

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2005-187

На правах рукописи
УДК 621.3.038.612

ЛЕПОРИС
Марек

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ИСТОЧНИКА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ЭЦР-ТИПА
С МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ
АКСИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ (DECRIС-4)**

**Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Дубна 2005

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат технических наук

А.А. Ефремов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

кандидат физико-математических наук, доцент

А.А.Глазов

В.Д.Пекленков

Ведущая организация:

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Защита состоится " ____ " _____ 2005 г. в " ____ " на заседании диссертационного совета Д. 047.01.06 при Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Объединенного института ядерных исследований

Автореферат разослан " ____ " _____ 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



В.Г.Кривохижин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Ускорители заряженных частиц в настоящее время широко используются во многих странах мира. Исследования на пучках тяжелых ионов в широком диапазоне масс и энергий представляют большие возможности для решения как фундаментальных научных проблем, так и важнейших прикладных задач. В ядерной физике с тяжелыми ионами связан значительный прогресс в области синтеза новых элементов, деления ядер (явление изомерии формы, запаздывающее деление, закономерности спонтанного деления трансфермиевых элементов), изучение свойств ядер вблизи границы устойчивости и т.д. Для решения вышеперечисленных задач в последнее время все чаще используются так называемые “экзотические” пучки, к которым можно отнести пучки редких разделенных изотопов (например ^{48}Ca) или вторичные пучки радиоактивных ионов.

Одним из составных элементов любого ускорительного комплекса, во многом определяющим его параметры, является ионный источник. Наиболее эффективным способом получения интенсивных и высокозарядных ионных пучков является использование ионного источника ЭЦР-типа (источник с повышением энергии плазменных электронов СВЧ-волной в области Электронного Циклотронного Резонанса). В настоящее время почти во всех крупных ускорительных центрах используются источники данного типа, что определяет существенный прогресс в их развитии. Разработка и создание новых ЭЦР источников попрежнему остается актуальной задачей, так как в значительной мере определяет возможности циклотронов тяжелых ионов, линейных ускорителей, синхротронов, коллайдеров тяжелых ионов нового поколения или ускорителей радиоактивных пучков. Необходимо отметить, что современные ЭЦР-источники имеют широкий спектр параметров, таких как максимальная интенсивность, максимальный заряд ионов, габариты, потребляемая мощность, радиационная стойкость, стоимость и т. д. Разработка ионного источника, таким образом, для каждого конкретного случая позволяет выбрать оптимальный вариант для решения поставленной задачи.

В Лаборатории ядерных реакций им. Флерова ОИЯИ исследования на ускоренных пучках разделенных изотопов (в частности ^{48}Ca) является одной из приоритетных задач. В соответствии с планом развития

ЛЯР ОИЯИ, получение и исследование экзотических ядер является одним из главных научных направлений. В проекте DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams) предполагается использование ускорителя первичного ионного или электронного пучка для генерации радиоактивных ядер и их дальнейшее ускорение.

В соответствии с этим был разработан и создан новый ионный источник

DECRIС-4, конструкция которого позволяет использовать его как инжектор многозарядных ионов для циклотрона У-400 ЛЯР ОИЯИ с целью повышения эффективности получения пучков ионов обогащенных изотопов, а также как "charge breeder" для второй стадии проекта DRIBs.

Цель работы:

- Разработка и создание ионного источника с модифицированным распределением аксиального магнитного поля.
- Математическое моделирование системы инжекции пучка однозарядных ионов в плазменную камеру ионного источника.

Научная новизна и практическая ценность

- Впервые в ОИЯИ и странах участницах разработан и создан ионный источник ЭЦР-типа с модифицированным распределением осевого магнитного поля в области резонансной зоны (плоский минимум). Формирование требуемого распределения магнитного поля в данном источнике осуществляется за счет одного дополнительного соленоида и подвижных железных масс, являющихся частью ярма ионного источника. Использование магнитного поля с малым градиентом в области резонанса, а также увеличенный размер резонансной зоны позволяет значительно повысить эффективность поглощения СВЧ-волны плазменными электронами и, как следствие, значительно снизить потребляемую СВЧ-мощность для получения требуемой интенсивности пучков многозарядных ионов.
- Проведено численное моделирование системы инжекции вторичных пучков однозарядных ионов в плазменную камеру ионного

источника. В результате расчетов предложена конструкция ввода пучка и найдено оптимальное расположение, а также характеристики элементов трассы для обеспечения максимальной эффективности ввода пучка.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах ЛЯР ОИЯИ, Дубна и были представлены на международных конференциях: “10th International Conference on Ion Sources” (Dubna, Russia, 2003); “RuPAC XIX” (Dubna, Russia 2004); “The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications” (Tokio, Japan, 2004); VI International workshop on “STRONG MICROWAVES IN PLASMAS” (Nizhny Novgorod, Russia, 2005); “11th International Conference on Ion Sources” (Caen, France, 2005); “XXXIV EUROPEAN CYCLOTRON PROGRESS MEETING” (ECPM 2005), (Belgrade, Serbia and Montenegro, 2005).

Публикации

Основное содержание диссертации и результаты испытаний опубликованы в 9 работах.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Список литературы содержит 86 наименований. Полный объем диссертации – 109 страниц машинописного текста, включая 7 таблиц и 71 рисунок.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработан и создан ионный источник с модифицированным распределением осевого магнитного поля («плоским минимумом») в области резонансной зоны. Для реализации требуемого распределения магнитного поля используется только один дополнительный соленоид и специальная система подвижных железных масс.

2. Получены интенсивные пучки многозарядных ионов ($^{40}\text{Ar}^{8+} = 400\mu\text{A}$; $^{16}\text{O}^{6+} = 400\mu\text{A}$; $^{86}\text{Kr}^{12+} = 85\mu\text{A}$; $^{132}\text{Xe}^{15+} = 55\mu\text{A}$) при относительно низком уровне вводимой СВЧ-мощности.
3. В результате проведенных экспериментов показано, что источник с модифицированным распределением магнитного поля в области резонанса обеспечивает более эффективное поглощение электронами плазмы вводимой СВЧ-мощности.
4. Оптимальное распределение аксиального магнитного поля для получения ионов средних зарядов является несимметричным и имеет максимумы в диапазоне 1.1–1.2 Т. При этом в области резонансной зоны уровень магнитного поля лежит в области 0.46–0.5 Т и является спадающим по направлению к области экстракции.
5. В результате расчетов определена конструкция системы ввода пучка однозарядных ионов в источник DECRIS-4. Найдено оптимальное расположение, а также характеристики элементов трассы для обеспечения ввода пучка с максимальной эффективностью.
6. Конструкция ионного источника позволяет использовать его как инжектор многозарядных ионов для циклотрона У-400 с целью повышения эффективности получения пучков ионов обогащенных изотопов, а также, после модификации со стороны инжекции, и как «charge breeder» для второй стадии проекта DRIBs.

Содержание работы

Во **введении** показана актуальность использования ЭЦР-источников в области фундаментальных научных исследований и для научно-технических и прикладных областей. Также показано сегодняшнее состояние ЭЦР-источников и предъявляемые к ним требования, сформулированы цели и задачи диссертации, приводится краткое содержание диссертации.

В **первой главе** описаны физические и технические аспекты получения пучков многозарядных ионов. Рассмотрены элементарные процессы в плазме ЭЦР-источника при получении многозарядных ионов, а также процессы (рекомбинация, перезарядка и уход ионов из плазмы), приводящие к потерям ионов.

Рассмотрен процесс получения вторичных пучков многозарядных методом трансформации " $1^+ \rightarrow n^+$ "¹. Описан основной принцип этого метода, включая его физические и технические аспекты. Приведено несколько возможных конструкций для использования этого метода и обсуждается выбор наиболее подходящего варианта для реализации во второй стадии проекта DRIBs.

Вторая глава посвящена разработке и созданию ионного источника DECRIS-4. Рассмотрены основные принципы работы ЭЦР-источников, приведены основные соотношения, используемые при разработке ЭЦР-источников, рассмотрены различные вспомогательные методы, приводящие в той или иной степени к повышению интенсивности и заряда извлекаемых ионных пучков.

На Рис. 1 представлена конструкция ионного источника DECRIS-4. Особенностью данного ионного источника является пространственное распределение магнитного поля в рабочей области. При разработке магнитной структуры источника была взята за основу идея "магнитного плато" в центре источника, которая была предложена Alton и Smithe². Особое внимание было сосредоточено на том, чтобы аксиальное магнитное поле не имело выраженного локального минимума. Вместо этого формировалась область с однородным (плоским) магнитным полем – так называемым "плато".

В отличие от традиционных ионных источников типа CAPRICE, где требуемое распределение аксиального магнитного поля формируется двумя соленоидами, аксиальное магнитное поле источника DECRIS-4 формируется с помощью трех охлаждаемых водой соленоидальных катушек с независимым питанием, заключенных в магнитопровод из мягкого железа. Схема магнитной структуры источника приведена на Рис. 1. При этом внешние катушки обеспечивают создание пиков магнитного поля для аксиального удержания плазмы, а средняя катушка обеспечивает создание плоского минимума. На Рис. 2 показано сравнение расчетного и измеренного распределения магнитного поля для различного уровня возбуждения основных соленоидов. Специальная система подвижных железных масс позволяет получить плоское распределение при различных уровнях возбуждения основных

¹R.Geller, C.Tamburella, J.L.Belmont, *Review of Scientific Instruments* **67** (3), 1996, p.1281

²G.D.Alton and D.N.Smithe, *Rev. Sci. Instrum.* **65** (2), 775 (1994)

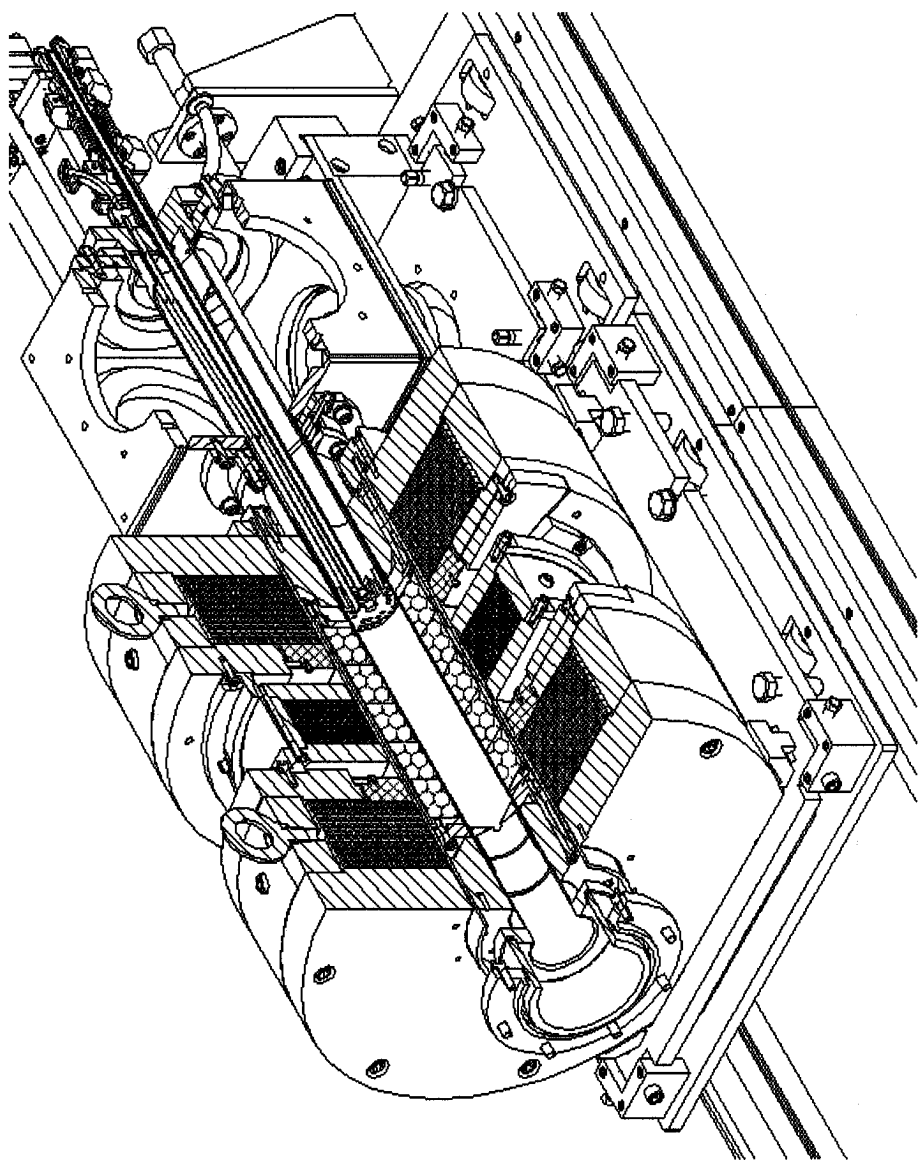


Рис. 1: Магнитная структура источника DECRIS-4.

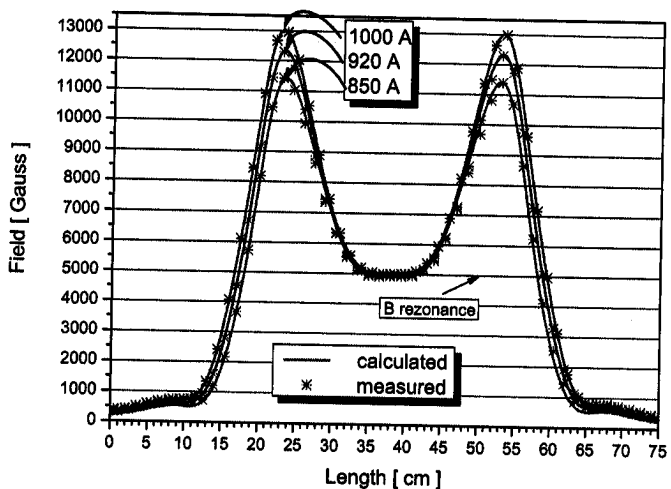


Рис. 2: Аксиальное распределение магнитного поля ионного источника DECRI-4.

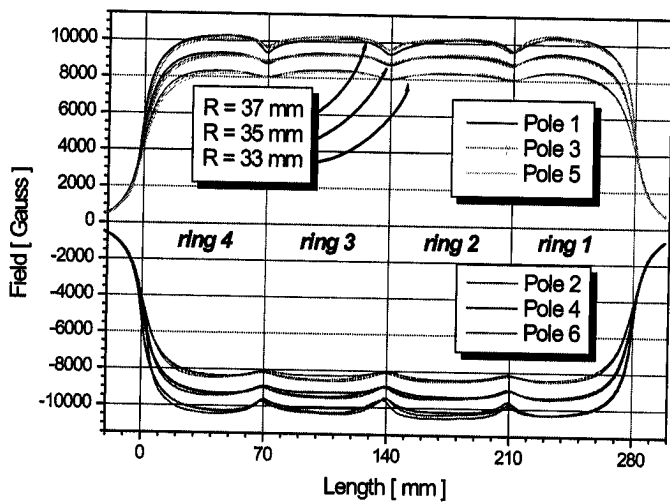


Рис. 3: Распределение радиального магнитного поля вдоль оси гексаполя.

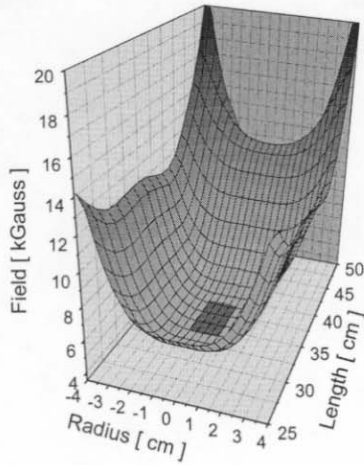


Рис. 4: Трехмерное распределение суммарного магнитного поля в продольном сечении. Темная область в центре соответствует увеличенной резонансной зоне.

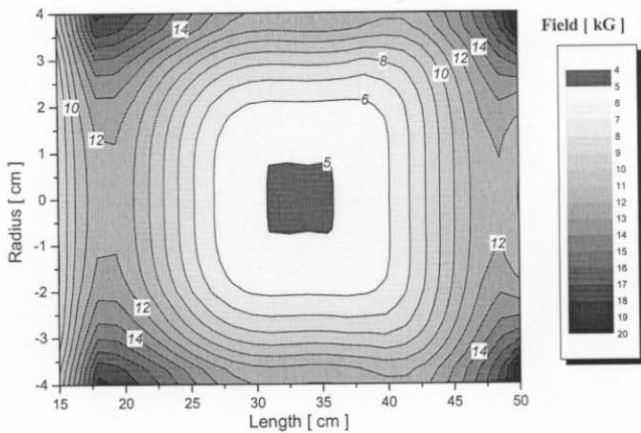


Рис. 5: Топография магнитного поля в одном из продольных сечений. Темная область в центре соответствует увеличенной резонансной зоне.

катушек, симметричное и несимметричное распределение магнитного поля с пробочным отношением до 2,6.

Следует также отметить, что данная конфигурация магнитной системы подразумевает появление дополнительного параметра для оптимальной настройки ионного источника.

Формирование радиального магнитного поля осуществляется с помощью гексаполя, состоящего из 24 идентичных секторов с соответствующим направлением остаточной намагниченности. Конструкция обеспечивает концентрацию магнитного поля в рабочей области. Уникальная сборка колец гексаполя без применения клея, позволила получить при толщине гексаполя всего 4 см уровень магнитного поля на поверхности камеры, превышающий 1Т с неравномерностью менее 3%. Измеренное поле вдоль оси гексаполя на различных радиусах напротив из каждого 6 полюсов показано на Рис. 3.

Суперпозиция аксиального и радиального магнитных полей показана на Рис. 4. На Рис. 5 показана топография магнитного поля в азимутальном сечении, проходящем через полюс гексаполя. В центре темным цветом показана увеличенная резонансная зона.

Особое внимание при создании ионного источника обращалось на конструкцию плазменной камеры. Камера является одним из наиболее сложных в изготовлении элементов ионного источника, т.к. является охлаждаемой протекающей внутри водой при толщине стенки не более 3 мм. Как показано на Рис. 6 а) и б), она во многом отличается от вариантов плазменных камер, используемых в предыдущих версиях источника DECRIS, где камера состоит из комбинации медной (коаксиальный СВЧ-ввод) и нержавеющей частей. В связи с тем, что вместо коаксиального СВЧ-ввода использован волноводный ввод, камера имеет одинаковый диаметр по всей длине и полностью изготовлена из нержавеющей стали, что значительно упрощает ее конструкцию и изготовление. Кроме этого, с целью увеличения объема, а следовательно и уменьшения потерь плазмы в радиальном направлении, внутренний диаметр камеры увеличен с 64 мм до 74 мм. Эти изменения дают возможность реализовать целый ряд новых технических решений:

- Оптимизировать положение задней стенки для выбора оптимальной длины резонатора
- Осуществить ввод СВЧ мощности в источник с помощью волновода, избегая потерь мощности в коаксиальном вводе

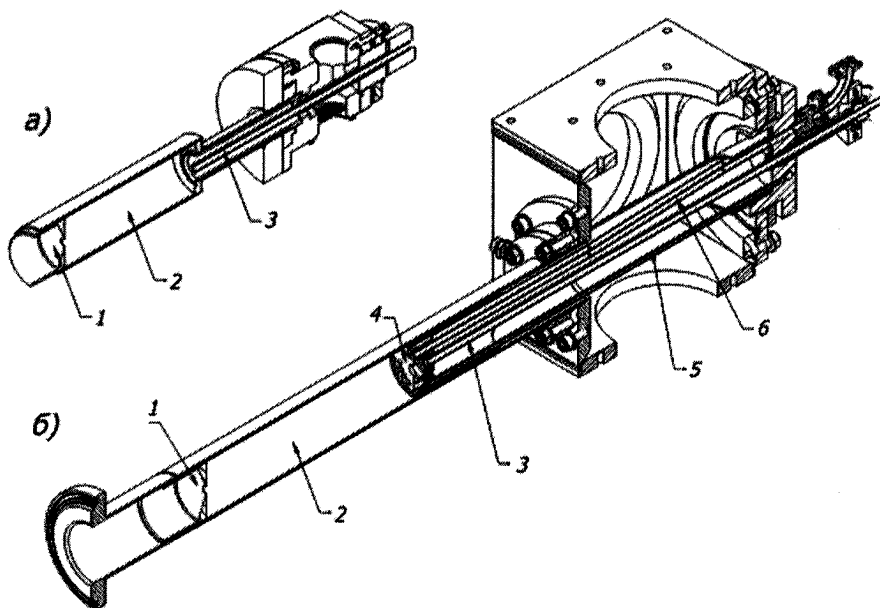


Рис. 6: Конструкция плазменной камеры – а) источника DECRIС14–2 или DECRIС14–3 б) DECRIС–4. 1: плазменный электрод, 2: область резонансной зоны, 3: bias электрод, 4: задняя закоротка, 5: трубка подачи рабочего вещества, 6: волновод

- Использовать подвижный bias электрод с целью настройки резонатора
- Реализовать независимый подогрев экрана, который используется при получении пучков твердых веществ, например ^{48}Ca на ускорителе У-400.

В **третьей главе** представлен расчет и концептуальная схема конструкции экспериментальной установки для осуществления ввода вторичных, в том числе и радиоактивных, пучков однозарядных ионов низких энергий (до 25 кэВ) в камеру ионного источника. Из возможных вариантов ввода, которые обсуждались в первой главе, с точки зрения эффективности и простоты реализации был выбран т.н. вариант "forward injection". Общая блок-схема, которая состоит из анализирующего магнита, диафрагмы, цилиндра фарадея, эмиттансметра, магнитного стиринга, двойной электростатической линзы - так назы-

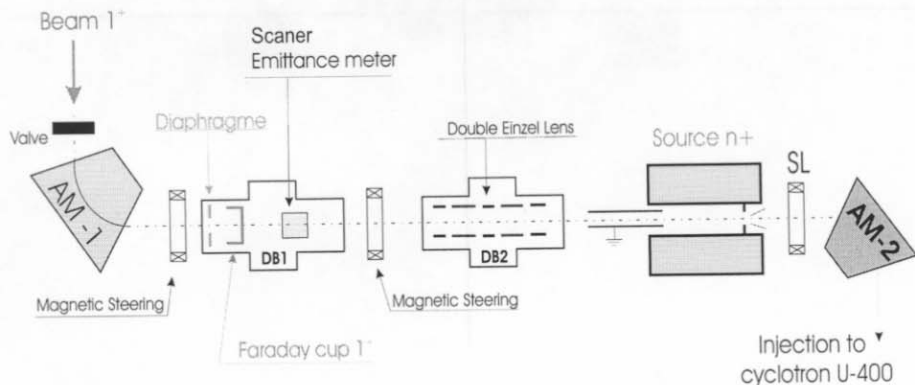


Рис. 7: Блок-схема ввода вторичных пучков однозарядных ионов в плазменную камеру ионного источника DECIS-4

ваемой “Einzel lens” и трубки, через которую вводится пучок в ионный источник, показана на Рис. 7.

Основной задачей расчета была оптимизация расположения элементов трассы, чтобы обеспечить ввод пучка однозарядных ионов в плазму с наибольшей эффективностью. Стартовой точкой расчета являлась точка фокуса поворотного магнита AM-1, а конечной точкой – центр плазменной камеры ионного источника. Поскольку вторая фаза проекта DRIBs предполагает использовать два-

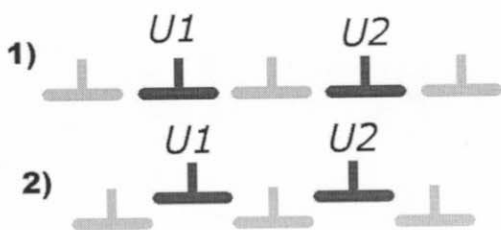


Рис. 8: Схематичный вид и параметры электростатических линз (размеры в миллиметрах): вариант 1) $l=60$; $L=60$; $R=35$; $U1$ & $U2$ до 12.5 кВ вариант 2) $l=60$; $L=70$; $R1=35$ $R2=40$; $U1$ & $U2$ до 11кВ

магическое ядро олова, в качестве входных параметров для расчетов использовались ионы массой 132, заряд 1^+ и энергия пучка 16 кВ. Рассмотрено несколько конфигураций линз, причем в расчетах варьировались напряжения на линзе, габариты линзы и параметры вводимого пучка. Расчет проводился с использованием программных пак-

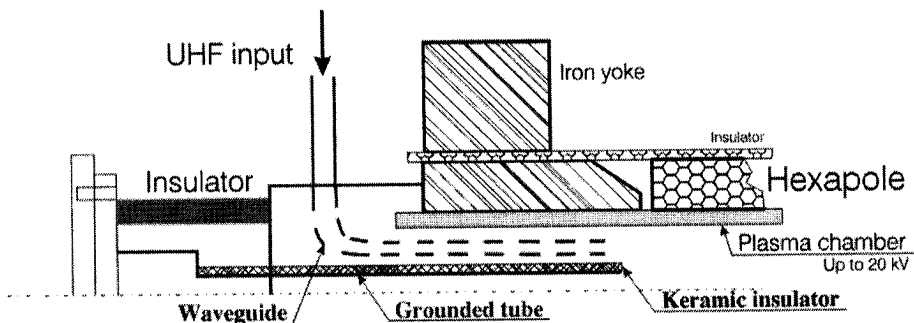


Рис. 9: Блок схема системы ввода СВЧ мощности в источник.

тов TRANSPORT³ и IGUN⁴. В результате расчетов было получено, что наиболее оптимальными являются конфигурации линз, параметры которых приведены на Рис. 8, где l – длина заземленного электрода, L – длина электрода на потенциале. Было также показано, что эффективность ввода существенно падает при эмиттансе входящего пучка более 80 п.мм.мрад.

Как было показано в главе 1, торможение пучка однозарядных ионов должно осуществляться электростатически и происходит за максимумом магнитного поля в плазме ионного источника. С этой целью предложена конструкция специальной системы ввода пучка в плазменную камеру, обеспечивающая торможение вводимых однозарядных ионов в требуемой области. Для этого в источник со стороны инжекции введена заземленная трубка, диаметр и длина которой были оптимизированы как с точки зрения электрической прочности, поскольку трубка заземлена и источник находится на потенциале до 20 кВ, так и с точки зрения эффективной транспортировки пучка в камеру источника. В связи с тем, что конструкция источника со стороны инжекции претерпела значительные изменения, предложено несколько вариантов ввода СВЧ-мощности в ионный источник (Рис. 9).

В четвертой главе приводятся результаты экспериментов по получению пучков многозарядных ионов, а также исследование различ-

³PSI Graphic Transport Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERMILAB version by K.L. Brown et al.

⁴R.Becker, W.B.Herrmannsfeldt, Rev. Sci. Instrum. **63** (4), 2756 (1992)

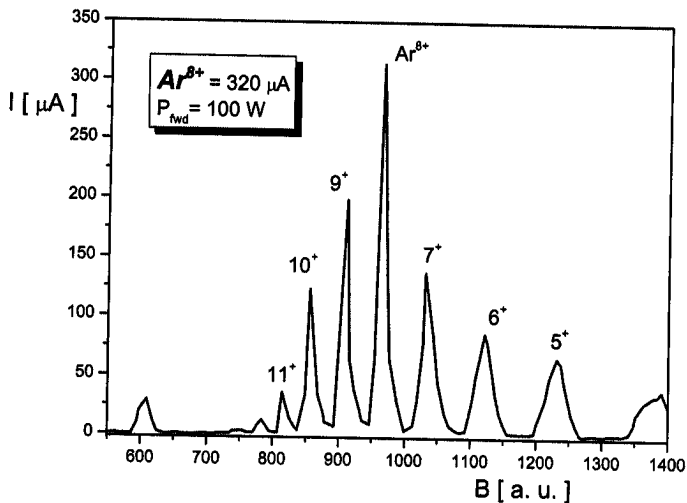


Рис. 10: Спектр ионов аргона при настройке на максимум тока Ar^{8+}

ных режимов работы ионного источника DECRIS-4. Описана экспериментальная установка, на которой проводились испытания ионного источника и ее подсистемы.

Эксперименты по получению пучков многозарядных ионов проводились как на чистых газах в качестве рабочих веществ, так и на смесях газов для оптимизации выхода многозарядных ионов. В виде дополнительных газов использовались гелий и кислород. Пучки с энергией 15 кВ на заряд из отверстия в плазменном электроде, равном 10 мм, были сформированы с помощью трех-электродной оптики. На Рис. 10 представлен наиболее типичный спектр ионов аргона, полученного из источника DECRIS-4, с настройкой на максимум тока ионов Ar^{8+} при уровне СВЧ-мощности 100 Вт. Токи ионов газов, полученные из источника DECRIS-4, представлены в таблице 1.

Проведены эксперименты по исследованию влияния bias-электрода на выход многозарядных ионов для источника с данной магнитной конфигурацией. Подавая на него отрицательный по отношению к стенке плазменной камеры потенциал, мы “закрываем” конус потерь со стороны инжекции, т.е. возвращаем уходящие в конус потерь электроны обратно в плазму. Данный эффект эквивалентен эффекту, возника-

Таблица 1: Интенсивности пучков, полученных из ионного источника DECRIS-4 [μA].

Ион	Заряд								
	6 ⁺	7 ⁺	8 ⁺	9 ⁺	11 ⁺	12 ⁺	15 ⁺	18 ⁺	20 ⁺
Аргон			400	220	125	65			
Криптон				80	110	85	35		
Кислород	400	80							
Ксенон							55	30	25

ющему при инъекции дополнительных электронов вдоль оси ионного источника. На Рис. 11 показана типичная зависимость роста тока пучка от подаваемого на электрод отрицательного потенциала. Было найдено, что оптимальное значение отрицательного потенциала на электроде лежит в диапазоне от 100 В до 300 В и зависит от массы ионов, получаемого заряда, а также от уровня магнитного поля, СВЧ-мощности и количества подаваемого газа в источник. Также было исследовано влияние положения bias-электрода, причем рассматривались одновременно два фактора: во первых, настройка на максимум тока пучка и во вторых, настройка на минимум отраженной СВЧ-мощности. Использование bias-электрода позволяет во многих случаях стабилизировать плазму ионного источника, особенно при работе на предельных режимах.

Проведены исследования зависимости выхода многозарядных ионов от распределения магнитного поля. В процессе испытаний проверялось несколько распределений аксиального магнитного поля, как симметричных, так и не симметричных. Однако, даже в случае несимметричного распределения удавалось сохранить плоское распределение в области резонансной зоны достаточно близко резонансному, как показано на Рис. 12 (зависимость 1). В процессе исследований было найдено, что оптимальное значение магнитного поля в районе инъекции для получения ионов средних зарядов составляло приблизительно 1.25 Т, а в области экстракции лежало в диапазоне от 1.0 до 1.15 Т, в зависимости от массы ионов и требуемого заряда ионов. Значительно более сложная ситуация оказалась с распределением аксиального поля в области резонансной зоны. Из результатов исследований следует, что в отличии от первоначальной настройки, более оптимальным с точки зрения максимального выхода многозарядных ионов оказалось поле,

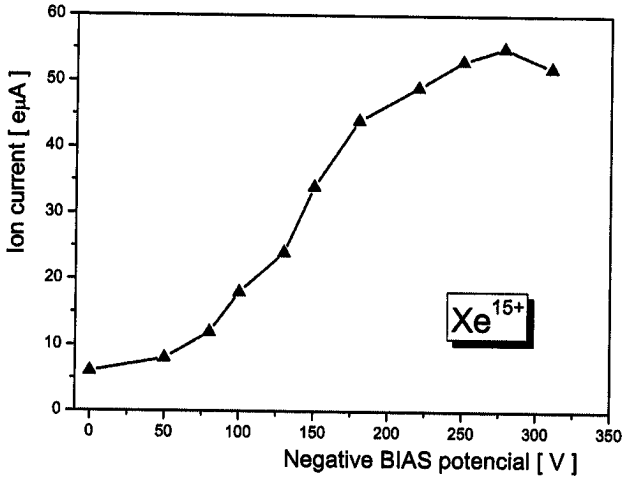


Рис. 11: Зависимость интенсивности пучка Xe^{15+} от величины отрицательного потенциала bias-электрода.

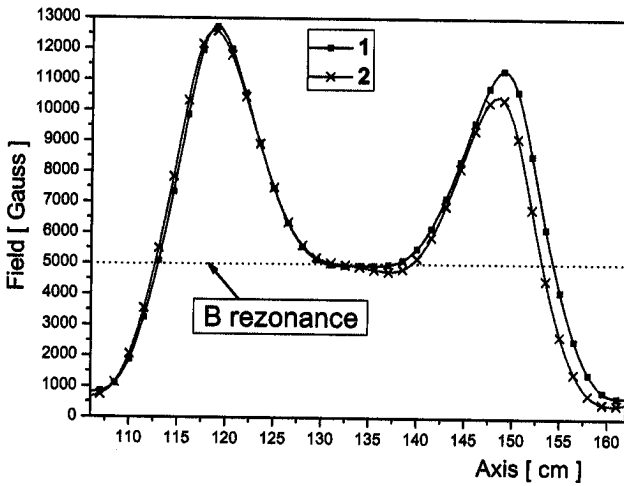


Рис. 12: Пример рабочего распределения аксиального магнитного поля.

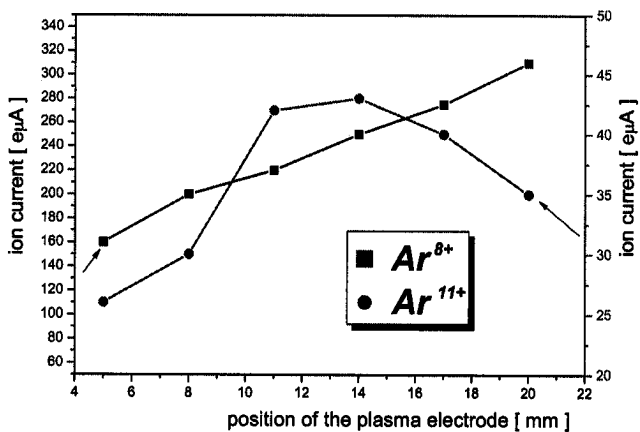


Рис. 13: Зависимость величины тока пучка от позиции плазменного электрода.

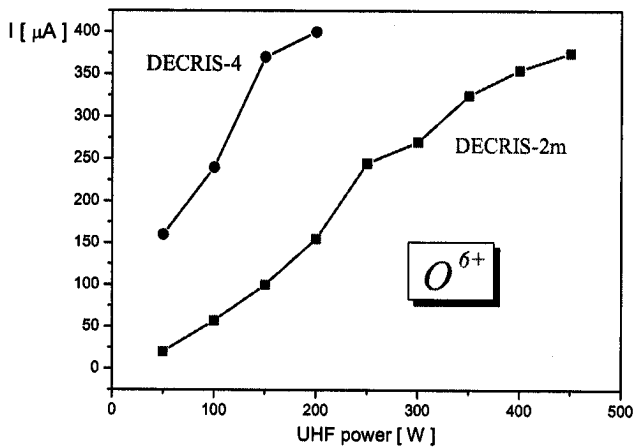


Рис. 14: Зависимость выхода ионов O^{6+} от вводимой СВЧ-мощности.

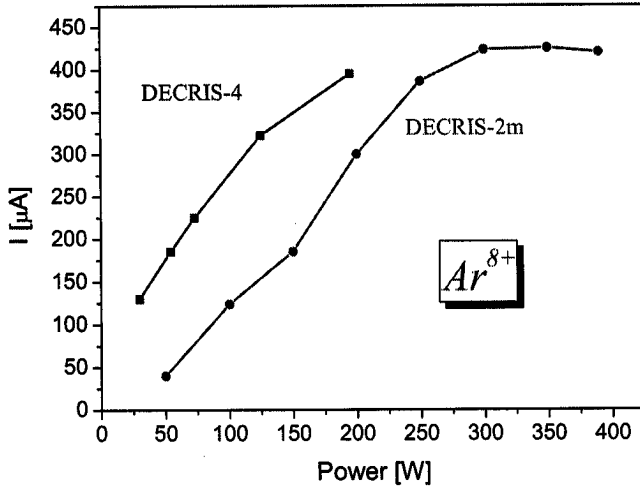


Рис. 15: Зависимость выхода ионов Ar^{8+} от вводимой СВЧ-мощности.

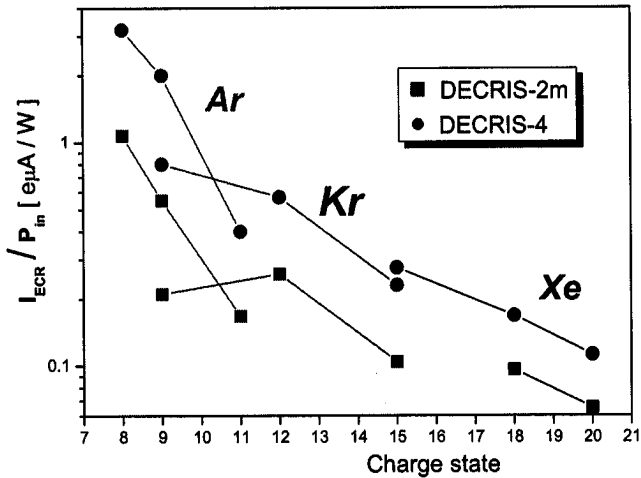


Рис. 16: Сравнение эффективности работы ионных источников.

несколько спадающее (на 100 – 200 Гс) в сторону экстракции (Рис. 12 – зависимость 2).

Проведены эксперименты по изучению влияния положения плазменного электрода на интенсивность извлекаемого пучка многозарядных ионов. В качестве базовой точки при измерении положения плазменного электрода был взят край гексаполя. В процессе исследования вся магнитная система, включая соленоиды, железные пробки и гексаполь, перемещалась относительно плазменной камеры источника. При этом положение плазменного электрода смещалось внутрь гексаполя. В результате было найдено, (Рис. 13), что для Ar^{8+} наблюдается рост интенсивности практически по всей длине движения, в то время как для Ar^{11+} имеется выраженный максимум в на расстоянии 14 мм от края гексаполя. Используя данную процедуру возможно определить оптимальное положение плазменного электрода для любого требуемого заряда ионов. В частности для Ar^{8+} очевидно необходимо механическое изменение первоначального положения плазменного электрода. Из результатов проведенных экспериментов можно заключить, что данная конструкция существенно упрощает и ускоряет перестройку источника на требуемый заряд или другое рабочее вещество.

С целью оценки эффективности поглощения СВЧ-мощности электронами плазмы исследованы зависимости выхода многозарядных ионов от вводимой мощности и проведено сравнение полученных результатов с результатами ионного источника с похожими характеристиками. Для сравнения был выбран ионный источник DECRIS-2m, который является достаточно близким по своим параметрам, как с точки зрения используемой частоты СВЧ накачки, так и уровня магнитного поля. На Рис. 14 и 15 показаны зависимости выхода ионов O^{6+} и Ar^{8+} от вводимой СВЧ мощности для источников DECRIS-2m и DECRIS-4. Из приведенных графиков видно, что для получения одинаковых интенсивностей ионного пучка источник DECRIS-4 требует вводить приблизительно в 2–3 раза меньше СВЧ-мощности. Наглядное представление об эффективности использования СВЧ-мощности дает также сравнение, которое показано на Рис. 16. На данном графике представлена “эффективность работы” ионного источника или, другими словами, – интенсивность пучка ионов разных зарядовых состояний на 1 Ватт вводимой СВЧ-мощности (при оптимальном уровне вводимой мощности).

Из приведенных зависимостей можно заключить, что ионный источник

DECRIС-4 с модифицированным распределением магнитного поля в области резонанса обеспечивает более эффективное поглощение вводимой СВЧ-мощности электронами плазмы. Это можно объяснить увеличением размера резонансной области и малым градиентом магнитного поля в данной области.

В **заключении** сформулированы основные результаты разработок и исследований:

1. Рассмотрены основные процессы образования и потерь многозарядных ионов в плазме с характерными для ЭЦР-источника параметрами. Описаны физические и технические аспекты получения пучков многозарядных ионов, в том числе и вторичных пучков с помощью метода $1^+ \rightarrow n^+$. На основании анализа существующих схем инжекции вторичных пучков предложен вариант конструкции системы ввода для реализации этого метода во второй стадии проекта DRIBs.
2. Разработана и создана магнитная система ионного источника DECRIС-4. Система, создающая аксиальное магнитное поле, обеспечивает возможность формирования плоского минимума в области резонанса (0.5 Т) при различных уровнях возбуждения основных соленоидов. Система позволяет использовать как симметричное, так и несимметричное распределение магнитного поля с пробочным отношением до 2,6. Радиальная компонента магнитного поля для формирования конфигурации "минимум В" создается гексаполем на постоянных магнитах из NdFeB с концентрацией магнитного потока в рабочей области. Уникальная технология сборки гексаполя позволила получить уровень магнитного поля на стенке разрядной камеры, превышающий 1,1 Т с неравномерностью не более 3% при диаметре гексаполя 160 мм.
3. Разработана и создана система СВЧ-питания, а также другие вспомогательные системы источника. Конструкция разрядной камеры, являющейся нагрузкой СВЧ-системы, в значительной степени упрощена по сравнению с предыдущими версиями источника DECRIС. Она позволяет использовать различные вспомогательные устройства, такие как экран с косвенным подогревом, микروпечь большего диаметра с контролем температуры и т.п. Ввод СВЧ-мощности непосредственно в разрядную камеру позволил значительно сократить потери мощности по сравнению с ис-

пользованием коаксиально-волноводного перехода. Использование подвижного bias – электрода позволяет упростить настройку ионного источника и стабилизировать разряд на предельных уровнях вводимой мощности.

4. Проведены эксперименты по получению пучков многозарядных ионов из источника DECRIS-4 в непрерывном режиме. В результате оптимизации режимов работы источника были получены токи ионов $^{40}\text{Ar}^{8+} = 320\mu\text{A}$; $^{16}\text{O}^{6+} = 370\mu\text{A}$ при уровне вводимой СВЧ-мощности, не превышающей 100 Вт; $^{86}\text{Kr}^{12+} = 85\mu\text{A}$ при мощности $P=150$ Вт. Показано, что источник с модифицированным распределением магнитного поля в области резонанса обеспечивает более эффективное поглощение электронами плазмы вводимой СВЧ-мощности а также стабильную, надежную работу во время эксперимента, хорошую повторяемость режимов работы.
5. Проведены исследования влияния распределения осевого магнитного поля в районе экстракции источника и уровня магнитного поля в области резонанса на выход многозарядных ионов. Экспериментально показано, что для ионов средних зарядов оптимум магнитного поля в районе экстракции составляет примерно 1.1 – 1.2 Т, при этом плазменный электрод находится в области магнитных полей порядка 0.9 – 1 Т. Оптимальное магнитное поле в области резонансной зоны имеет небольшой наклон в направлении экстракции, величина которого зависит от заряда получаемого иона.
6. В данной конфигурации магнитного поля экспериментально исследовано влияние вспомогательных газов и электрода с отрицательным потенциалом (bias - электрода) при получении пучков многозарядных тяжелых ионов. Показано, что в зависимости от заряда иона использование гелия или кислорода в качестве балластного газа приводит к увеличению выхода ионов до 30% (для ионов средних зарядов). Показано, что оптимальное положение bias - электрода находится в области максимума магнитного поля со стороны инжекции. Оптимальный потенциал на электроде по отношению к стенке разрядной камеры лежит в диапазоне от -50 до -300 В в зависимости от заряда и массы получаемого иона.

Выбор оптимального положения электрода позволяет получить значения отраженной мощности, не превышающие 10%.

7. Проведено численное моделирование трассы ввода вторичных пучков однозарядных ионов в плазменную камеру ионного источника DECRIS-4 с использованием программных пакетов TRANSPORT и IGUN. В результате расчетов найдено оптимальное расположение, а также характеристики элементов трассы для обеспечения ввода пучка с максимальной эффективностью. Предложены варианты реализации конструкции ввода пучка и проведено сравнение электростатических линз различных конфигураций.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. М.Лепорис, С.Л.Богомолов, А.А.Ефремов, Г.Г.Гульбекян: *Основные принципы метода $1^+ \rightarrow n^+$ (для дальнейшего применения в проекте DRIBs)*, Сообщение ОИЯИ, Р9-2003-57, Дубна, 2003.
2. M. Leporis, S.L. Bogomolov, A.A. Efremov, G.G. Gulbekian: *The NEW ECR ION SOURCE DECRIS-4 (PROJECT)*, Preprint JINR, E9-2003-130, Dubna, 2003.
3. M. Leporis, S.L. Bogomolov, A.A. Efremov, G.G. Gulbekian: *The NEW ECR ION SOURCE DECRIS-4*, Rev. Scient. Instr. Vol.75 (5), May 2004, p.1492
4. M. Leporis., V. Bekhterev, S. Bogomolov, A. Efremov, G. Gulbekian, Yu. Kostyukhov: *THE NEW ION SOURCE DECRIS-4 FOR THE SECOND PHASE OF DRIBS PROJECT*, "Proceedings of RuPAC XIX", Dubna, Russia, 2004,
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/r04/papers/TUIP05.PDF>
5. M. Leporis., V. Bekhterev, S. Bogomolov, A. Efremov, G. Gulbekian, Yu. Kostyukhov: *DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE NEW ION SOURCE DECRIS-4*, "The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications", Tokio, Japan, 2004,
http://ribfweb1.riken.go.jp/cyc2004/proceedings/data/CYC2004_papers/19P19.pdf

6. М.Лепорис: *Расчет системы инжекции пучка однозарядных ионов в ЭЦР-источник*, Сообщение ОИЯИ, Р9-2005-47, Дубна, 2005.
7. Efremov A., Bogomolov S., Leporis M.: *RECENT DEVELOPMENTS IN ECRIS TECHNOLOGY AT FLNR JINR*, VI International workshop on "STRONG MICROWAVES IN PLASMAS" Nizhny Novgorod, Russia, 2005, Book of abstracts, D10
8. Leporis M., Bekhterev V., Bogomolov S., Efremov A., Gulbekian G., Kostyukhov Yu., Lebedev A., Loginov V., Yazvitsky N.: *THE NEW ECR ION SOURCE DECRIS-4 FOR THE U400 CYCLOTRON*, "11th International Conference on Ion Sources" (Caen, France, 2005); Book of abstracts, PB16, p.101, accepted for public. in Rev.Sci.Instrum.
9. Leporis M., Bekhterev V., Bogomolov S., Efremov A., Gulbekian G., Kostyukhov Yu., Lebedev A., Loginov V., Yazvitsky N.: *Preliminary tests of the new ECR ion source DECRIS-4 for the U-400 cyclotron*, "XXXIV EUROPEAN CYCLOTRON PROGRESS MEETING" (ECPM 2005), Belgrade, Serbia and Montenegro, 2005; Book of abstracts, T5-3, p.59

Получено 1 декабря 2005 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 01.12.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,43. Тираж 100 экз. Заказ № 55126.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru
www.jinr.ru/publish/