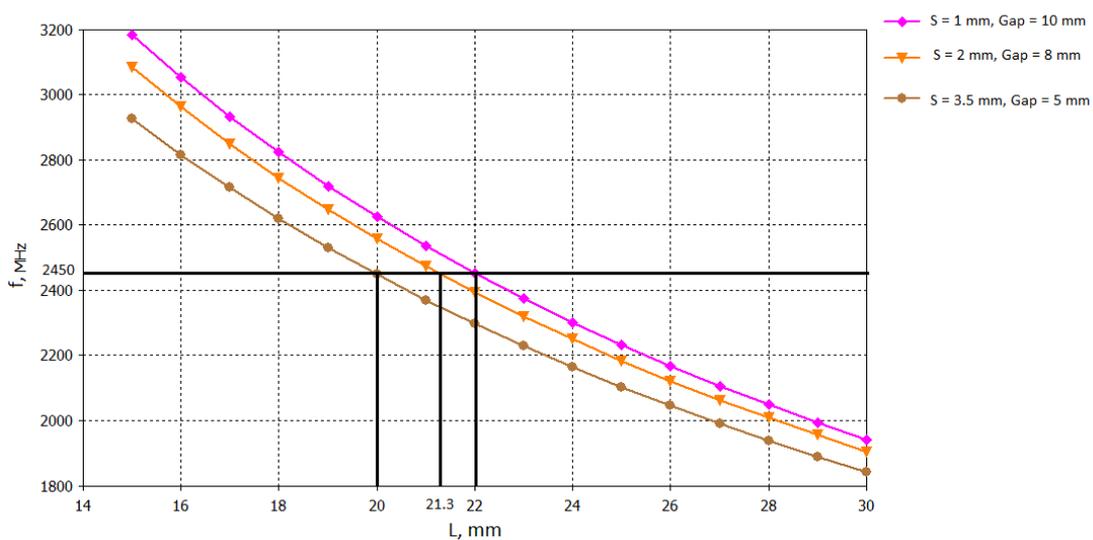


Рисунок 27 - Зависимости частоты резонатора  $f$  от длины его широкой части  $L$

Таблица 3 – Значение  $L$  при различных зазорах.

$B_{\max}$ , Гс	Gap, мм	$S$ , мм	$L$ , мм
1800	10	1	22
1350	8	2	21,3
900	5	3,5	20

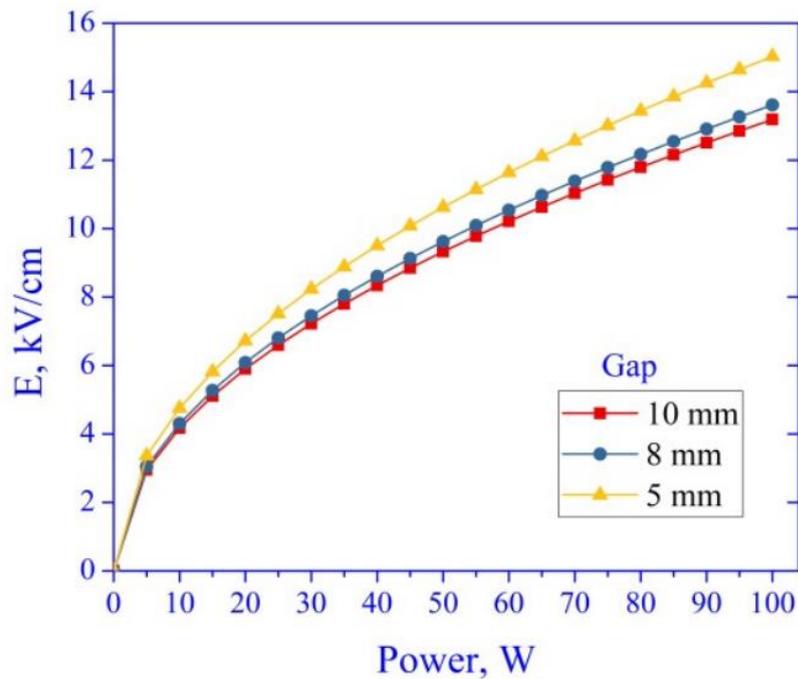


Рисунок 28 – Зависимость амплитуды электрического поля в зазоре от мощности [19]

Исходя из рисунка 28 можно сделать вывод, что вариант конструкции с наименьшим размером зазора создает поля с большей напряженностью.

### 3.3 Ввод мощности

Характеристики резонатора, такие как: добротность, частота, сопротивление изменяются при его нагрузке, поэтому при рассмотрении колебательной системы резонатора необходимо учитывать его связь с принимающими и передающими линиями.

Собственной добротностью резонатора принято называть отношение энергии, запасенной в резонаторе к мощности потерь в нем за один период колебаний, умноженный на  $2\pi$ :

$$Q_0 = \frac{\omega_r W}{P_l} = 2\pi f_r \frac{W}{P_l T_r}, \quad (38)$$

где  $\omega_r = 2\pi f_r$  – угловая резонансная частота,  $W$  – энергия, накопленная в резонаторе,  $P_l$  – мощность потерь в резонаторе,  $T_r = 1/f_r$  – период колебаний на резонансной частоте.

Помимо собственной добротности в системе также присутствует внешняя добротность  $Q_{ВН}$ , которая определяется следующим соотношением:

$$Q_{ВН} = \frac{P_{з.св}}{P_{р.рез}}, \quad (39)$$

где  $P_{з.св}$  – энергия, запасенная в устройстве связи,  $P_{р.рез}$  – энергия, рассеянная в резонаторе. Режим связи, когда  $Q_0 = Q_{ВН}$  называется критическим, он характеризуется отсутствием отраженной мощности.

Эффективность устройства связи оценивается коэффициентом передачи по мощности  $K_{П}$ , который определяется следующим соотношением:

$$K_{П} = \frac{P_{Н}}{P_{Г}}, \quad (40)$$

где  $P_{Н}$  – мощность, выделяющаяся на нагрузке,  $P_{Г}$  – мощность генератора.

Допустим, что частота и мощность генератора постоянны, мощность, выделяющаяся в нагрузке равна мощности, поступающей в резонатор:

$$K_{П} = \frac{|\dot{U}_{п1}|^2 - |\dot{U}_{о1}|^2}{|\dot{U}_{п1}|^2} = 1 - |\Gamma_{вх}|^2, \quad (41)$$

где  $\dot{U}_{п1}$ ,  $\dot{U}_{о1}$  – нормированные амплитуды падающей и отраженной волн,  $\Gamma_{вх}$  – комплексный коэффициент отражения от входа резонатора:

$$|\Gamma_{вх}| = |(1 - \bar{Y}) / (1 + \bar{Y})|, \quad (42)$$

где  $\bar{Y}$  – полная проводимость резонатора:

$$\bar{Y} = (Q_{ВН}/Q_0)(1 + ia_{Н}), \quad (43)$$

где  $a_{Н}$  – обобщенная частотная расстройка:

$$a_n = \frac{2Q_0\Delta\omega}{\omega_0}. \quad (44)$$

Подставим (42) и (43) в (41) получим:

$$K_n = K_{n0}/(1 + a_n^2), \quad (45)$$

где  $K_{n0}$  – коэффициент передачи на резонансной частоте:

$$K_{n0} = \frac{4Q_0/Q_{вн}}{(1 + \frac{Q_0}{Q_{вн}})^2}, \quad (46)$$

Резонатор является согласованным с передающей линией в случае следующего значения добротностей:  $Q_0 = Q_{вн}$ , при таком условии значение  $K_{n0}$  является наибольшим ( $K_{n0} = 1$ ).

Еще одним важным параметром, характеризующим линию передачи, является коэффициент стоячей волны (КСВ). КСВ – это отношение на наибольшего значения амплитуды напряженности электрического или магнитного поля стоячей волны в линии передачи к наименьшему:

$$K_{св} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}, \quad (47)$$

При  $|\Gamma| = 0$  и амплитуды падающей и бегущей волны совпадают, КСВ имеет наименьшее значение ( $K_{св} = 1$ ). В реальных установках, приемлемое значение КСВ лежит в диапазоне  $1,1 \div 2,0$ .

ТЕ (ТМ) волны широко используются в коаксиальных структурах. Электромагнитное поле ТЕ (ТМ) волны в коаксиальной структуре заключено в пространстве между внутренним и наружным металлическим проводниками линии (рис. 29) [20].

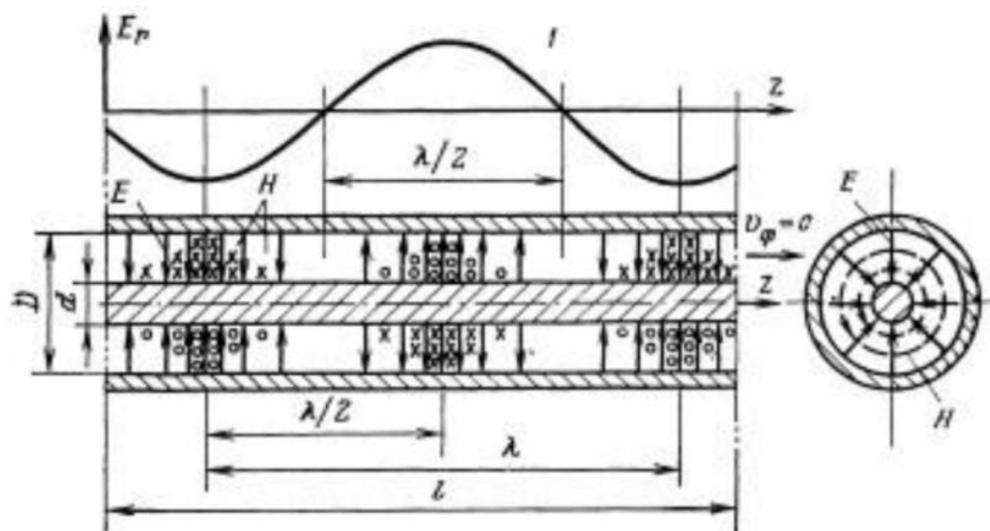


Рисунок 29 – Структура электрического и магнитного полей бегущей волны типа TE (TM) в коаксиальной линии [20]

КСВ в данном случае можно определить как отношение наибольшего значения амплитуды напряжения к меньшему (КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению).

Ввод мощности в цилиндрический резонатор может осуществляться при помощи подводящего волновода (рис. 30), петель связи (рис. 31) или штырем (рис. 32).

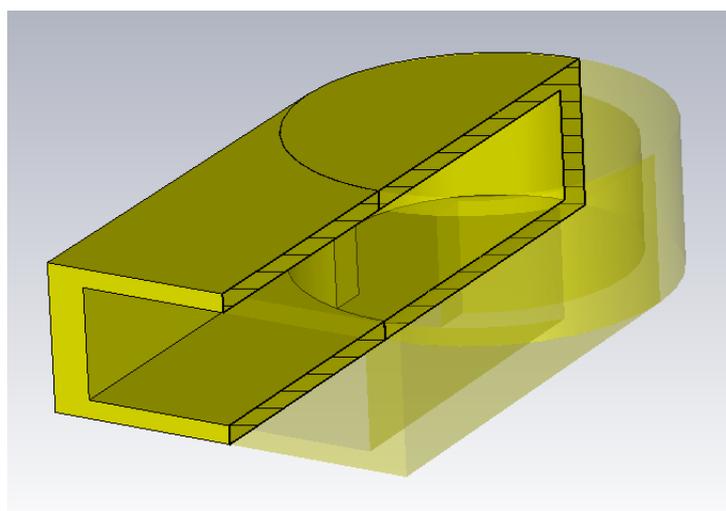


Рисунок 30 – Ввод мощности в цилиндрический резонатор подводящим волноводом

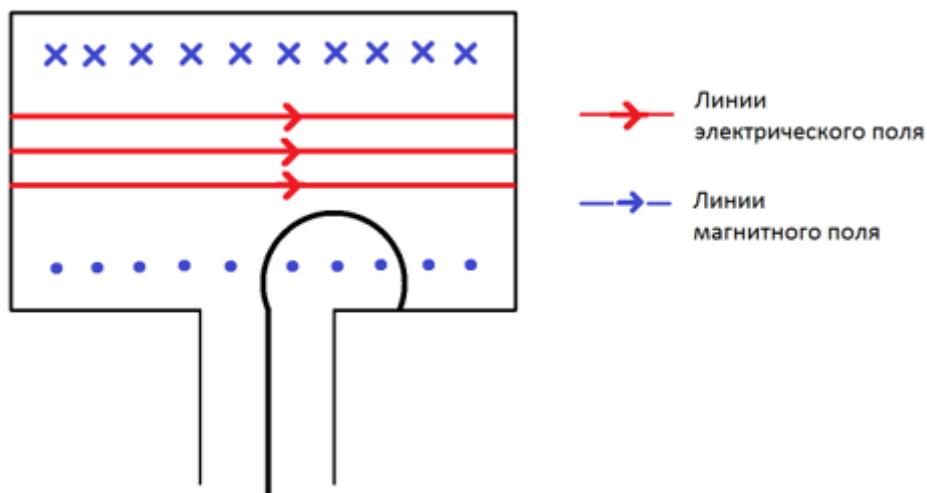


Рисунок 31 – Отрезок коаксиальной линии как устройство связи (петля связи)

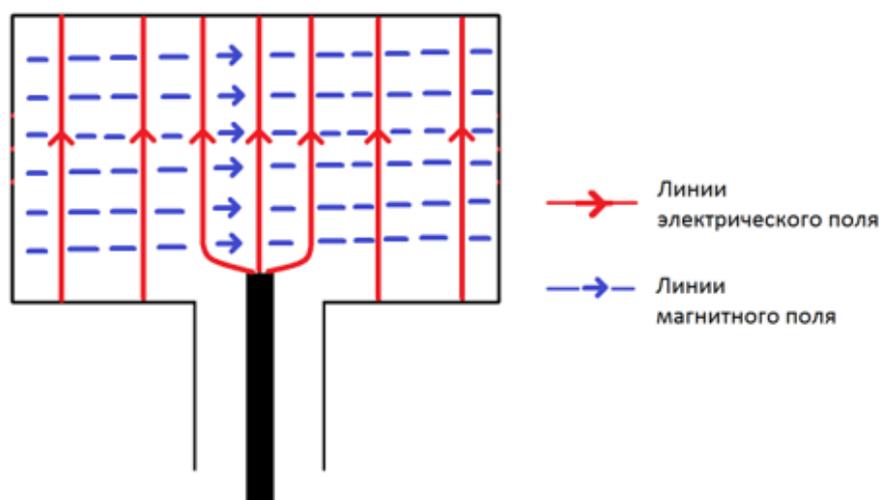


Рисунок 32 – Отрезок коаксиальной линии как устройство связи (штырь)

Ввиду небольших размеров резонатора, в данной работе для связи генератора и резонатора ЭЦР-источника ионов, используется устройство, работающее на отрезке коаксиальной линии (рис. 33).



Рисунок 33 – Коаксиальный вакуумный ввод N-типа на 50 Ом

Индуктивная связь (рис. 34) осуществляется при помощи петли связи, петля связи размещается в пучности магнитного поля, перпендикулярно линиям индукции магнитного поля.

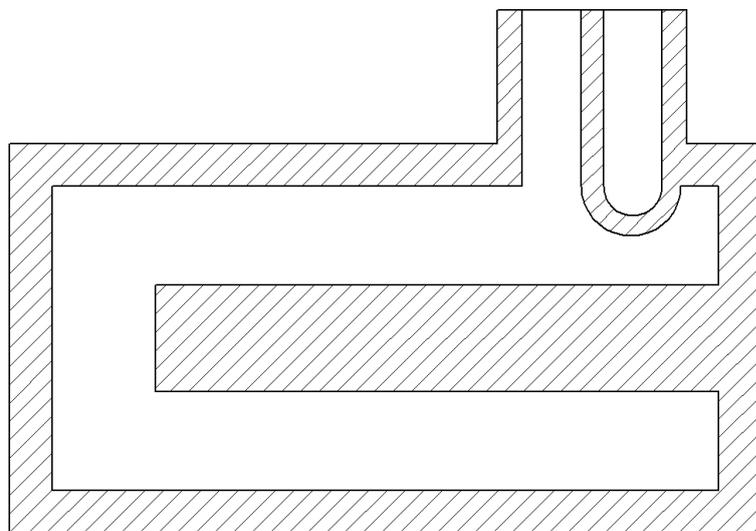


Рисунок 34 – Индуктивная связь

При индуктивной связи может осуществляться ее регулировка за счет изменения положения петли. Виток связи изготавливается из проводника круглого, квадратного или прямоугольного сечения. Использование индуктивной связи позволяет не нарушать электрической прочности резонатора. Индуктивная связь нашла широкое применение при конструировании

электрофизических установок в связи с простотой установления устройства связи в область максимального магнитного поля.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности разработки и планирование коммерческой ценности конечного продукта, производимых в рамках ИР. Коммерческая ценность проекта определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными проектами, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на такие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, какой бюджет исследовательской работы, какое время будет необходимо для продвижения проекта на рынок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Определить потенциальных потребителей результатов исследования.
- Провести анализ конкурентных технических решений.
- Выполнить SWOT-анализ: описать сильные и слабые стороны проекта, выявить возможности и угрозы для реализации проекта.
- Оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации.
- Построить календарный план-график проведения работ научно-исследовательского проекта.
- Рассчитать бюджет научного исследования.
- Определить ресурсную, финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективность исследования.

### **5.1 Предпроектный анализ**

#### **5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка.

Сегмент рынка – группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

В зависимости от категории потребителей необходимо использовать соответствующие критерии сегментирования. Для коммерческих организаций критериями сегментирования могут быть: месторасположение, отрасль, выпускаемая продукция. Для физических лиц критериями сегментирования могут быть: возраст, национальность, образование [21].

Сегментировать рынок услуг по разработке математической модели можно по следующим критериям: формирование портфеля, управление портфелем.

Услуги по формированию портфеля:

- инвестиционные компании;
- инвесторы (физ. лица);

Услуги по управлению портфелем:

- инвестиционные компании;
- инвесторы (физ. лица).

Объектом исследования является 2.45 ГГц ЭЦР-источник ионов на основе четвертьволнового коаксиального резонатора. Потенциальными потребителями данной разработки можно считать НИИ, проект DRIBs, реализуемый в настоящее время в ЛЯР ОИЯИ, посвященный исследованию свойств атомных ядер в реакциях с вторичными радиоактивными ионными пучками. Карта сегментирования рынка услуг представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Карта сегментирования рынка услуг

		Организация	
		Коммерческие организации	Исследовательские центры (НИИ, РФФ)
Область применения	Получение чистой плазмы		
	Научно-исследовательская работа		

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 ионной-имплантацией, т.к. для имплантации ионов необходимы достаточные энергии пучков. Эти организации могут являться как прямыми потребителями, так и компаниями-перекупщиками.

### 5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Кф – компактный 2.45 ГГц ЭЦР-источник ионов на основе четвертьволнового коаксиального резонатора.

К1 – первый конкурент, это пассивные источники плазмы.

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 [22]. Суть их сводится к возникновению поверхностных пробоев в местах неоднородностей электрического поля в результате накопления заряда электронного тока утечки, выбирания вторичных электронов и стимулированной десорбации 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.

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  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> 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.

Проведем данный анализ с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 5. Позиция разработки и конкурентов оценивается по пятибалльной шкале. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		БФ	БК1	БК2	КФ	КК1	КК2
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 плазмы	0.2	5	3	5	1	0.6	1
3. Высокая плотность плазмы	0.1	5	4	4	0.5	0.4	0.4
4. Однородность плазмы на всей площади	0.1	3	5	4	0.3	0.5	0.4
5. Высокоточная дозировка газа при напуске	0.05	5	4	4	0.25	0.2	0.2
6. Безэлектродный разряд	0.1	5	5	5	0.5	0.5	0.5
7. Однородный ионный пучок (все ионы одного сорта)	0.1	5	2	3	0.5	0.2	0.3
8. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0.05	4	4	5	0.2	0.2	0.25
9. Простота эксплуатации	0.1	5	5	4	0.5	0.5	0.4
<b>Итого</b>	1	42	33	36	4.75	3.3	4.05

Анализируя рынок конкурентов (таблица 2), можно сделать вывод, что полученная установка может очень успешно конкурировать с популярными на

сегодняшний день лазерными источника плазмы. В самых весомых критериях (высокая скорость нарастания плазмы, однородность ионного пучка, высокая плотность плазмы, высокая ионизация плазмы) наш источник проявил себя не хуже решений конкурентов, а порой даже лучше [23]. Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

### 5.1.3 SWOT-анализ

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

В таблице 6 представлен SWOT-анализ в виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 6 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
<b>Возможности:</b> В1. Дальнейшая модернизация схемы, уменьшение размеров и увеличение быстродействия натекания газа; В2. Необходимость использования дистанционного управления в серьёзных научных исследованиях, с целью получения более точных результатов. В3. Необходимость использования источника с различными измерительными и экспериментально-	С1. Возможность получения низкоэнергетических ионов высоких плотностей; С2. Возможность применения в ионной имплантации; С3. Возможность очистки любых поверхностей;	Сл1. трудности при подборе необходимых компонентов; Сл2. Сложные теоретические расчёты.

исследовательскими устройствами, которым требуется индуктор плазмы.		
<b>Угрозы:</b> У1. Отсутствие коммерческого интереса к проекту; У2. Выход из строя транзисторного СВЧ-генератора; У3. Поломка измерительной техники.	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, 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.

#### 5.1.4 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 таблице 7.

Таблица 7 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
ЛЯР (ОИЯИ)	Получения результатов исследования 2.45 ГГц ЭЦР-источника ионов, а именно получение высокоинтенсивных однозарядных ионов
РНФ	

В таблице 8 необходимо представить информацию о иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 8 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта</b>	Исследование характеристик 2.45 ГГц ЭЦР-источника ионов на основе четвертьволнового коаксиального резонатора
<b>Ожидаемые результаты</b>	Получение высокоинтенсивного пучка однозарядных ионов
<b>Критерии приемки результата проекта</b>	Диагностика и анализ характеристик 2.45 ГГц ЭЦР-источника ионов
<b>Требования к результату проекта</b>	<b>Требование</b>
	Высокая скорость нарастания плазмы
	Согласование источника с линией передачи
	Однородный ионный пучок
	Высокоточная дозировка газа при напуске
	Высокая интенсивность пучка ионов

## 5.2 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 9.

Таблица 9 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
1	Богомолов С.Л., ОИЯИ ЛЯР, НТОУ, начальник сектора ионных источников	Руководитель проекта	Отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта	62
2	Берестов К.И., ТПУ, магистрант	Исполнитель по проекту	Выполнение отдельных работ по проекту.	492
Итого				554

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.

### 5.3 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. В таблице 10 показаны значения ограничений проекта.

Таблица 10 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
Бюджет проекта	465217.8
Источник финансирования	ОИЯИ ЛЯР
Сроки проекта	4 месяца
Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2022
Дата завершения проекта	21.05.2022

#### 5.4 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 11.

Таблица 11 – 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	4	01.02.2022	04.02.2022	Руководитель
2	Изучение литературы и анализ существующих плазменных источников	27	04.02.2022	02.03.2022	Магистр





**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 13 – Оборудование для эксперимента

Наименование	Марка	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Генераторный модуль, ГМ2425-100	РАДИС	1	1625000	1625000
Вольтметр, В7-40/4	РОССИЯ и СНГ	1	33000	33000
Источник питания постоянного тока ES 030-10	Delta Elektronika BV	1	115810	115810
Источник питания постоянного тока ES 0300-045	Delta Elektronika BV	1	65704	65704
Вакуумный клапан, КВР-25	ВАКУУММАШ	4	12200	48800
Автоматизированная система напуска газов СНА-2	ИНЖЕКТ	1	200000	200000
Турбомолекулярный насос ВВ-150	Завод Измеритель	1	176000	176000
Форвакуумный насос DUO 20 M	PFEIFFER VACUUM	1	231000	231000
Вакуумметр TPG362	PFEIFFER VACUUM	1	206800	206800
Вакуумная арматура	EASTVACUUM	1	176000	176000
Итого				2878114

Таблица 14 – Цифровые продукты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Windows 10 Домашняя	-	1	12850	12850
Microsoft Office	Подписка на 1 год	1	4500	4500
Autodesk Inventor	Подписка на 1 год	1	183000	183000
Итого				200350

Срок полезного использования (СПИ) вакуумного клапана КВР-25 составляет 8 лет, тогда норма амортизации будет составлять:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{8} = 0.125$$

Тогда общая сумма амортизационных отчислений будет составлять:

$$A = \frac{H_A \times M}{365} d = \frac{0.125 \times 48800}{365} \times 30 = 501.36$$

Амортизационные отчисления для других комплектующих изделий представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Амортизационные отчисления

Наименование	Амортизация, руб
Генераторный модуль, ГМ2425-100	13356
Вольтметр, В7-40/4	271.2
Источник питания постоянного тока ES 030-10	951.8
Источник питания постоянного тока ES 0300-045	540
Вакуумный клапан, КВР-25	501.3
Автоматизированная система напуска газов СНА-2	1369.8
Турбомолекулярный насос ВВ-150	4821.9
Форвакуумный насос DUO 20 М	4249.3
Вакуумметр ТРГ362	3399.4
Вакуумная арматура	2903
Windows 10 Домашняя	528

Microsoft Office	1109.5
Autodesk Inventor	48131.5
Итого	82132.7

### 5.7 Основная заработная плата исполнителей темы

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

$$Z_{ЗП} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

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

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{ЗП} = Z_{осн} + T_p,$$

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

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 16).

Таблица 16 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52	52
-выходные дни	14	14

-праздничные дни		
Потери рабочего времени -отпуск	48	48
Невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{пр} + k_D) \cdot k_p,$$

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

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

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

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

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 17.

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$Z_M = 70000 \cdot (1 + 0.3) \cdot 1.3 = 118300 \text{ руб.}$$

$$Z_{дн} = \frac{118300 \cdot 10.4}{251} = 4901.67 \text{ руб.}$$

$$Z_{осн} = 4901.67 \cdot 32 = 156853.4 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для исполнителя:

$$Z_M = 14800 \cdot (1 + 0.3) \cdot 1.3 = 25012 \text{ руб.}$$

$$Z_{дн} = \frac{25012 \cdot 10.4}{251} = 1036,36 \text{ руб.}$$

$$Z_{осн} = 1036,36 \cdot 85 = 88090.6 \text{ руб.}$$

Таблица 17 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	$k_{пр}$	$k_p$	$Z_M$ , руб	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Научный руководитель	70000	0,3	1,3	118300	4901,67	32	156853.4

Исполнитель	14800	0,3	1,3	25012	1036,36	85	88090.6
Итого:							244944

Отразим 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:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

$k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды приведем в таблице 18.

Таблица 18 – Расчет отчислений во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.
Научный руководитель	156853.4
Исполнитель	88090.6
Коэффициент отчислений	0,302
Итого:	73973.1

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы 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. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 19.

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергию и т.д. Рассчитывается общая сумма накладных расходов следующим образом:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \times (\text{сумма статей 1} - 3) = 0,16 \times (73973.1 + 244944 + 82132.7) = 64167.97 \text{ руб.}$$

$k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы, 16%

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы 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. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 16.

Таблица 19 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Амортизация нематериальных активов	82132.7
2. Основная заработная плата	244944
3. Отчисления во внебюджетные фонды	73973.1
4. Накладные расходы	64167.97
Бюджет затрат:	465217.8

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и исполнителя, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) и накладные расходы предприятия. Бюджет затрат составил 60565.73 рублей.

## 5.8 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 [25]. Информация по данному разделу была сведена в таблицу 20.

Таблица 20 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность	Влияние	Уровень риска*	Способ смягчения риска
1	Неточность экспериментальных данных	Сложности при сравнении расчетных и реальных характеристик пучка	1	3	Низкий	Поиск данных с других 2.45 ГГц источников ионов
2	Поломка ноутбука	Затруднение проведения вычислений	3	4	Выше среднего	Предоставлен студенту рабочего места с компьютером и необходимым ПО

### 5.9 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:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где  $I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i}$  -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 разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_{pi} = \sum a_i b_i,$$

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.

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

Исп.2 – Диагностика пучка с помощью вытягивающего электрода.

Таблица 21 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Соответствие теории и эксперимента	0,25	4	4
2. Удобство в эксплуатации	0,10	3	5
3. Сложность установки в существующие устройства	0,30	5	2
4. Стоимость внедрения	0,20	4	3
5. Время проведения измерений	0,15	3	4
Итого	1	19	18

$$I_{p-исп1} = 0.25 \cdot 4 + 0.1 \cdot 3 + 0.3 \cdot 5 + 0.2 \cdot 4 + 0.15 \cdot 3 = 4.05$$

$$I_{p-исп2} = 0.25 \cdot 4 + 0.1 \cdot 5 + 0.3 \cdot 2 + 0.2 \cdot 3 + 0.15 \cdot 4 = 3.3$$

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

$$I_{исп.i1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{фин.i}}, I_{исп.i2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{фин.i}}$$

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

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{p-исп2}}$$

Таблица 22 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.05	3.3
3	Интегральный показатель эффективности	4.05	3.3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.22	0.81

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.

## **6 Социальная ответственность**

Социальная ответственность - ответственность отдельного ученого и научного сообщества перед обществом. Первостепенное значение при этом имеет безопасность применения технологий, которые создаются на основе достижений науки, предотвращение или минимизация возможных негативных последствий их применения, обеспечение безопасного как для испытуемых, как и для окружающей среды проведения исследований.

В данной работе исследовались характеристики 2.45 ГГц ЭЦР-источника ионов на основе четвертьволнового коаксиального резонатора. Работа выполнялась в Лаборатории ядерных реакций им. Флёрва (ОИЯИ). Раздел также включает в себя оценку условий труда на рабочем месте, анализ вредных и опасных факторов труда, разработку мер защиты от них.

### **6.1 Производственная безопасность**

#### **6.1.1 Освещенность**

Согласно СНиП 23-05-95 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 300 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на

должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения  $A = 7$  м, ширина  $B = 6$  м, высота = 3,5 м. Высота рабочей поверхности над полом  $h_p = 1,0$  м. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:

$$S = A \times B,$$

где  $A$  – длина, м;

$B$  – ширина, м.

$$S = 7 \times 6 = 42 \text{ м}^2$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор  $\rho_c = 50\%$ , свежепобеленного потолка  $\rho_{п} = 70\%$ . Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_z = 1,5$ . Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп  $Z = 1,1$ .

Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которой равен  $\Phi_{ЛД} = 2600$  Лм.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda = 1,1$ , расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,3$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом, высота подвеса,

$h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР:  $h_n = 3,5$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2,0 \text{ м}$$

Найдём число ламп  $N$ :

$$\Phi_{л} = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{л}} \cdot \eta$$

$\eta$  определяем через индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{7 \cdot 6}{2,0 \cdot (7 + 6)} = 1,6$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при  $\rho_{п} = 70 \%$ ,  $\rho_{с} = 50\%$  и индексе помещения  $i = 1,6$  равен  $\eta = 0,47$ .

Тогда:

$$\Phi_{л} = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{л}} \cdot \eta = \frac{300 \cdot 42 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2600} \cdot 0,47 = 17;$$

принимая 18 ламп, при этом получается 9 светильников, т.е. 3 ряда по 3 светильника.

Из условий равномерности освещения определяем расстояния  $L_1$  и  $L_1/3$  и  $L_2$  и  $L_2/3$  по следующим уравнениям:

$$7000 = 2 \cdot L_1 + \frac{2}{3L_1} + 3 \cdot 265; L_1 = 2327 \text{ мм}; \frac{L_1}{3} = 775 \text{ мм}$$

$$6000 = 2 \cdot L_2 + \frac{2}{3L_2} + 3 \cdot 1227; L_2 = 870 \text{ мм}; \frac{L_2}{3} = 290 \text{ мм}$$

На рисунке 56 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

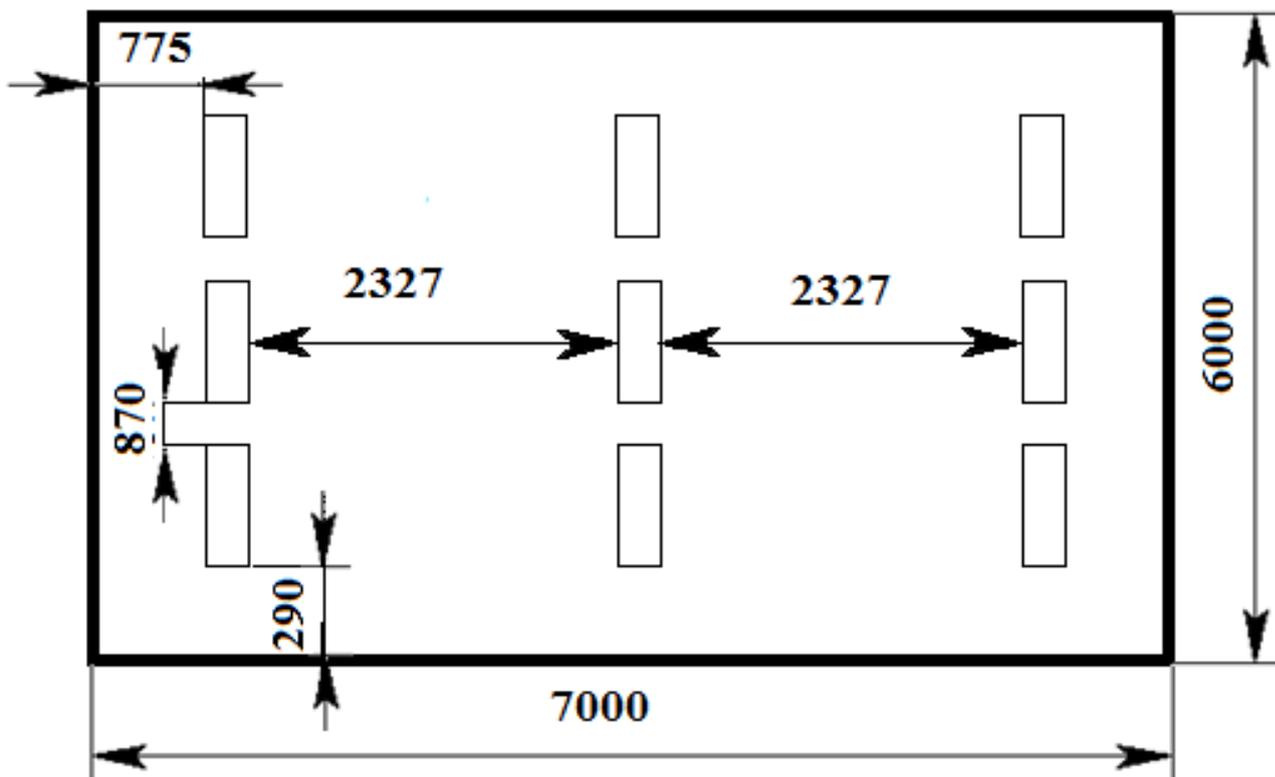


Рисунок 56 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Индекс помещения определяется по формуле:

Потребный световой поток люминесцентной лампы определяется по формуле:

$$\Phi_{л} = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{л}} \cdot \eta = \frac{300 \cdot 42 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{18} \cdot 0,47 = 2457,44 \text{ лм}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{лД} - \Phi_{лП}}{\Phi_{лД}} \cdot 100\% \leq 20\%;$$

$$\frac{\Phi_{лД} - \Phi_{лП}}{\Phi_{лД}} \cdot 100\% = \frac{2600 - 2457,44}{2600} \cdot 100\% = 5,5\%.$$

Таким образом, мы получили, что необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Теперь рассчитаем мощность осветительной установки:

$$P = 18 \cdot 40 = 720 \text{ Вт}$$

### 6.1.2 Отклонение показателей микроклимата в помещении

Проанализируем микроклимат в помещении, где находится рабочее место. Микроклимат производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Эти факторы влияют на организм человека, определяя его самочувствие.

Оптимальные и допустимые значения параметров микроклимата приведены в таблице 22 и 23.

Таблица 22 - Оптимальные нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	19-23	40-60	0.1
Теплый	23-25		0.2

Таблица 23 - Допустимые нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
	Нижняя допустимая граница	Верхняя допустимая граница		
Холодный	15	24	20-80	<0.5
Тёплый	22	28	20-80	<0.5

Температура в теплый период года 23-25°С, в холодный период года 19-23°С, относительная влажность воздуха 40-60%, скорость движения воздуха 0.1 м/с.

Общая площадь рабочего помещения составляет 30 м<sup>2</sup>, объем составляет 105 м<sup>3</sup>. По СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 санитарные нормы составляют 6.5 м<sup>2</sup> и 20 м<sup>3</sup> объема на одного человека. Исходя из приведенных выше данных, можно

сказать, что количество рабочих мест соответствует размерам помещения по санитарным нормам.

После анализа габаритных размеров рассмотрим микроклимат в этой комнате. В качестве параметров микроклимата рассмотрим температуру, влажность воздуха, скорость ветра.

В помещении осуществляется естественная вентиляция посредством наличия легко открываемого оконного проема (форточки), а также дверного проема. По зоне действия такая вентиляция является общеобменной. Основной недостаток - приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания. Согласно нормам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, объем воздуха необходимый на одного человека в помещении без дополнительной вентиляции должен быть более 40 м<sup>3</sup> [26]. В нашем случае объем воздуха на одного человека составляет 45 м<sup>3</sup>, из этого следует, что дополнительная вентиляция не требуется. Параметры микроклимата поддерживаются в холодное время года за счет систем водяного отопления с нагревом воды до 100°С, а в теплое время года – за счет кондиционирования, с параметрами согласно [27]. Нормируемые параметры микроклимата, ионного состава воздуха, содержания вредных веществ должны соответствовать требованиям [28].

### **6.1.3 Превышение уровня шума**

Одним из наиболее распространенных в производстве вредных факторов является шум. Он создается рабочим оборудованием, преобразователями напряжения, рабочими лампами дневного света, а также проникает снаружи. Шум вызывает головную боль, усталость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, память ухудшается, реакция уменьшается.

Основным источником шума в комнате являются компьютерные охлаждающие вентиляторы и. Уровень шума варьируется от 35 до 42 дБА. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, при выполнении основных работ на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 82 дБА [29].

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

1. устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
2. изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов);
3. применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;
4. балансировка вращающихся деталей.

Средства индивидуальной защиты:

1. применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

#### **6.1.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений**

Источником электромагнитных излучений в нашем случае являются дисплеи ПЭВМ. Монитор компьютера включает в себя излучения рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной области, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см вокруг ВДТ не должна превышать 25В/м в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц, 2,5 В/м в диапазоне от 2 до 400 кГц [26]. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц 250 нТл, и 25 нТл в диапазоне от 2 до 400 кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500 В [26]. В ходе работы использовалась ПЭВМ типа Lenovo IdeapadGaming со следующими характеристиками: напряженность электромагнитного поля 2,5 В/м; поверхностный потенциал составляет 450 В (основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.) [30].

При длительном постоянном воздействии электромагнитного поля (ЭМП) радиочастотного диапазона при работе на ПЭВМ у человеческого организма сердечно-сосудистые, респираторные и нервные расстройства, головные боли, усталость, ухудшение состояния здоровья, гипотония, изменения сердечной мышцы проводимости. Тепловой эффект ЭМП характеризуется увеличением температуры тела, локальным селективным нагревом тканей, органов, клеток за счет перехода ЭМП на теплую энергию.

Предельно допустимые уровни облучения (по ОСТ 54 30013-83):

- а) до  $10 \text{ мкВт/см}^2$ , время работы (8 часов);
- б) от 10 до  $100 \text{ мкВт/см}^2$ , время работы не более 2 часов;
- в) от 100 до  $1000 \text{ мкВт/см}^2$ , время работы не более 20 мин. при условии пользования защитными очками;
- г) для населения в целом ППМ не должен превышать  $1 \text{ мкВт/см}^2$ .

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

- защита временем (СКЗ);
- защита расстоянием (СКЗ);
- снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения (СКЗ);
- экранирование источника (СКЗ);
- защита рабочего места от излучения (СКЗ);
- Очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами (СИЗ).
- Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова ( $\text{SnO}_2$ ) (СИЗ).

## 6.2 Поражение электрическим током

Классификация помещений по электробезопасности представлена в таблице 24.

Таблица 24 – Классификация помещений по электробезопасности

Категория помещения	Характеристика помещения
Без повышенной опасности	В помещении отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность
С повышенной опасностью	Наличие одного из признаков: <ul style="list-style-type: none"><li>• Сырость (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%);</li><li>• Токопроводящая пыль (металлическая, угольная и т.п.);</li><li>• Токопроводящие полы (металлические, железобетонные, кирпичные и т.п.);</li><li>• Высокая температура (температура длительно превышает +35 °С);</li><li>• Возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединения с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.</li></ul>
Особоопасные	<ul style="list-style-type: none"><li>• Особой сырости: влажность воздуха близка к 100%;</li><li>• Химически активной или органической среды (агрессивные пары, газ, жидкости, разрушающие изоляцию и токоведущие части электрооборудования);</li><li>• Одновременно 2 и более условий повышенной опасности</li></ul>

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц. По опасности электропоражения комната относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует повышенная влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного соприкосновения токоведущих элементов с заземленными металлическими корпусами оборудования [30].

Лаборатория относится к помещению без повышенной опасностью поражения электрическим током. Безопасными номиналами являются:  $I < 0,1$  А;  $U < (2-36)$  В;  $R_{\text{зазем}} < 4$  Ом. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

Каждому необходимо знать меры медицинской помощи при поражении электрическим током. В любом рабочем помещении необходимо иметь медицинскую аптечку для оказания первой медицинской помощи.

Поражение электрическим током чаще всего наступает при небрежном обращении с приборами, при неисправности электроустановок или при их повреждении.

Для освобождения пострадавшего от токоведущих частей необходимо использовать непроводящие материалы. Если после освобождения пострадавшего из-под напряжения он не дышит, или дыхание слабое, необходимо вызвать бригаду скорой медицинской помощи и оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь:

- обеспечить доступ свежего воздуха (снять с пострадавшего стесняющую одежду, расстегнуть ворот);
- очистить дыхательные пути;

- приступить к искусственной вентиляции легких (искусственное дыхание);

- в случае необходимости приступить к непрямому массажу сердца.

Любой электроприбор должен быть немедленно обесточен в случае:

- возникновения угрозы жизни или здоровью человека;

- появления запаха, характерного для горячей изоляции или пластмассы;

- появления дыма или огня;

- появления искрения;

- обнаружения видимого повреждения силовых кабелей или коммутационных устройств.

Для защиты от поражения электрическим током используют СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

1. Заземление источников электрического тока;

2. Зануление;

3. Защитное электрическое разделение цепей;

4. Использование щитов, барьеров, клеток, ширм, а также заземляющих и шунтирующих штанг, специальных знаков и плакатов.

Средства индивидуальной защиты:

1. Использование диэлектрических перчаток, изолирующих клещей и штанг, слесарных инструментов с изолированными рукоятками, указатели величины напряжения, калоши, боты, подставки и коврики.

### **6.3 Пожарная безопасность**

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории В– горючие и трудно горючие жидкости, твердые горючие и трудно горючие вещества и материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что

помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудногорючим материалам).

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

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 1000В. 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.

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

1. специальные изолированные помещения для хранения и разлива легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-

вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении - соответствии с ГОСТ 12.4.021-75 и СНиП 2.04.05-86;

2. специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;

3. первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители ГОСТ 9230-77, пенные огнетушители ТУ 22-4720-80, ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно);

4. автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Лаборатория полностью соответствует требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, изображенного на рисунке 2, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.

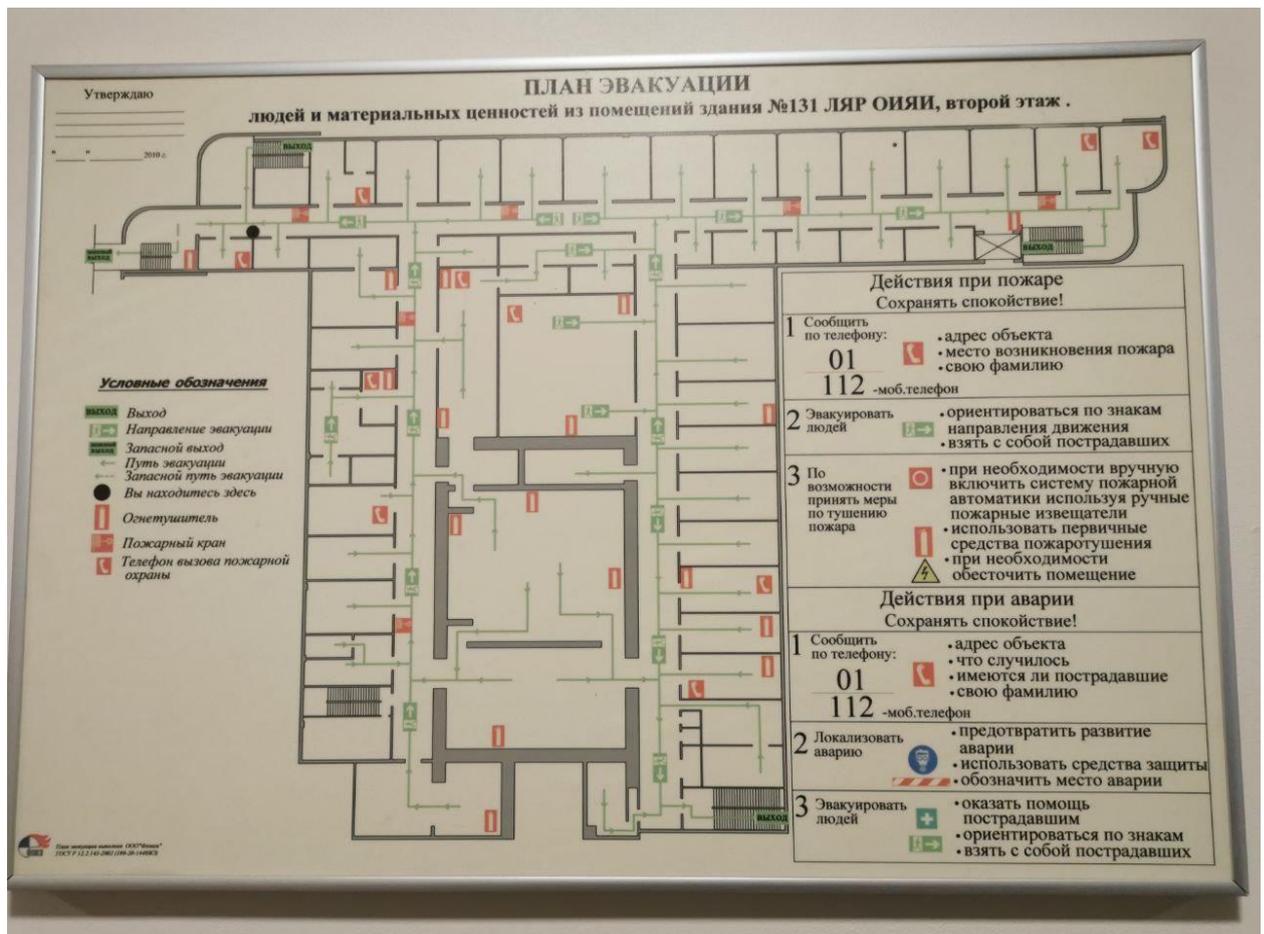


Рисунок 57 – План эвакуации

## 6.4 Экологическая безопасность

Утилизировать оргтехнику, а не просто выбрасывать на «свалку» необходимо по следующим причинам:

Во-первых, в любой компьютерной и организационной технике содержится некоторое количество драгоценных металлов;

Во-вторых, предприятие также может быть оштрафовано за несанкционированный вывоз техники или оборудования на «свалку»;

Стадия утилизации, утилизируя технику мы заботимся об экологии: количество не перерабатываемых отходов минимизируется, а такие отходы, как пластик, пластмассы, лом черных и цветных металлов, используются во вторичном производстве. Электронные платы, в которых содержатся драгметаллы, после переработки отправляются на аффинажный завод, после чего чистые металлы сдаются в Госфонд, а не оседают на свалках.

Таким образом утилизацию компьютера можно провести следующим образом:

- отделить металлические детали от неметаллов;
- разделить углеродистые металлы от цветмета;
- пластмассовые изделия (крупногабаритные) измельчить для уменьшения объема;

- кофир-порошок упаковать в отдельную упаковку, точно также, как и все проклассифицированные и измельченные компоненты оргтехники, и после накопления на складе транспортных количеств отправить предприятиям и фирмам, специализирующимся по переработке отдельных видов материалов.

Люминесцентные лампы, применяющиеся для искусственного освещения рабочих мест, также требуют особой утилизации, т.к. в них присутствует от 10 до 70 мг ртути, которая относится к чрезвычайно опасным химическим веществам и может стать причиной отравления живых существ, а также загрязнения атмосферы, гидросферы и литосферы. Сроки службы таких ламп составляют около 5-ти лет, после чего их необходимо сдавать на переработку в специальных пунктах приема. Юридические лица обязаны сдавать лампы на переработку и вести паспорт для данного вида отходов. Не работающие лампы немедленно после удаления из светильника должны быть упакованы в картонную коробку, бумагу или тонкий мягкий картон, предохраняющий лампы от взаимного соприкосновения и случайного механического повреждения. После накопления ламп объемом в 1 транспортную единицу их сдают на переработку на соответствующее предприятие. Недопустимо выбрасывать отработанные энергосберегающие лампы вместе с обычным мусором, превращая его в ртутьсодержащие отходы, которые загрязняют биосферу ртутными парами.

## **6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Природная чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории или акватории, сложившейся в результате возникновения источника природной чрезвычайной ситуации, который может повлечь или повлечь за собой

человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и (или) окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Производство находится в городе Дубна с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Московской области в зимнее время года характерны заморозки. Достижение критически низких температур приводит к авариям систем тепло- и водоснабжения, сантехнических коммуникаций и электроснабжения, приостановке работы. В этом случае при подготовке к зиме следует предусмотреть а) газобаллонные калориферы (запасные обогреватели), б) дизель или бензоэлектродгенераторы; в) запасы питьевой и технической воды на складе (не менее 30 л на 1 человека); г) теплый транспорт для доставки работников на работу и с работы домой в случае отказа муниципального транспорта. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

### **Перечень НТД**

1. ГОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности

2. ГОСТ 12.4.154-85 “ССБТ. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты”

3.ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны

4. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)".

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

6. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

7. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.

8. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

9. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

10. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности

11. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха

12. ГОСТ 30775-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.

13. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.

14. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры

15. СНиП 2.04.05-86. Отопление, вентиляция и кондиционирование.

16. ГОСТ 9230-77. Огнетушители СО<sub>2</sub> (углекислотные) передвижные.

17. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность

18. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

19. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.



## Заключение

В ходе выполнения магистерской диссертации в среде COMSOL Multiphysics была создана 3D модель магнитной системы источника. Используя данную 3D модель, было проведено моделирование распределений линий магнитного поля вдоль диаметра и вдоль оси кольца. Данная магнитная система обеспечивает создание псевдо-замкнутых поверхностей с уровнем поля от  $B_{рез}$  (875 Гс) до  $2B_{рез}$  (1750 Гс), что соответствует частоте 2,45 ГГц.

В апреле 2022 года на стенде ЛЯР (ОИЯИ) были проведены испытания источника. Их целью являлось исследование характеристик 2,45 ГГц ЭЦР-источника ионов на основе четвертьволнового коаксиального резонатора, а именно: определение зависимости тока извлекаемых ионов от частоты генератора, мощности генератора, давления внутри рабочей камеры (напуска газа), с использованием различных конфигураций вводов мощности. Согласно полученным результатам, минимальная мощность поджига плазменного разряда для частоты  $f = 2500$  МГц составила  $W = 2$  Вт. Максимальное значение тока ионов He (245 мкА) при мощности 30 Вт наблюдалось при использовании ввода мощности №2 при длине петли связи  $L = 18$  мм. Для всех видов петель, наибольшее значение тока наблюдалось при частоте 2500 МГц. Удалось выяснить, что при слишком высоких ( $P > 4,7 \cdot 10^{-5}$  торр) и слишком низких значениях плазменный разряд погасал. Для поджига плазменного разряда необходимо, чтобы давление в камере было  $P > 3,5 \cdot 10^{-6}$  торр.

Таким образом, при эксплуатации источника для достижения наибольшего значения тока ионов предпочтительно использовать ввод мощности №2 с 18 мм петлей связи при следующих параметрах:  $f = 2500$  МГц,  $W = 30$  Вт,  $P \approx 1,4 \cdot 10^{-5}$  торр. Так как при вышеописанных параметрах получается добиться наибольшего согласования с линией передачи.

## Список литературы

1. H. W. Zhao, L. T. Sun, J. W. Guo, W. Lu, D. Z. Xie, D. Hitz, X. Z. Zhang, and Y. Yang, Intense highly charged ion beam production and operation with a superconducting electron cyclotron resonance ion source, *Phys. Rev. Accel. Beams* 20, 094801 (2017).
2. R. Geller, *Electron Cyclotron Resonance Ion Source and ECR Plasmas* (Bristol, Institute for Physics Publishing, 1996).
3. Лепорис М. Разработка и исследование источника многозарядных ионов ЭЦР-типа с модифицированной структурой аксиального магнитного поля (DECRIС-4): дис. канд. техн. наук: 01.04.20 / Лепорис Марек. – Дубна, 2005. – 103 с.
4. J. Li, L. X. Li, L. B. Li, W. Lu, W. Guo, X. Z. Zhang, L. T. Sun, D. Hitz, H. W. Zhao, Bremsstrahlung measurements with SECRAI-II Ion source // XXIII International Workshop on ECR Ion Source. – 2018. – pp. 1-22.
5. H. W. Zhao, L. T. Sun, J. W. Guo, W. H. Zhang, W. Lu, W. Wu, B. M. Wu, G. Sabbi, M. Juchno, A. Hafalia, E. Ravaioli, D. Z. Xie, Superconducting ECR ion source: From 24-28 GHz SECRAI to 45 GHz fourth generation ECR // *Review of scientific instruments*. – 2018. – No. 89. – pp. 1-10.
6. Арцимович, Лев Андреевич “Что каждый физик должен знать о плазме” // Л.А. Арцимович. - 2-е изд. - Москва: Атомиздат, 1977. - 112 с.
7. D. Leitner, D. Todd, D. Winklehner, *Plasma Physics Fundamentals for Ion Sources*.
8. Ефремов А.А. Разработка источника ионов ЭЦР-типа Decris и исследование физико-технических условий получения многозарядных ионов: дис. канд. техн. наук: 01.04.20. - Дубна, 1994. - 111 с.
9. Yu.Ts. Oganessian et. al., "The project of the mass separator of atomic nuclei produced in heavy ion induced reactions". *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B204*, 606 (2003).

10. The 2.45 GHz ECR ion source for the first stage of the DRIBs project A.Efremov, V.Bekhterev, S.Bogomolov, G.Gulbekian, A.N.Lebedev, V.N.Loginov, Yu.I.Smirnov, M.Leporis NIM B 204 (2003) 368 – 371.
11. Development of compact 2.45 GHz ECR ion source for generation of singly charged ions S.L. Bogomolov et al 2019 JINST **14** C01009, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/01/C01009>.
12. Pascal Sortais, Thomas André, Julien Angot, Sophie Bouat, Josua Jacob, Thierry Lamy, and Patrick Sole, Frequency scaling with miniature Compact Microwave and Coaxial ion source // Review of scientific instruments. – 2014. – No. 85. – pp. 240-243.
13. G. Gaubert, C. Baru, C. Canet, J. Cornell, M. Dupuis, W. Farabolini, J. L. Flambard, P. Gorel, P. Jardin, N. Lecesne, P. Leherissier, F. Lemagnen, R. Leroy, J. Y. Pacquet, M. G. Saint-Laurent, and A. C. C. Villari, Minimono: An ultracompact permanent magnet ion source for singly charged ions // Review of scientific instruments. – 2003. – No. 74. – pp. 956-960.
14. Q. Wu, Y.G. Liu, J.L. Liu, H.Y. Ma, L.T. Sun, and H.W. Zhao, Development of 2.45 GHz ECR ion sources at IMP // 23th Int. Workshop on ECR ion sources. – 2018. – pp. 195-197.
15. Y. Fuwa et. al., "Development of compact H<sup>+</sup> ECR ion source with pulse gas valve", Proceedings of ECRIS2016, Busan, Korea.
16. P. A. Schmelzbach, A. Barchetti, H. Einkenkel and D. Goetz, "A Compact, Permanent Magnet, ECR Ion Source For The Psi Proton Accelerator", Cyclotrons and Their Applications, 2007.
17. R. F. Welton, T. F. Moran, R. K. Feeney and E. W. Thomas, Rev. Sci. Instrum., 67 (4), pp. 1634 – 1637, April 1996.
18. O. Popov and A. Westner, Plasma Sources Sci. Technol. 3 (1994), pp. 453 – 459.
19. "Compact 2.45 GHz ECR Ion Source for generation of singly-charged ions", R. Fatkullin, S. Bogomolov, K. Kuzmenkov, A. Efremov, EPJ Web of Conferences 177, 08003 (2018)

20. Ю.Н. Пчельников, В.Т. Свиридов, Электроника сверхвысоких частот. – М: Радио и связь, 1981. – 96 с., ил. – (Массовая радиобиблиотека. Вып. 1039).

21. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 73 с.

22. Кнышова Е. Н. Экономика организации: учебник / Е. Н. Кнышова, Е. Е. Панфилова. – Москва: Форум Инфра-М, 2012. – 334 с.: ил. – Профессиональное образование.

23. Шульмин В. А. Экономическое обоснование в дипломных проектах: учебное пособие для вузов / В. А. Шульмин, Т. С. Усынина. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 192 с.

24. Коршунова Л. А., Кузьмина Н. Г. Технико-экономическое обоснование инновационного проекта. Методические указания по выполнению экономического раздела ВКР для студентов энергетических специальностей всех форм обучения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.

25. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 №181 – ФЗ.

26. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы».

27. СанПиН 2.2.4.548-96. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

28. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.

29. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий».

30. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Санитарные нормы «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки».

**Приложение II**  
(справочное)

**Обзор литературы**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ01	Берестов К.И.		

Руководитель ВКР

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

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Кабрышева О.П.			

# 1 Principles of ECR Ion Source

## 1.1 General picture of ECR Ion Source

In order to build an ECR ion source for multiply charged ion production, at least four fundamental conditions should be fulfilled: [1].

- 1) A minimum  $|B|$  magnetic structure;
- 2) A closed resonant surface where  $|B| = |B_{ECR}| = \frac{m_e f}{e}$ ;
- 3) A hot and dense plasma;
- 4) A slow diffusion process of ions into this plasma.

A typical multiply charged ECR ion source consists of two stages. The first stage is considered to be a source to provide cold electrons and cold initial plasma for the second stage. The second stage serves as the primary plasma generation and confinement cavity. The plasma chamber of the second stage can be regarded as a multimode cavity where many microwave modes are coupled to the plasma. The minimum  $|B|$  magnetic structure is used to confine and stabilize the ECR plasma, which is realized by a superposition of axial mirror magnetic field and radial multipolar magnetic field.

The axial mirror magnetic field is usually produced by solenoid coils or by permanent magnets. The axial mirror coils or the axial permanent magnets surrounded by iron yoke are situated at the two ends of the plasma chamber to confine the plasma in the axial direction. In particular, those particles that satisfy the conditions for adiabaticity remain trapped indefinitely between the two mirror peaks, provided that the ratio of the perpendicular velocity to the parallel velocity satisfies the condition:

$$\frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} > \frac{1}{\sqrt{R}}, \text{ where } R \text{ is the mirror ratio.}$$

The radial multipolar magnetic field is often provided by a permanent magnet around the plasma chamber. The multipolar permanent magnet can be a quadrupole, hexapole, octupole or dodecapole structure. Hexapole is usually used in most of ECR ion sources. The radial multipolar magnetic field is mainly used to provide the inward curvature necessary for plasma stability in the radial direction.

The radiofrequency power for ECR heating is fed into the source radially or axially by means of rectangular lines and coaxial line. The microwave frequency is usually between 2.45 and 28 GHz. The ion current, extracted from the source by a plasma electrode and an ion puller electrode with 10-30 kV potential, is the consequence of flux of ions diffusing spontaneously along the axis and arriving in the area of the maximum mirror field.

The cyclotron resonance of the electrons in minimum  $|B|$  magnetic structure is used as an efficient and reliable mechanism for plasma generation and maintenance in ECR ion sources. The physical region or surface over which the ECVR condition is met is referred to as ECR zone. The ECR zone is created whenever magnetic field  $\vec{B}$  and radiofrequency field  $\vec{E}$  are superimposed and the electron gyrofrequency  $f_B$  equals the frequency  $f_{rf}$  of the applied radiofrequency field. If in this ECR zone a component of the electric radiofrequency field is perpendicular to the local magnetic field, the electrons crossing the zone, which are coincidentally in phase with the electric field, are accelerated by transfer of energy from the microwave electric field; electrons arriving out of phase with the electric field undergo deceleration. On subsequent passes through the ECR zone, the electrons can gain a net energy and are said to be stochastically heated. The energy gain of the electrons depends on the value of the radiofrequency field component  $\vec{E}_\perp$ , the magnetic field configuration, the neutral pressure and the time they stay inside of the ECR zone, provided that collisions with the gas don't damp the resonant effect. The stochastic ECR heating makes the perpendicular energy of the electrons much greater than that parallel to the field, which helps trap the electrons in the region between the mirror magnetic field at the ends of the plasma chamber. If the electrons reach the energies above the ionization potentials of the gas, atoms of the gas are ionized and an ECR plasma is ignited by the collisions between the electrons and the gas atoms.

Since the hot electrons can only be excited in the resonant surface which lies around the axis of the source, and they move back and forth between the mirror region, the multiply charged ions are mainly produced in their path by step-wise successive electron impact ionization. The multiply charged ions are confined and ionized in a

negative space charge potential dip of the electrons. The production of multiply charged ions is determined by the energy and the density of the. The loss of multiply charged ions in an ECR ion source is dominant by charge exchange processes and the loss of confinement. Therefore, the ECR heating must induce a population of the electrons as dense and hot as possible in order to increase electron ionization rates. The ion confinement time should be long enough to get high charge states by the electron ionization. The gas pressure in the chamber should be low to prevent the loss of charge exchange processes for highly charged ions.

## 1.2 rf Coupling and rf Power Absorption

The coupling of microwave to the plasma in an ECR ion source is related to the types of the electromagnetic wave, the modes, the launch direction relative to the magnetic field, the location of the microwave injection port, the method to feed the microwave into the source, and the magnetic field distribution near the microwave injection port. For an ECR ion source, we are only interested in two types of microwave extraordinary wave (x wave) and right hand circularly polarized wave (RHCP wave).

The X wave in which both the launch direction and the  $\vec{E}$  field are perpendicular to the magnetic field, can be resonant with the plasma electrons at a point in the plasma where the upper hybrid frequency  $f_{uh}$  matches the microwave frequency  $f_{rf}$ . The upper hybrid frequency is related to the plasma frequency  $f_p$  and cyclotron frequency  $f_c$  through the relation:

$$f_{uh}^2 = f_p^2 + f_c^2 = f_{rf}^2 \quad (1)$$

In actuality, the rf power coupled into the ECR plasma is absorbed by the following processes [2]:

- power loss through scattering of hot electrons into the loss cone after collisional or turbulent diffusion;
- power loss through scattering of thermal electrons into the loss cone after collisional or turbulent diffusion;
- power required to ionize the atoms;

- power radiated;
- power reflected.

The absorbed rf power used for ECR plasma heating can be expressed roughly as:

$$P_{abs} \cong \frac{n_e K T_e V}{\tau_e} \quad (2)$$

where V is the volume of the hot plasma,  $\tau_e$  is electron confinement time.

### 1.3 Electron Motion in ECR Ion Source

The plasma in an ECR ion source is imbedded in a combination of axial mirror magnetic field and radial multipolar magnetic field. The combined action of those two field and rf fields causes a complicated electron motion. Most of interesting properties of the plasma and its confinement in ECRIS result from collective effects of the electron motion. However, it is important for us to understand such sophisticated collective motion through analysis to the motion of an individual electron, which can be approximately decomposed in three parts:

#### 1) The Cyclotron Rotation Around a Magnetic Field Line

The cyclotron rotation is the basic motion of electrons perpendicular to the magnetic field. The associated period  $\tau_1$  is independent of energy for nonrelativistic electrons. The cyclotron frequency is given by:

$$f_c \cong \frac{eB}{m_e} \cong 1.76 \cdot 10^7 \text{ B} \quad (3)$$

where B in Gauss,  $f_c$  in *rad/s*.

#### 2) A Bouncing Oscillation Along a Field Line by Reflection Between the Two Magnetic Mirror Peaks

This oscillation is caused by the longitudinal gradient of the magnetic field. The force on the electrons due to longitudinal gradient is:

$$F_{\parallel} = -\vec{\mu} \nabla \vec{B}, \quad (F_z = -\frac{W_{\perp}}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial z}) \text{ B} \quad (4)$$

Which is parallel to the local magnetic field. Where  $\mu$  is magnetic moment.  $W_{\perp}$  is perpendicular kinetic energy of the electron.

The average bounce period  $\tau_2$  can be estimated as:

$$\tau_2 \sim \frac{L}{2\pi v_{\parallel}} \left( \frac{R}{R-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

where  $v_{\parallel}$  is the average parallel thermal velocity of the electron, L the distance between the two mirror peaks, R the mirror ratio.

### 3) An Azimuthal Drift and Radial Drift to Concentrate Near the Axis

These two drifts are caused by the radial gradient of the magnetic field and the curvature of the field line. The total drift velocity resulted from the sum of radial gradient and field line curvature is

$$\vec{v}_D = \frac{\mu c}{eB} \left( 1 + \frac{2v_{\parallel}^2}{v_{\perp}^2} \right) (\vec{b} + \nabla \vec{B}) \quad (6)$$

where  $\mu$  – magnetic moment ( $\mu = \frac{w_{\perp}}{B}$ ), c the light velocity,  $\vec{b}$  – is the unit vector of the local magnetic field.

The electrons may escape from the magnetic confinement when they undergo a large angle scattering.

## 2 Some Aspects and Evidences About ECRIS Physics

The greatest challenge in understanding, predicting, or improving ECRIS performance comes from the tenuous connection between a set of internal variables and the external variables of ECR ion sources. The internal variables are those plasma parameters, such as the electron density, the electron temperature, the ion temperature, the confinement time and the plasma potential. The external variables available in the design stage include size, shape and strength of the magnetic field, microwave frequency and power, microwave coupling, plasma chamber dimensions, gas pressure and pumping. Once the source is built the adjustable variables are axial magnetic field, gas flow rate and microwave power. During the last several years in order to understand

the picture of ECR ion source, many laboratories have concentrated on the measurements of the dependence of those internal variables on those external variables. Some of results are outlined as following:

Electron temperature: The measurements through electron cyclotron emission on the 18 GHz Minimafios ECRIS in Grenoble demonstrated that the electron temperature saturates or rise very slowly when the incident rf power is increased, as shown in Fig. 1 [3].

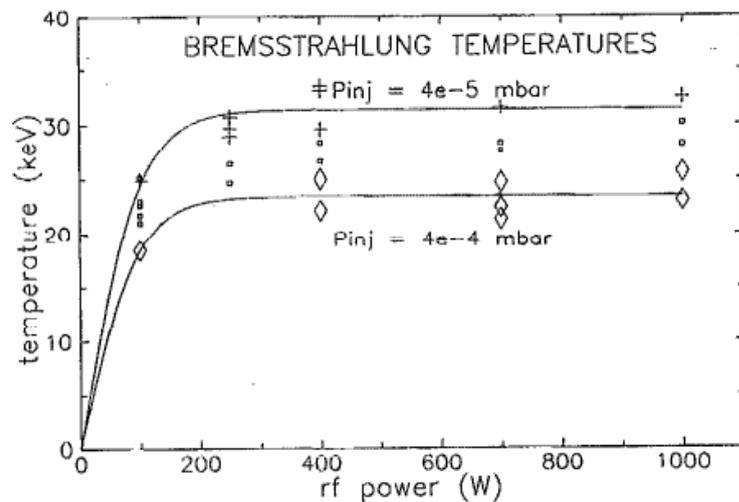


Figure 1 – Electron temperature given by bremsstrahlung spectra; the small square symbols stand for data obtained at intermediate pressures

Fig. 1 indicates that the electron temperature increases very rapidly when rf power is from zero to 200 W. The electron temperature does not vary very much with rf power when rf power is more than 200 W. This result was also confirmed by x-ray measurements. Another measurement result on the Grenoble Quadrumafios showed the same tendency [4]. Electron temperature increases with decrease of the gas pressure inside the plasma chamber.

Electron Density: Electron density was measured on the Quadrumafios ECRIS at 10 GHz in Grenoble Group. It was indicated that the electron density in an ECR ion source depends on the incident rf power. Electron density is comparable to the cutoff frequency.

Ion Temperature: It is not very easy to measure the ion temperature exactly in an ECR ion source because of many different complicated factors involved in ECRIS.

H. Kohler reported their measurement results of ion temperature on a 5 GHz ECRIS for the ions of argon, neon and nitrogen [5]. The measurements indicated that ion temperature in an ECR ion source increase with charge state. Probably it is because that the ions with high charge state have a higher collision rates with the hot electrons and a longer confinement time than those of the ions with low charge state.

Confinement Time: C. Petty measured the ion confinement time for oxygen plasma on a 10.5 GHz ECRIS by determining the ion density and endless particle current-density [6]. It was noted that the ion confinement is better in the center of the plasma and the confinement is better in the center of the plasma and the confinement time increases with charge state. In Grenoble an experiment was performed on 18 GHz MinimaFios ECRIS to measure the electron confinement time by means of the decay time of the diamagnetic signal. The decay time of the diamagnetic signal was supposed to be very closely related to the electron confinement time.

Plasma Potential and Energy Spread: In LBL plasma potential and energy spread were measured successfully in 14 GHz AEER [4]. The measurements showed that:

- 1) Plasma potential in an ECR ion source is positive with respect to the chamber wall and is in order of a few tens of volts;
- 2) High microwave power increases the plasma potential as well as energy spread;
- 3) At constant microwave power, additional injection of the electrons reduces the plasma potential; the gas mixing effect reduces the plasma potential; heavier element plasma has higher plasma potential; lower plasma potentials come with higher energy spread.

### **3 A Few Trends to Optimize the Multiply Charged Ion Production in ECRIS**

During the last several years many ideas to optimize the multiply charged ion production in ECRIS have been proposed and tried. Most of them have attempted to

increase the plasma density and strengthen the ion confinement. They are outlined as following:

### **3.1 Additional Injection of Electrons**

It has turned out that the role of the first stage in an ECR ion source is likely to be the primary source of electrons for the main plasma. Those injecting cold electrons directly into the main plasma by replacing the first stage can considerably improve the performance of an ECR ion source for the multiply charged ion production. Additional injection of electrons into the main plasma is often achieved by a negatively biased electrode, or a low voltage electron gun and coating the ECRIS chamber wall.

The negatively biased electrode works as a plasma cathode to collect ions and repel the plasma electrons into the central plasma, meanwhile, it also provides electrons from secondary emission of impinging plasma particles. The extracted current keeps increasing with increase of the negative potential and then saturates. The typical negatively biased potential is from a few volts to a few hundred volts according to different working condition of ECRIS. It is possible to raise the current of highly charged ions by twice by means of negatively biased electrode.

### **3.2 The Gas Mixing Effect**

One of the most important methods to optimize the multiply charged ion production in ECRIS is the gas mixing effect. The gas mixing effect consists in a substantial increase of the currents of highly charged ions when a second lighter gas is mixed into the plasma. Moreover, the gas mixing effect decreases significantly the consumption of the main gas in ECRIS, which is very interesting for the radioactive ion production.

### **3.3 Large Plasma Volume**

The extracted ion current from an ECR ion source may be proportional to effective hot plasma volume which is considered to be surrounded by the closed magnetic resonant surface. We can increase the plasma volume to improve the

performance of an ECR ion source for multiply charged ion production. But we can only increase the effective length of the plasma rather than the diameter because larger diameter of a plasma chamber implies higher electric currents for the mirror coils. Another way to increase the effective plasma volume is to increase the pole number of the radial multipolar magnet which may increase the plasma volume efficiently, as pointed out by Alton [7].

In conclusion, it should be noted that the use of electron cyclotron resonance (ECR) ion sources for the production of intense beams of highly charged ions has immensely grown over the last decade. ECR ion sources are used as injectors into linear accelerators, Van-de-Graaff generators or cyclotrons in nuclear and elementary particle physics. In atomic and surface physics ECR ion sources deliver intense beams of highly charged ions for collision experiments or for the investigation of surfaces.

One main advantage of this kind of ion source is that principally ions of all elements can be produced. Furthermore, there are practically no wearing parts, like filaments, in the ion source. Therefore, stable ion beams can be realized for long periods (days - weeks) limited only by the material consumption of the used element. In the case of metals which are fed into the source as wires, where atoms are sputtered into the plasma, or which are evaporated from an oven, the material has to be replaced after a certain time. ECR ion sources work at a relatively low gas pressure and have a high ionization efficiency of the plasma. Therefore, they are well suited for the production of ion beams of radioactive, rare or very expensive elements.

## References

1. P. Sortais, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Physics of Highly Charged Ions, Viena, September, 1994, to be published.
2. R. Geller, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Workshop on ECR Ion Sources, Groningen, May, 1993, P.1.
3. C. Barue, P. Briand, Rev. Sci. Instrum Vol. 63(4), 1992, P. 2844.
4. A. Girard, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Workshop on ECR Ion Sources, Groningen, May, 1993, P. 86.
5. H. Kohler, M. Frank, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Workshop on ECR Ion Sources, Julich, May, 1986, P. 215.
6. C. Petty, D. Goodman, J. De. Phys. C. 50, 1989, P. 783.
7. G.D. Alton, D.N. Smithe, Rev. Sci. Instrum. Vol.65(4), 1994, P. 775.