

4-578

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-95-184

На правах рукописи
УДК 621.3.038.612

ЧЖАО
Хунвей

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ПУЧКА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ИЗ ИСТОЧНИКА DECRIS

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1995.

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

Научные руководители:
кандидат технических наук

старший научный сотрудник
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

доктор физико-математических наук

Ведущая научная организация:
Российский научный центр "Курчатовский Институт"
Институт Общей и Ядерной Физики, г. Москва

Защита диссертации состоится " " 1995 г. в " " часов на заседании специализированного совета Д-047.01.06 при Лаборатории сверхвысоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математических наук


В.Г.Кривохижин

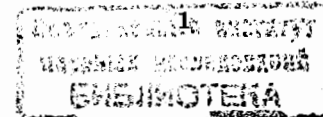
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

С развитием ядерной физики тяжелых ионов и атомной физики ионные пучки высокой энергии, высокой интенсивности и высокой зарядности становятся все более и более важными. И как следствие за последние десять лет во всем мире были предложены проекты сооружения новых ускорителей, или модернизации действующих. Одной из наиболее важных задач для таких ускорительных систем является разработка и создание надежного и с большим ресурсом работы ионного источника высокозарядных ионов большой интенсивности. Одним из наиболее эффективных способов получения интенсивных и высокозарядных пучков является использование источника ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР). Это подтверждает существенный прогресс в развитии ЭЦР источников во всем мире за последние десять лет. в настоящее время более 50 ЭЦР-источников используются для получения многозарядных ионов. Однако развитие ЭЦР источников по-прежнему остается актуальной задачей, так как в значительной мере определяет возможности тяжелоионных циклотронов, линейных ускорителей, синхротронов, накопительных колец, ускорителей радиоактивных пучков, коллайдеров тяжелых ионов нового поколения, а также исследований в области атомной физики. Такой широкий спектр приложений ЭЦР источников ионов определяется следующими их преимуществами:

- получением высокозарядных состояний (до Ar^{18+} или Pb^{40+})
- отличной стабильностью в работе (несколько недель для газообразных элементов)
- высокой интенсивностью (до 1 mA для O^{6+} и несколько десятков микроампер для ионов твердых веществ)
- широким набором ионов (от любых газов до W, Ta, U)
- надежностью (практически безостановочная работа из-за отсутствия проблем, связанных с распылением электродов)
- простотой управления (всего 3-5 настраиваемых параметров)

ЭЦР-источник был впервые создан Р. Желлером и его группой в Гренобле (Франция) для получения многозарядных ионов в 1974г. С тех пор физика



и технология ЭЦР-источников для получения многозарядных ионов быстро продвинулись благодаря усилиям нескольких лабораторий. За последние десять лет ЭЦР-источники ионов получили развитие от больших размеров с большим потреблением мощности, комплексных прототипов (типа SUPERMAFIOS, MINIMAFIOS) до компактных простых, эффективных с высокими характеристиками получения многозарядных ионов.

Цель работы :

1. Создание ЭЦР источника высокозарядных ионов.
2. Экспериментальное и теоретическое изучение эффекта смешивания газов на выход многозарядных ионов из источника.
3. Разработка оптимизированного компактного ЭЦР-источника многозарядных ионов.

Научная новизна :

1. Впервые в странах-участницах ОИЯИ разработан компактный ЭЦР источник ионов нового поколения.
2. Впервые в ЭЦР источнике используется новая конструкция гексаполя с непрерывным изменением оси легкого намагничивания.
3. Впервые экспериментально исследовано влияние смеси газов и отрицательного потенциала в плазме ЭЦР разряда на выход высокозарядных ионов из источника, а также теоретически изучен эффект вспомогательного газа на параметры плазмы ЭЦР-источника.

Практическая ценность работы.

1. Созданный и исследованный ЭЦР-источник установлен на циклотроне тяжелых ионов У-400М и позволяет существенно расширить диапазон ускоренных ионов, энергию и интенсивность пучков.
2. Реализация режимов разряда в ЭЦР-источнике с использованием эффектов отрицательного потенциала и смеси газов позволяет существенно увеличить интенсивность пучков высокозарядных ионов. Применение вспомогательного газа позволяет значительно (на 60%) снизить расход рабочего вещества, что исключительно важно для получения пучков ионов обогащенных и радиоактивных изотопов.

3. Разработанный компактный ЭЦР источник позволяет получить высокие параметры пучков ионов при существенном упрощении технической реализации, удешевлении стоимости создания и эксплуатации. Благодаря высокой эффективности и уникальной конструкции предусматривается возможность использования компактного ЭЦР-источника в проекте развития циклотронного комплекса ЛЯР ОИЯИ для получения ускоренных пучков ионов радиоактивных изотопов (U400M+ECRIS+U400).

Апробация работы.

Работы включенные в диссертацию были представлены на Международных и Национальных конференциях, в том числе:

13th International Conference on Cyclotron and Their Application (Vacouver, Canada, 1992); 29th European Cyclotron Progress Meeting (Dubna, Russia, 1994); International Workshop on Physics with Polarized Beams and Targets (Prague, Czech Republic, 1994); 7th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (Vienna, Austria, 1994); First International Symposium on Beam Technologies BT'95 (Dubna, Russia, 1995).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 10 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы; содержит 121 страниц машинописного текста, в том числе 72 рисунков, 11 таблиц и список цитируемой литературы из 110 наименований.

На защиту выносятся следующие положения, результаты, разработки:

1. Создание нового современного ЭЦР источника ионов DECRIS-14-2 (Dubna Electron Cyclotron Resonance Ion Source at 14 GHz) для циклотрона тяжелых ионов ЛЯР ОИЯИ.
2. Реализация магнитной системы с предельно высоким уровнем магнитного поля до 1,2 Т в аксиальном направлении и более 1,0 Т на стенке разрядной камеры в радиальном направлении.
3. Получение интенсивных высокозарядных пучков ионов ($^{16}O^{6+}$, 135 μA ; $^{40}Ar^{11+}$, 25 μA ; $^{132}Xe^{18+}$, 31 μA) при использовании электрода с отрицательным потенциалом и эффекта смеси рабочего и дополнительного газов, увеличивающих ток пучка ионов высоких зарядов более, чем в 2 раза по сравнению с ионным источником с дополнительной ступенью ионизации.

4. Проведение численных расчетов на основе созданной модели баланса частиц и интерпретация эффекта смеси газов на выход многозарядных ионов как суперпозиция нескольких факторов: ионного охлаждения, увеличения электронной плотности и провисания потенциала, уменьшения среднего зарядового состояния и других, среди которых первые два являются доминирующими.
5. Оптимизация и разработка компактного ЭЦР-источника ионов на частоте 10 ГГц с параметрами, сравнимыми с лучшими источниками ионов на частотах 14 ГГц, за счет новой магнитной структуры гексаполя с непрерывным изменением оси легкого намагничивания.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность развития и сегодняшнее состояние ЭЦР-источников для многозарядных ионов, сформулированы цели и задачи диссертации, приводится краткое содержание диссертации.

Первая глава содержит описание основных принципов работы ЭЦР-источников ионов и их систем. Исследованы и обсуждены вопросы согласованного ввода в плазму СВЧ-мощности, поглощения электромагнитного излучения в плазме и движение электронов в ЭЦР-ловушке. Рассмотрены параметры плазмы ЭЦР разряда такие, как электронная и ионная температуры, плотность плазмы, время удержания, потенциал в плазме и энергетический разброс ионов ЭЦР-источников на базе данных различных лабораторий мира. С учетом тенденций современного развития показаны пути оптимизации ЭЦР-источников ионов за счет дополнительной инжекции электронов в плазму разряда; увеличения уровня магнитного поля, использования смеси газов, увеличения ионизационного объема и частоты СВЧ-накачки.

Во второй главе представлены особенности конструкции ЭЦР-источника DECRIS-14-2, экспериментальные исследования и результаты по оптимизации выхода многозарядных ионов. Даны физические и технические аспекты получения ионов твердых веществ, методика измерения эмиттанса пучков многозарядных ионов.

На рис. 1 показана структурная схема ионного источника DECRIS-14-2. Конфигурация магнитного поля с "минимумом В" создается в результате суперпозиции аксиальной магнитной ловушки от двух катушек и радиального гексапольного поля постоянных FeNdB магнитов. СВЧ система включает в себя коммерческий генератор на 14 ГГц и волноводный тракт, согласованный

с резонатором ЭЦР-источника. Вакуум на уровне 1×10^{-5} Па обеспечивается двумя турбомолекулярными насосами, осуществляющими откачку ионного источника со стороны инжекции рабочих веществ и экстракции ионного пучка соответственно.

Два соленоида расположены на краях гексаполя и вделаны в железное ярмо. На рис. 2 показано измеренное аксиальное магнитное поле. Аксиальная магнитная ловушка, как видно, создана внутри гексаполя. Максимум аксиального распределения магнитного поля со стороны инжекции достигает 1,2 Т. Градиент магнитного поля вдоль радиуса и оси также очень высок и составляет от 0,4 до 1,2 Т, что является необходимым для наибольшего выхода многозарядных ионов. Амплитуда аксиального магнитного поля в области экстракции в этом случае должна составлять около 0,85 Т.

Высокий уровень аксиального магнитного поля достигнут за счет оптимизации соленоидальных катушек. Минимальный внутренний размер катушек определяется минимизацией гексаполя. Гексаполь имеет специальную геометрию и состоит из набора колец двух разных внешних диаметров. Центральная часть гексаполя, которая расположена между катушками имеет большую толщину, чтобы получить интенсивное радиальное поле на стенке разрядной камеры и тем самым улучшить условия удержания плазмы в разряде. Боковые кольца гексаполя имеют меньший внешний диаметр, чтобы уменьшить внутренний размер катушек и тем самым добиться максимального аксиального поля. Два центральных кольца гексаполя состоят из 24 сегментов каждый, внешние кольца - из 12. Измеренное радиальное магнитное поле всего гексаполя было измерено вдоль оси и представлено на рис. 3.

ЭЦР-источник DECRIS-14-2 был испытан и исследован при получении ионов азота, кислорода, неона, аргона и ксенона. Получение высокозарядных ионов этих газов было оптимизировано с использованием эффекта смеси газов и электрода с отрицательным потенциалом (без первой ступени источника). Результаты собраны в таблице 1.

В таблице 2. представлены типичные токи ионов и факторы роста тока при эффектах смеси газов и отрицательного потенциала.

Сравнение выхода ионных токов из источника с первой ступенью и отрицательным потенциалом (без первой ступени) показано в таблице 3 (в обоих случаях с эффектом смеси газов).

Таблица 1. Результаты, полученные в первых экспериментах на источнике ионов DECRIS-14-2. Токи ионов ($e\mu A$) получены при СВЧ мощности менее 250 ватт и вытягивающем напряжении 10 кВ.

I \ Q	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
^{14}N	110	20														
^{16}O	180	135	24													
^{20}Ne		90	56	20												
^{40}Ar				166	98		25									
^{132}Xe									20	23	26		29	31	28	18

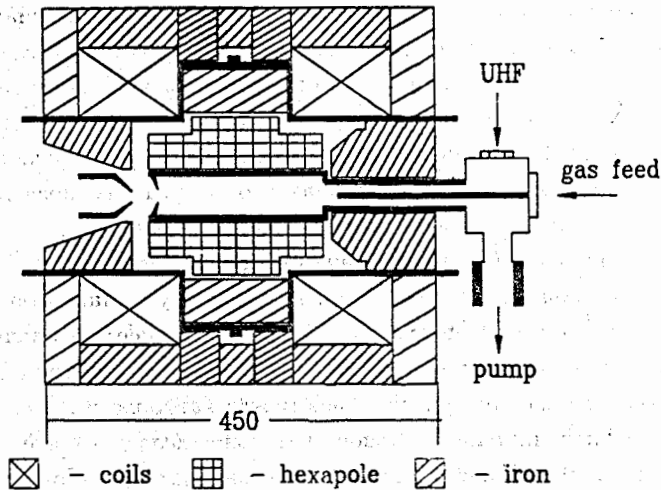


Рис.1. Схема DECRIS-14-2.

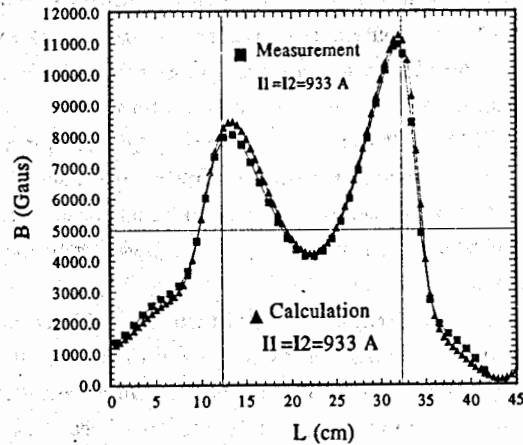


Рис.2. Распределение аксиального магнитного поля.

Таблица 2. Результаты исследований выхода высокозарядных ионов из источника ($e\mu A$) для кислорода, аргона и ксенона в случае использования первой ступени, а также эффекта смеси газов и отрицательного потенциала.

I (μA)	первая ступень	отрицательный потенциал + смесь газов	фактор увеличения
$^{16}O^{6+}$	60	135	2.25
$^{40}Ar^{11+}$	11	25	2.27
$^{132}Xe^{18+}$	14	31	2.21

Таблица 3. Сравнение типичных ионных токов из DECRIS-14-2 в случае использования первой ступени с электродом под отрицательным потенциалом или без него. (в обоих случаях - с эффектом смеси газов).

I (μA)	первая ступень	электрод с отрицательным потенциалом	фактор увеличения
$^{16}O^{6+}$	90	135	1.5
$^{40}Ar^{9+}$	63	98	1.56
$^{40}Ar^{11+}$	16.5	25	1.52
$^{132}Xe^{18+}$	23	31	1.35
$^{132}Xe^{19+}$	22	28	1.27

При оптимизации ионного источника с электродом под отрицательным потенциалом токи многозарядных ионов сначала растут, затем достигают насыщения. На рис. 4 показана зависимость тока ионов Ar^{9+} от потенциала на электроде. Оптимальное значение отрицательного потенциала на электроде для различных зарядностей зависит в свою очередь от уровня аксиального

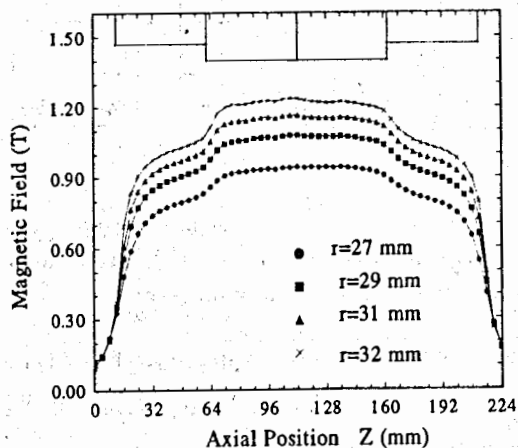


Рис.3. Измеренное радиальное магнитное поле гексаполя вдоль оси на различных радиусах.

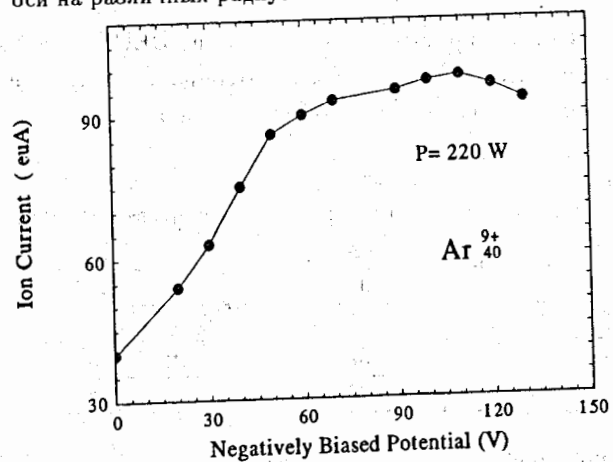


Рис.4. Зависимость ионного тока Ar^{9+} от потенциала отрицательного электрода.

магнитного поля, СВЧ-мощности и расхода газа. Например, величина оптимизированного отрицательного потенциала возрастает от СВЧ-мощности и массы ионов.

Сравнение результатов, полученных в первых экспериментах на DECRIS-14-2 с лучшими мировыми данными представлено на рис. 5.

В третьей главе описываются теоретические расчеты и результаты экспериментального исследования эффекта смеси газов для DECRIS-14-2. Эффект смеси газов обеспечивает существенное увеличение тока высокозарядных ионов в случае, если подмешан второй более легкий газ. Смешивание газов было широко использовано во многих ЭЦР источниках. Но механизм этого эффекта не был достаточно ясен. Чтобы понять физику процесса в данной работе были проведены численные расчеты на основе модели баланса частиц.

ЭЦР-источник рассмотрен, как магнитная ловушка с горячими (несколько кэВ) и тепловыми (несколько десятков эВ) электронами, а также с холодными ионами (несколько эВ). Предполагалось, что ионное удержание зависит от конфигурации магнитного поля и глубины потенциала в плазме. Ионы удерживаются электростатически пространственным зарядом, создаваемым электрическим полем горячих электронов, что соответствует удержанию малым отрицательным потенциалом. Другим предположением является то, что ионы всех видов находятся в тепловом равновесии при одной температуре. Горячие электроны создаются в результате ЭЦР нагрева и удерживаются "В минимум" конфигурацией магнитного поля источника. Предполагается, что время жизни горячих электронов в основном определяется большим углом рассеяния с другими частицами плазмы. Концентрации горячих тепловых электронов распределены в плазме единообразно. Тепловые электроны возникают главным образом в результате ионизации и эмиссии со стенок разрядной камеры. Считается, что тепловые электроны это те, которые не подвергаются ЭЦР-нагреву. Предполагается, что именно они главным образом должны удерживаться положительным потенциалом плазмы. Эффективное время жизни тепловых электронов может быть рассчитано через 90° Шпитцеровское столкновение и потенциал плазмы.

Считается, что в плазме ЭЦР-источника исчезновение нейтралей происходит в результате ионизации электронным ударом, а также процесса перезарядки с ионами. В данной работе рассмотрены одноступенчатая ионизация и одноступенчатая перезарядка, а также потоки нейтралей внутрь плазмы и наружу. Для моделирования этого процесса используется система уравнений, состоящая из семи подсистем, которые связаны квазинейтральностью плазмы,

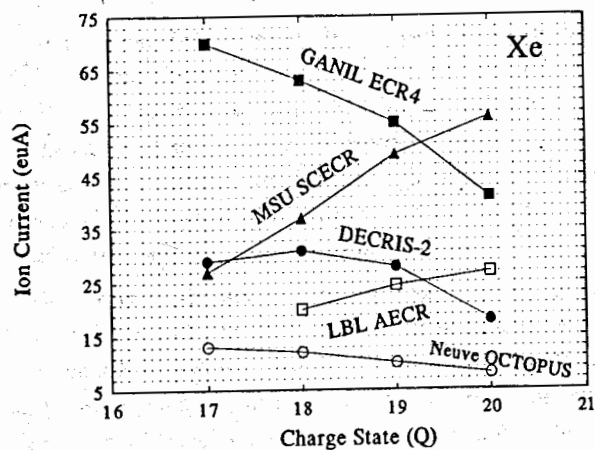


Рис.5. Сравнение результатов, полученных на DECRIS-14-2 с данными лучших источников в мире.

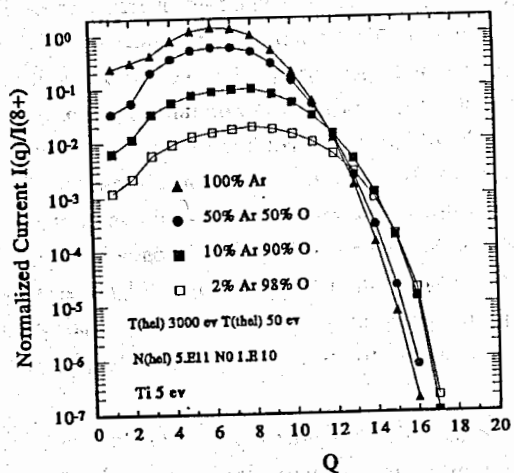


Рис.6. Зарядовое распределение в пучке ионов аргона при различных добавках кислорода. $I(8+)$ означает величину ионного тока Ar^{8+} без вспомогательного газа. Все токи нормированы к $I(8+)$.

плотностью нейтралей в плазме, плотностью ионов с зарядом i ($2 \leq i \leq i_{\text{максимальный}}$) и плотностью однозарядных ионов. Для решения системы уравнений используется компьютер VAX. Входными параметрами программы являются: концентрации нейтральных частиц основного и вспомогательного газов вне плазмы, концентрация и температура горячих электронов, температура тепловых электронов, температура ионов, величина пробочного соотношения, размеры разряда, ионизационные потенциалы и коэффициенты скорости ионизации для основного и поддерживающего газов.

В диссертации представлены результаты расчетов для плазмы аргона с добавкой кислорода. На рис. 6 показано зарядовое распределение при различных концентрациях смеси. Из рисунка видно, что кислород, как вспомогательный газ, дает сдвиг зарядового распределения в сторону высокозарядных состояний. Однако, если процент вспомогательного газа превышает 98%, то его присутствие полезно лишь для очень высоких зарядовых состояний. Расчеты указывают, что средний заряд, потенциал плазмы и коэффициент рассеяния электронов уменьшаются с увеличением процента вспомогательного газа, при постоянном общем количестве нейтралей (рис. 7,8,9) в то время, как провисание потенциала увеличивается в этом случае (рис. 10). На рис. 11 показано, что только изменяя плотность нейтралей вспомогательного газа, можно обнаружить рост плотности тепловых электронов при увеличении концентрации вспомогательного газа. На рис. 12 показана экспериментальная зависимость влияния температуры ионов на зарядовое распределение. Расчеты показывают, что более низкая температура ионов действительно необходима для получения более высокозарядных состояний в плазме. На рис. 13 показаны результаты фитирования при расчетах распределения зарядов в плазме аргона с кислородом в сравнении с экспериментальными данными, полученными на источнике ионов DECRIS-14-2.

С целью увеличения интенсивности пучков ионов из DECRIS-14-2 и экспериментального изучения эффекта смеси газов была выполнена серия экспериментов в различных конфигурациях источника ионов: с первой ступенью, с электродом при отрицательном потенциале (без первой ступени) и с первой ступенью и электродом при отрицательном потенциале. При использовании основных газов (кислород, аргон, ксенон) использовались такие вспомогательные газы, как гелий, кислород, неон.

Сравнение оптимизированных ионных токов, полученных при изучении эффекта смеси газов для источника ионов с первой ступенью и электродом при отрицательном потенциале представлены в таблице 4. Видно, что фактор

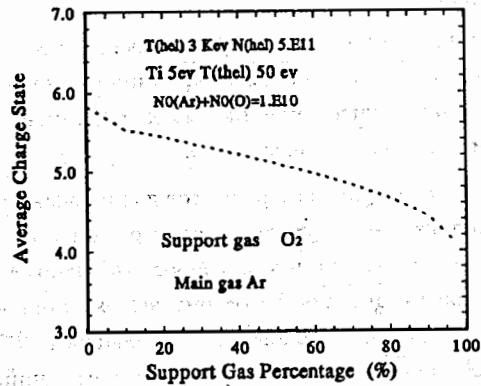


Рис.7. Зависимость среднего зарядового состояния ионов от количества вспомогательного газа при условии постоянной суммарной концентрации.

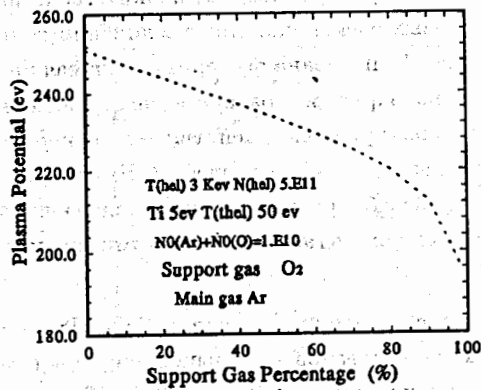


Рис.8. Зависимость потенциала плазмы от количества вспомогательного газа при постоянной суммарной концентрации.

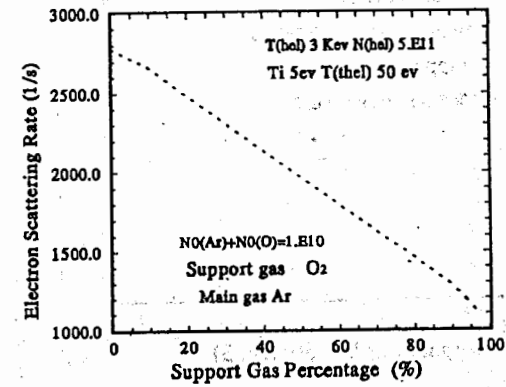


Рис.9. Зависимость коэффициента рассеяния электронов от количества вспомогательного газа при постоянной суммарной концентрации нейтралей.

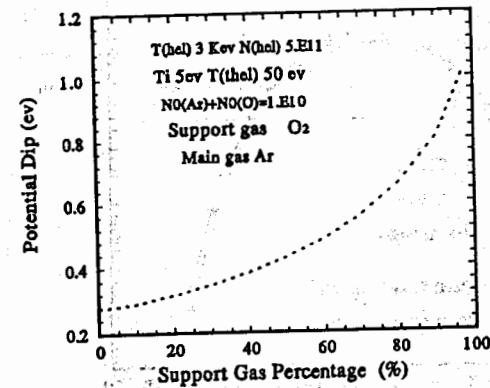


Рис.10. Зависимость провисания потенциала в плазме от количества вспомогательного газа при постоянном количестве нейтралей газов.

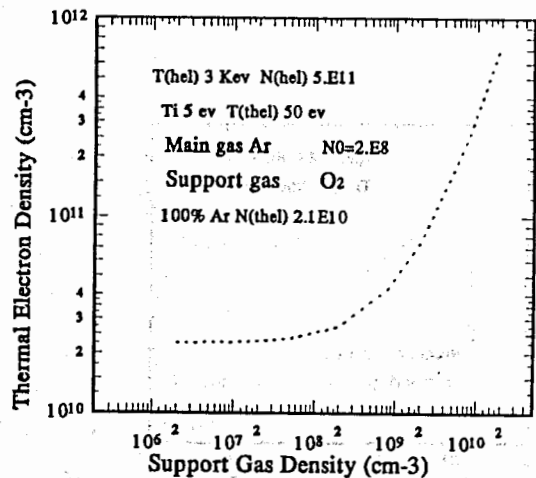


Рис.11. Зависимость плотности тепловых электронов от величины вспомогательного газа при постоянном количестве нейтральной газовой смеси.

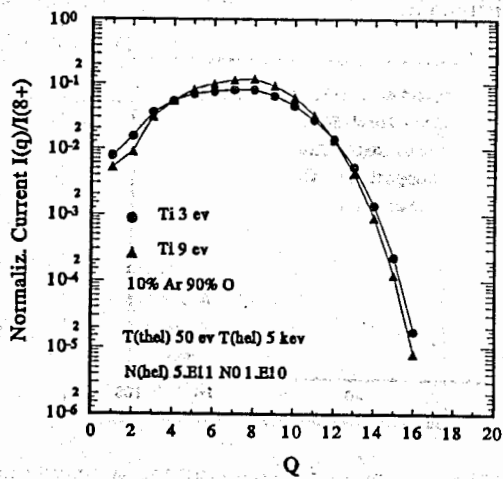


Рис.12. Зарядовое распределение ионов в пучке при различной температуре ионов (Ti). I(8+) и нормировка - см. подпись к рис.6.

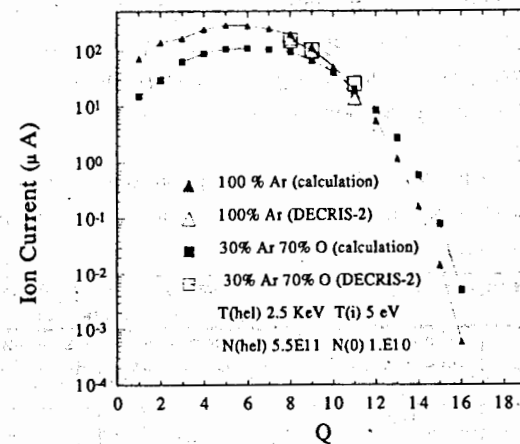


Рис.13. Сравнение расчетного и экспериментального зарядового распределения ионов аргона из DECRIS-14-2 при использовании в качестве вспомогательного газа кислорода.

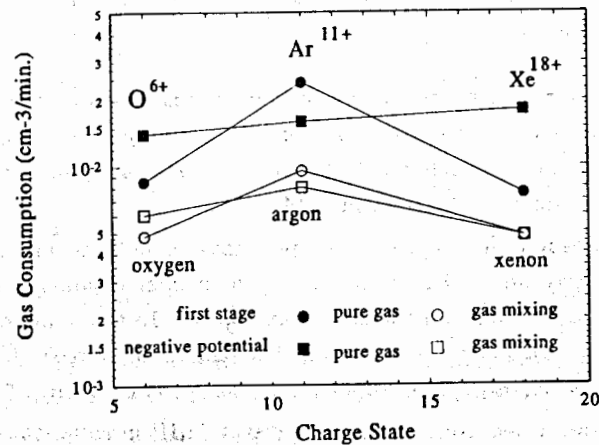


Рис.14. Расход кислорода, аргона и ксенона при использовании вспомогательного газа.

увеличения интенсивности ионных токов при использовании смеси газов в случае электрода при отрицательном потенциале несколько ниже, чем в источнике ионов с первой ступенью. Эффект вспомогательного газа фактически отсутствует при оптимизации пучков ионов Ar^{9+} и Ar^{11+} для варианта источника ионов с электродом при отрицательном потенциале и первой ступенью. Это означает, что эффект смеси газов сдерживается в случае электрода при отрицательном потенциале по сравнению с первой ступенью. Этот факт подразумевает, что увеличение плотности электронов должно быть одной из доминирующих причин эффекта смеси газов.

Таблица 4. Сравнение типичных оптимизированных для данных зарядов токов ионов (мкА) и эффекта смеси газов в случае первой ступени и электрода при отрицательном потенциале.

	первая ступень			электрод при отрицательном потенциале		
	без вспомога- тельного газа	с вспомога- тельным газом	f	без вспомога- тельного газа	с вспомога- тельным газом	f
O^{6+}_{16}	60	90	1.5	116	135	1.16
Ar^{11+}_{40}	11	16.5	1.5	17	25	1.47
He^{17+}_{132}	15	23	1.53	23	28.5	1.24
He^{18+}_{132}	14	23.5	1.68	22	31	1.4
He^{19+}_{132}	14	22	1.57	20	28	1.4

*: В случае $^{16}O^{6+}$ вспомогательным газом был гелий, в других случаях - кислород; f- фактор роста.

Эффект смеси газов не только увеличивает токи высокозарядных ионов, но также существенно уменьшает расход основного газа. Расходы основных газов при получении пучков ионов O^{6+} , Ar^{11+} и He^{18+} в случае использования эффекта смеси газов показаны на рис. 14.

В главе четвертой представлены результаты исследований по оптимизации ионного источника ЭЦР типа на основе использования новой мультипольной системы на постоянных магнитах. На рис.15 показана схема такого усовершенствованного источника ионов DECRIS-10 на частоте СВЧ-накачки 10 ГГц, основные параметры которого представлены в таблице 5.

Этот источник имеет ряд общих с другими ЭЦР источниками элементов таких, как плазменная камера с двойными стенками для охлаждающей воды; медный коаксиальный ввод для СВЧ мощности, напуска рабочего газа или подачи твердого рабочего вещества в разряд с помощью тигля или электрода; конической формы шиммирующее кольцо для изменения величины максимума

аксиального поля и его положения в зоне первой ступени источника; две соленоидальные катушки для создания аксиальной ловушки и ярмо из стали для обеспечения требуемой конфигурации магнитного поля.

Таблица 5. Параметры DECRIS-10

<u>Аксиальное магнитное поле</u>	
Максимальная величина	1,2 Т
Номинальный ток соленоида	900 А
Максимальный ток соленоида	950 А
Длина ловушки второй ступени	15,5 см без железного пуллера 18,0 см с железным пуллером
<u>Гексаполь</u>	
Внешний диаметр	12,0 см
Внутренний диаметр	7,0 см
Длина гексаполя	16,0 см
Поле гексаполя на стенке камеры	0,8 Т
<u>Плазменная камера</u>	
Внутренний диаметр второй ступени	6,5 см
Внутренний диаметр первой ступени	2,5 см
Длина второй ступени	16,0 см
<u>Соленоид</u>	
Число катушек	2
Внутренний диаметр	13,0 см
Внешний диаметр	34,0 см
Число обмоток	4 двойных
Число витков	11
Максимальная электрическая мощность	40 kW
Расход охлаждающей воды	11,0 л/мин
Давление воды	4 атм
Длина проводника для 2-х катушек	130м

Но что особенно важно, этот источник имеет принципиально новую мультипольную магнитную систему с непрерывным изменением оси легкого намагничивания. Такая магнитная система позволяет получить более сильное магнитное поле при меньших размерах мультипольного магнита. В то же время аксиальная магнитная система имеет более низкое потребление электроэнергии. На рис.16 представлено радиальное магнитное поле для гексаполя с непрерывным изменением оси легкого намагничивания в сравнении с классической

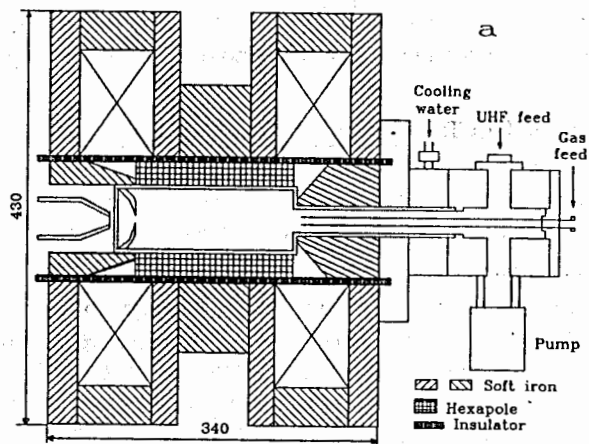


Рис.15. Схема нового ЭЦР-источника DECRI-10.

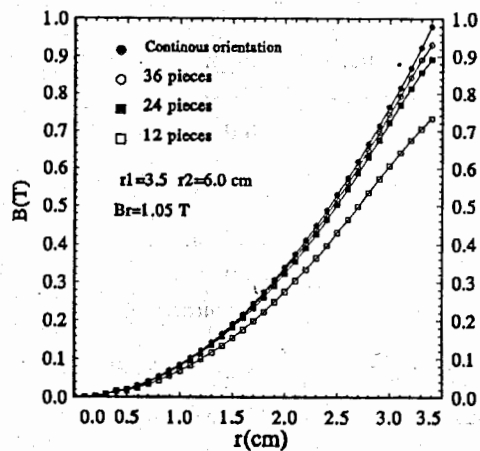


Рис.16. Радиальное магнитное поле для гексаполя с непрерывным изменением оси легкого намагничивания в сравнении с классической конфигурацией, состоящей из 12, 24 и 36 частей.

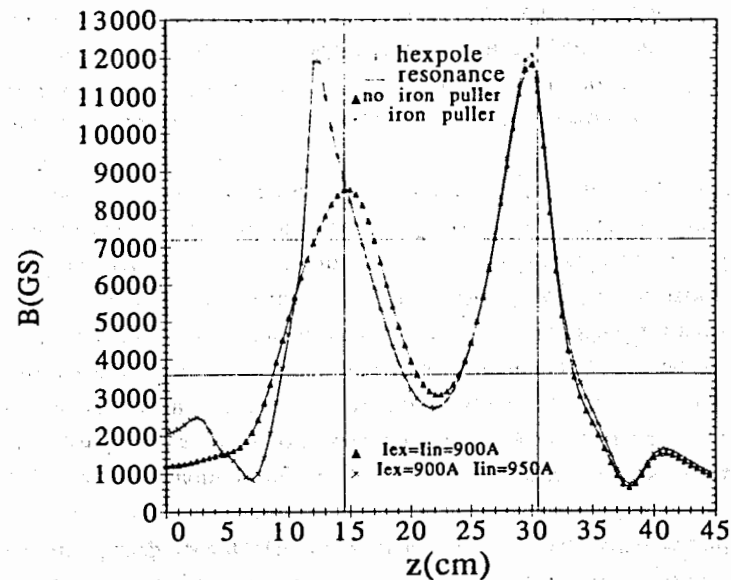


Рис.17. Распределение аксиального магнитного поля в DECRI-10.

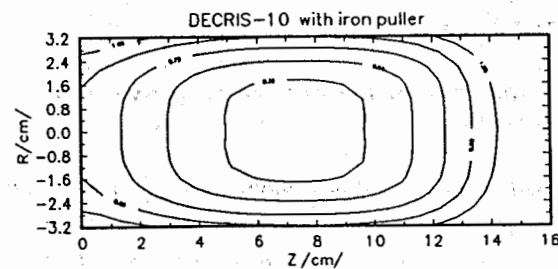


Рис.18. Положения магнитных эквипотенциальных поверхностей во второй ступени DECRI-10.

конструкцией, состоящей из 12,24 и 36 частей. Другим исключительно важным преимуществом новой конструкции является то, что величина полного радиального магнитного поля на том же радиусе остается постоянной при различных азимутальных углах, что очень важно для радиального удержания плазмы.

Усовершенствованная версия мультипольной системы на постоянных магнитах в случае большего числа полюсов (более чем 12) может увеличить, как показывают расчеты, эффективный ионизационный объем ЭЦР разряда.

Особое внимание в работе было уделено оптимизации конфигурации аксиального магнитного поля. Задача состоит в выборе компромисса между требуемой конфигурацией магнитного поля, размерами источника и величиной потребляемой электрической мощности. Очень важно оптимизировать конфигурацию катушек (число слоев и витков) и относительное расположение катушек, чтобы минимизировать объем магнитного поля. На рис.17 показаны два варианта разработанных конфигураций магнитного поля (с железным пуллером и пуллером из нержавеющей стали). Обе конфигурации имеют высокий уровень магнитного поля (1,2Т) вблизи первой ступени и достаточно сильный градиент в области между первой и второй ступенями. На рис. 18 показаны положения эквипотенциальных магнитных поверхностей внутри разрядной камеры и можно видеть, что вторая ЭЦР поверхность также полностью замкнута внутри разрядной камеры.

В заключении сформулированы основные результаты разработок и исследований :

1. На основании анализа конструкций современных ЭЦР-источников разработан и создан ионный источник DECRIS-14-2 для системы аксиальной инжекции на циклотроне У-400М. Согласно современным тенденциям в развитии техники получения многозарядных ионов в источнике использована конструкция магнитной системы с концентрацией магнитного потока в рабочей области, что позволяет получать величину магнитного поля в аксиальном направлении до 1,2 Т и величину радиальной составляющей магнитного поля на поверхности ионизационной камеры более 1,0 Т. По сравнению с существующими ЭЦР-источниками источник DECRIS-14-2 отличается относительно низким энергопотреблением (55 кВт) и использованием низкого давления охлаждающей жидкости.
2. Проведены эксперименты по получению пучков многозарядных ионов из источника DECRIS-14-2 с различными конфигурациями первой ступени

источника. Впервые показано, что использование погруженного в плазму электрода под отрицательным потенциалом совместно с подачей вспомогательного газа позволяет увеличить токи многозарядных ионов в среднем в 2,3 раза по сравнению с использованием традиционной конструкции первой ступени. В результате оптимизации режимов работы источника были получены токи ионов $^{16}O^{6+}$ - 135 мкА, $^{40}Ar^{11+}$ - 25 мкА, $^{132}Xe^{18+}$ - 31 мкА и другие. Следует отметить стабильную и надежную работу источника во время эксперимента. Полученные интенсивности тяжелых многозарядных ионов, таких как Хе с зарядами от 14+ до 20+, находятся на уровне, характерном для лучших современных ЭЦР-источников, в научных центрах Франции, США и др.

3. Проведено численное изучение эффекта смеси газов для ЭЦР-источников на основе созданной для этой цели компьютерной программы. Изучено влияние газовых смесей различных концентраций на основные параметры, характеризующие получение и потери многозарядных ионов в плазме, такие как: время жизни ионов, потенциал плазмы, величина потенциального барьера для ионов, температура ионов и т.д.. Получены распределения ионов по зарядам для Аг и Хе в смеси с кислородом. Показано, что применение добавочных газов увеличивает выход ионов с зарядами, выше среднего. На основании анализа результатов дано объяснение этого эффекта.
4. Впервые проведено экспериментальное изучение эффекта смеси газов на источнике с одной и двумя ступенями и при подаче отрицательного потенциала на плазму. Показано, что использование гелия и кислорода в качестве добавочных газов позволяет увеличить токи многозарядных ионов, таких как $^{132}Xe^{18+}$ в 1,5 - 1,7 раза в случае работы с первой и второй ступенями и в 1,2 - 1,4 раза при подаче потенциала на плазму только второй ступени. Эффект практически отсутствует при получении ионов более низких зарядностей, например, таких как $^{40}Ar^{8+}$ и $^{40}Ar^{9+}$, что согласуется с результатами расчетов.

Впервые показано, что подача отрицательного потенциала на плазму ограничивает эффект от применения смесей газов, что не может быть объяснено в рамках известной теории "ионного охлаждения". Установлено, что использование добавочных газов позволяет уменьшить потребление основного газа более чем на 60 %, что является исключительно важным при работе на дорогостоящих изотопах и при получении

вторичных радиоактивных пучков.

5. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложена интерпретация полученных результатов, а также пути улучшения выходных параметров данного ионного источника как с точки зрения увеличения интенсивности извлекаемого пучка многозарядных ионов газовых элементов, так и получения ионов твердых веществ.

Разработана конструкция компактного ЭЦР-источника на частоту 10 ГГц с пониженным потреблением электрической мощности (менее 40 кВт) при сохранении амплитуды аксиальной составляющей магнитного поля на уровне 1,2 Т. Показано, что применение новой конструкции системы формирования радиальной составляющей магнитного поля (гексаполя), позволяет наиболее эффективно использовать материал постоянных магнитов, приводит к уменьшению внешних размеров гексаполя и, как результат, к значительному упрощению конструкции источника и снижению потребляемой на создание магнитного поля мощности.

Данная конструкция может быть использована в качестве базовой при разработке ионного источника для получения вторичных радиоактивных пучков.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- (1). H.W.Zhao, A.Efremov, V.Kutner, " Numerical Study on the Gas Mixing Effect in ECR Ion Sources " , Abstracts for the 7th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, September 19-23, 1994, Vienna, Edited by F.Aumayr and HP.Winter, Technische Universitat Wien, Austria, P. Mo59. The paper will be Published in N.I.M B (accepted) .
- (2). Zhao Hongwei, Zhiqing Shen, Baowen Wei. "Emittance Measurements in the HIRFL Beam Line", Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, July 6-10,1992. Edited by G.Dutto and M.K.Craddock , World Scientific. P479, 1993.
- (3). A.Efremov, V.Kutner, H.W.Zhao, A.Lebedev, V.Loginov, N.Yazvitskiy, " DECRIS-14-2, Design Aspects and Preliminary Results " , JINR Preprint, E9-95-111, 1995.
- (4). A.A.Efremov, V.B.Kutner, Zhao Hongwei." Design of a New ECRIS with a Hexapole of Continuous Easy Axis Orientations " , JINR Preprint, E9-93-441,1993.

- (5). V.B.Kutner, A.A.Efremov, Zhao Hongwei. " Radioactive Ion Beam Production by ECR Ion Sources" , Abstracts of the first International Symposium on Beam Technologies (BT'95), March, 1995, Dubna, Russia, p24. The paper will be published in the proceedings of the symposium. JINR preprint E9-95-113, 1995.

- (6). Hongwei Zhao, A.Efremov, V.Kutner. " Calculation of the Gas Mixing Effect in ECRIS " , JINR preprint, E9-94-398, 1994.

- (7). A.Efremov, V.Kutner, H.W.Zhao, A.Lebedev, V.Loginov, N.Yazvitskiy, J.Pivarc, " Experimental Studies on the Gas Mixing Effect on DECRIS-14-2 " , JINR preprint E9-95-112, 1995.

- (8). Wei Baowen, Liu Zhanwen, Zhang Wen, Wu Dezhong, Zhao Hongwei, Yuan Ping, Zhang Xuezheng, Ma Yingjie, A.Efremov. " Study on The Magnetic Field of CAPRICE Type ECR Source" , Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, July 6-10,1992. Edited by G.Dutto and M.K.Craddock , World Scientific. P344, 1993

- (9). Zhao Hongwei, Shen Zhiqing, Wei Baowen. "The Best Beam Configuration for Making Optimum Emittance Measurements with Three-Position Method" , 1991 IMP Annual Report (in English), Chinese Atomic Energy Press, P.8, 1992.

- (10). Zhao Hongwei, Shen Zhiqing, Wei Baowen. " Emittance Measurements in HIRFL Beam Line with Three-Gradient Method" , 1991 IMP Annual Report, Chinese Atomic Energy Press, P.6, 1992.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 апреля 1995 года.