

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

E-924

На правах рукописи

9-94-101

ЕФРЕМОВ
Андрей Александрович

УДК 621.3.038.612

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ИОНОВ
ЭЦР-ТИПА DECRIS И ИССЛЕДОВАНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1994

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Научный руководитель:
кандидат технических наук

старший научный сотрудник

В.Б.Кутнер

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Р.Ц.Оганесян

кандидат физико-математических наук

В.Д.Пекленков

Ведущая научная организация:

Российский научный центр "Курчатовский институт"
Институт Общей и Ядерной физики, г. Москва


Защита диссертации состоится " " 1994 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 " " 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

кандидат физико-математических наук


В.Г.Кривохижин

Актуальность проблемы. Ускоренные тяжелые ионы находят все более широкое применение в различных областях фундаментальной физики: исследовании структуры ядра и ядерных взаимодействий¹ синтезе новых сверхтяжелых элементов и легких нейтроноизбыточных изотопов, находящихся вблизи границы стабильности²³ и т.д. Пучки тяжелых ионов применяются для исследований в области атомной физики, для решения прикладных и технологических задач.

Интерес к этому направлению исследований подтверждается тем, что после ввода в действие крупных ускорителей тяжелых ионов У-400 ЛЯР ОИЯИ (Дубна), и UNILAC GSI (Германия) создан трехциклотронный ускорительный комплекс GANIL (Франция), в процессе наладки находится ускорительный комплекс У-400 + У-400М ОИЯИ (Дубна) и многие другие. В короткий период с 1987 по 1989 годы осуществлен запуск ионных накопителей IUCF cooler (США), TARN 2 (Япония), TSR MPI (Германия), CELCIUS (Швеция). Создается тяжелоионный накопитель COSY (ФРГ) и проектируется накопительное кольцо в ОИЯИ (Дубна).

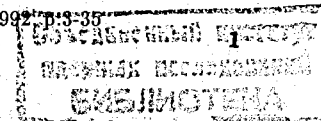
К современным ускорительным комплексам тяжелых ионов предъявляются все более жесткие требования по повышению энергии и интенсивности ускоренных пучков, обеспечению долговременной стабильности пучка, снижению энергетического разброса пучка для проведения прецизионных исследований в области ядерной спектроскопии. Кроме того, в последнее время повышается интерес к ускоренным пучкам редких и радиоактивных изотопов.

Одним из составных элементов ускорительного комплекса, во многом определяющего его параметры, является ионный источник. В настоящее время почти на всех крупных тяжелоионных ускорителях западных стран используются источники ЭЦР-типа (источник с нагревом плазменных электронов СВЧ-волной в области Электронного Циклотронного Резонанса). По сравнению с традиционными дуговыми источниками, ЭЦР-ионные источники обладают следующими основными преимуществами:

¹Greiner W. Past and future of heavy ion research. -In: Proc. of the Symposium "10 Years of Uranium Bea. at the UNILAC, April 2-4, 1986, GSI Darmstadt. -GSI-86-19 report 1986, p.507-553.

²Oganessian Yu. Ts. Transmendelevium elements: the present and the future.-Proc of the Robert A. Welch Conference on Chemical Research XXXIV "Fifty years with transuranium elements". October 22-23, 1990, Houston, Texas, p.159-197.

³Oganessian Yu. Ts., Penionzhkevich Yu. E., Ter-Akopian G. M. Investigations of exotic nuclei in Dubna. -In: Proc. of the Int. Conf. on Exotic Nuclei, 1-5 October 1991, Foros, Crimea. -World Scientific, Singapore, 1992.



- источник не имеет быстроразрушающихся в процессе работы частей (таких, как катод дугового источника), что обеспечивает его надежную, стабильную непрерывную работу в течении месяцев (для газов);
- энергия электронов не ограничена напряжением разряда, что приводит к нагреву плазменных электронов до десятков кэВ. Кроме того, специальная конфигурация магнитного поля повышает время нахождения иона в области ионизации, что в конечном итоге обеспечивает получение ионов с более высоким зарядом;
- низкое давление нейтралей в ионизационной камере, обычно находящееся в диапазоне 2×10^{-7} Торр позволяет значительно уменьшить интенсивность процессов перезарядки и обеспечивает низкую газовую нагрузку в линии транспортировки и ускорителе, что приводит к снижению потерь ионного пучка в процессе его транспортировки и ускорения;
- из-за селективного нагрева плазменных электронов в области ЭЦР, ионы остаются "холодными". Энергетический разброс ионов в пучке составляет обычно величину порядка $5 \times Q$ эВ (Q - заряд иона).
- эмиттанс пучка для ЭЦР-источников обычно не превышает величину порядка 200π мм мрад при напряжении экстракции 10 кВ, что позволяет осуществлять эффективную транспортировку пучка от ионного источника до ускорителя или физической мишени.

Современные ЭЦР-источники позволяют получать ядра элементов до массы 20 с интенсивностью до 1 мкА. Для более тяжелых ионов уровень в 1 мкА приходится на Kr^{25+} и Xe^{32+} . Использование ЭЦР-источников на существующих ускорителях позволило получить существенный выигрыш в энергии, интенсивности пучков, надежности работы и диапазоне ускоряемых ионов.

Цель работы:

1. Создание источника интенсивных пучков многозарядных ионов ЭЦР-типа.
2. Исследование физических и технических условий получения многозарядных ионов в ЭЦР-источнике.

Научная новизна:

1. Впервые в ОИЯИ и странах-участницах создан источник ионов ЭЦР-типа, обеспечивающий получение интенсивных пучков многозарядных ионов вплоть до ксенона.
2. Впервые для источника ЭЦР-типа применен гексаполь с концентрацией

магнитного потока в рабочей области, состоящий из 12 одинаковых трапециидальных секторов.

3. Экспериментально обнаружено, что в ЭЦР-источниках с классической магнитной конфигурацией оптимальное распределение магнитного поля вдоль оси источника является сугубо несимметричным.

Практическая ценность работы.

1. Создание источника высокоинтенсивных пучков многозарядных ионов позволяет существенно расширить возможности существующих ускорителей многозарядных ионов как с точки зрения интенсивности пучков многозарядных ионов, так и с точки зрения максимальной энергии пучков тяжелых ионов.
2. Повышение эффективности работы ускорителей тяжелых ионов за счет существенного увеличения времени непрерывной работы источника, а также за счет более эффективного использования рабочих веществ, что имеет исключительное значение при работе с дорогостоящими разделенными изотопами.
3. Использование результатов исследований для создаваемого в настоящее время компактного ЭЦР-источника для циклотрона У-400М и разработки оригинального ЭЦР-источника для получения пучков радиоактивных ионов.

Апробация работы.

Результаты проведенной работы докладывались на XIX Международной Конференции по Явлениям в Ионизованных Газах, (Белград, Югославия 1989), V Международном Симпозиуме по источникам EBIS и их применению (Дубна, 1991), I Международном Семинаре ИЯИ по Ускорителям (Киев, 1991), X Всесоюзной Конференции по Постоянным Магнитам (Суэдадь 1991), Рабочем Совещании по Источнику Ионов с Электронно-циклотронным Резонансом (Дубна 1991), XII и XIII Совещаниях по Ускорителям Заряженных Частиц (Москва 1990, Дубна 1992), 3 Европейской Конференции по Ускорителям (Берлин, ФРГ 1992) Киевском Семинаре по Физике и Технике Интенсивных Источников Ионов и Ионных Пучков (Киев 1992, 1993), Международной Школе-Семинаре по Физике Тяжелых Ионов (Дубна, 1993), II Международном Рабочем Совещании по СВЧ-излучению в Плазме (Нижний Новгород 1993), 11 Международном Рабочем Совещании по ЭЦР-источникам (Гронинген, Голландия, 1993), 5 Международной Конференции по Источникам Ионов (Пекин, Китай, 1993).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 26 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы; содержит 111 страниц ма-

шинописного текста, в том числе 66 рисунков, 7 таблиц и список цитируемой литературы из 127 наименований.

На защиту выносятся следующие положения, результаты, разработки:

1. Получение многозарядных ионов при использовании относительно низких частот СВЧ-накачки в значительной степени затруднено процессами перезарядки многозарядных ионов на нейтралах. При частоте накачки 14 ГГц концентрация нейтралей на оси разрядной камеры пренебрежимо мала и процессы перезарядки вносят незначительный вклад в потери многозарядных ионов.
2. Разработан и создан ЭЦР-источник многозарядных ионов с частотой накачки 14 - 14.5 ГГц. Источник обеспечивает получение пучка ионов Ar^{8+} с интенсивностью более 100 мкА, а ионов N^{6+} и O^{7+} и Ar^{11+} с интенсивностью более 15 мкА в непрерывном режиме.
3. При повышении мощности СВЧ-накачки интенсивности извлекаемых ионных пучков высокозарядной части спектра монотонно возрастают. При достижении определенного предела в плазме возникают неустойчивости, связанные с достижением критической плотности плазмы и градиентами плотности, приводящие к снижению времени удержания ионов и снижению интенсивности и стабильности извлекаемого ионного пучка.
4. Использование дополнительных легких газов при получении многозарядных ионов тяжелых элементов позволяет повысить интенсивности извлекаемых пучков многозарядных ионов и существенно снизить расход рабочего газа.
5. Использование квазиимпульсного режима СВЧ-питания позволяет получать импульсы тока многозарядных ионов длительностью ~ 1 мс с амплитудой, в 2-5 раз превышающей значение ионного тока во время СВЧ-импульса. При этом частота следования импульсов может достигать 50 Гц.
6. Оптимальное значение магнитного поля в районе экстракции ионного пучка лежит в диапазоне 0.75 - 0.8 Т и отличается незначительно для различных конфигураций магнитного поля. Повышение уровня магнитного поля в районе первой ступени источника до величины 1.2 - 1.3 Т приводит к увеличению интенсивности извлекаемого ионного пучка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность создания источника многозарядных ионов ЭЦР-типа, приводится краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена обзору физических и технических аспектов создания ЭЦР-источников ионов. Рассмотрены элементарные процессы в плазме источника, приводящие к потерям и образованию многозарядных ионов. Показано, что основным процессом потерь ионов в плазме ЭЦР-источника является перезарядка на нейтралах. На основании простой модели проведены оценки концентрации нейтралей на оси разрядной камеры для источников, работающих на различных частотах, результаты которых приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Значения пробегов и концентрация нейтралей на оси разрядной камеры для нескольких характерных частот накачки.

f(ГГц)	D_k (см)	n_e (cm^{-3})	τ (с)	l_i (мм)	N_{ax} (cm^{-3})
2.45	10	3.5×10^{10}	1.6×10^{-5}	90	2×10^{10}
6.4	9	2.5×10^{11}	2.2×10^{-6}	11	6×10^8
10	7	0.6×10^{12}	9.2×10^{-7}	4.6	2×10^7
14	7	1.2×10^{12}	4.6×10^{-7}	2.3	9×10^3
16	7	1.6×10^{12}	3.4×10^{-7}	1.7	4×10^1

f - частота накачки, n - плотность плазмы, D_k - диаметр разрядной камеры, τ , l_i - время и пробег нейтрального атома до ионизации, N_{ax} - концентрация нейтралей на оси разрядной камеры.

Показано, что получение многозарядных ионов при использовании частот накачки менее 10 ГГц в значительной степени затруднено наличием высокой концентрации нейтралей в плазме. Приведено описание конструкций нескольких ЭЦР-источников и рассмотрены возможные пути улучшения их характеристик за счет использования смесей газов, повышения частоты накачки и общего уровня магнитного поля, использования импульсного режима работы.

Во второй главе представлены результаты исследования макета ЭЦР-источника с частотой накачки 2.45 ГГц. На макете источника (Рис. 1), представляющем из себя одномодовый резонатор, настроенный на моду TE_{111} , получены ионы азота до N^{3+} при суммарной интенсивности, не превышающей нескольких мкА.

Максимальное поглощение СВЧ-волны плазменными электронами осуществлялось на верхнегибридном резонансе и имело нестабильный характер. По-

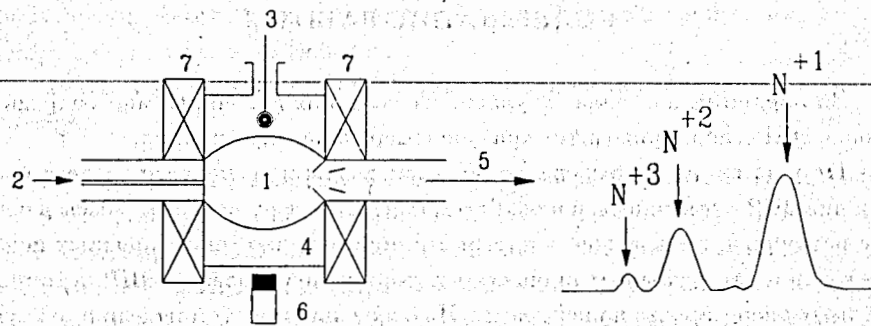


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и спектр ионов азота. 1 - кварцевая вакуумная камера, 2 - ввод газа, 3 - ввод СВЧ, 4 - резонатор, 5 - ионный пучок, 6 - детектор рентгеновского излучения, 7 - катушки

лученные результаты позволили сделать вывод о необходимости использования более высоких частот накачки и многомодового резонатора для получения многозарядных ионов.

В третьей главе приводится описание конструкции ионного источника DECRIS (Dubna ECR Ion Source), схема которого приводится на рис.2.

Источник состоит из двух ступеней: ступени предварительной ионизации, где образуется холодная плазма и основной ступени с конфигурацией "минимум В", где происходит наработка многозарядных ионов. Источник также включает в себя СВЧ-систему, вакуумную систему и систему ввода рабочих веществ.

Основной составляющей ЭЦР-источника, определяющей его структуру и возможности, является магнитная система. Она выполняет одновременно две функции: удержание плазмы и создание условий для резонансного поглощения СВЧ-энергии электронами плазмы. Резонансное поглощение энергии происходит в области электронно-циклотронного резонанса.

Предварительные расчеты магнитной системы проводились с помощью пакета программ POISSON, который позволяет рассчитывать осесимметричные магнитные конфигурации из катушек и мягкого железа, а так же двумерные системы из постоянных магнитов. Однако наличие в рассчитываемой системе мультиполя приводит к утрате осевой симметрии и требует проведения дополнительных трехмерных расчетов, т. к. взаимодействие краевых полей гексаполя с соленоидальным полем может привести к возникновению "паразит-

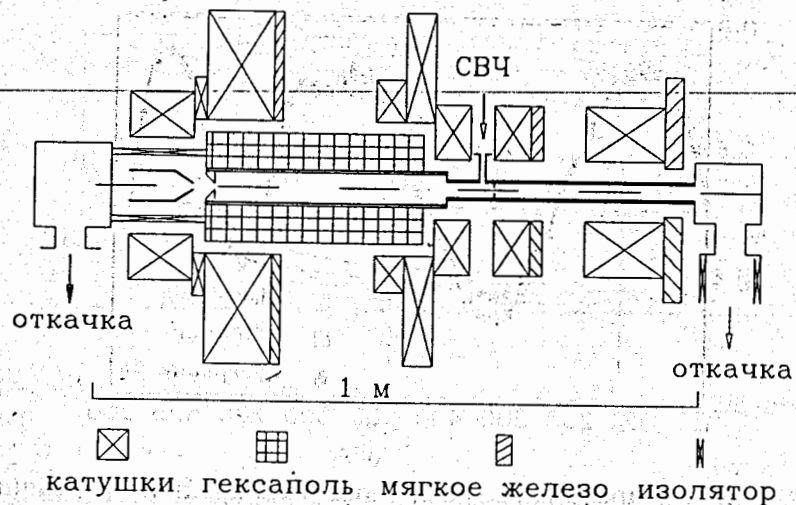


Рис. 2. Схема источника многозарядных ионов DECRIS

ных" резонансов в районе экстракции и ввода СВЧ-мощности. Окончательные расчеты проводились с помощью пакета программ, использующих интегральную методику и позволяющих производить расчеты трехмерной картины магнитного поля.

Формирование аксиального магнитного поля ионного источника осуществляется с помощью охлаждаемых водой медных соленоидальных катушек. В отличие от источника MINIMAFIOS, где для охлаждения катушек применяется специальная магистраль с давлением охлаждающей жидкости 20 кГ/см^2 , в источнике DECRIS используется общая магистраль охлаждения с давлением дистиллята около 5 кГ/см^2 , что приводит к ограничению длины проводника в катушках. Для обеспечения необходимого количества ампер-витков катушки имеют меньший внешний диаметр и большую, по сравнению с прототипом, протяженность. Система катушек обеспечивает создание зеркальной конфигурации как в камере предварительной ионизации так и в основной ионизационной камере. Расчетное и измеренное распределения магнитного поля на оси источника приведены на рисунке 3. Потребляемая катушками электрическая мощность при токе 1000 А составляет 130 кВт. Для обеспечения регулировки распределения магнитного поля питание катушек осуществляется от двух выпрямителей с независимой регулировкой.

Для формирования радиальной компоненты магнитного поля в основной

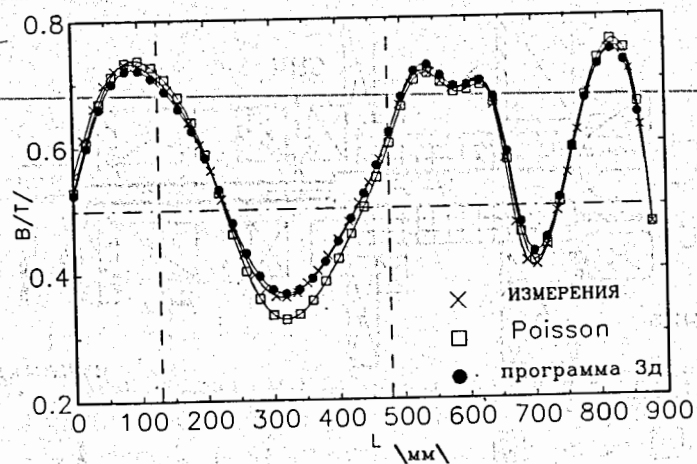


Рис. 3. Распределение магнитного поля вдоль оси источника

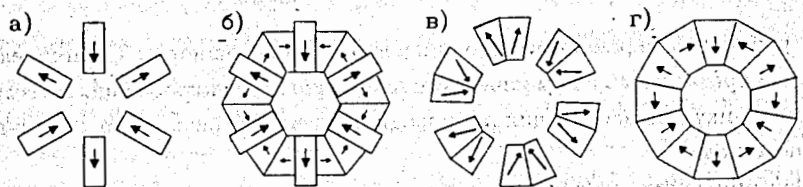


Рис. 4. Конструкции гексаполей

в ступени ионного источника DECRIS была разработана конструкция гексаполя, обеспечивающая концентрацию магнитного потока внутри рабочей области. Гексаполь состоит из 12 идентичных трапециидальных секторов из NdFeB, имеющих соответствующее направление намагниченности (Рис.4г). Аналогичные конструкции используются при создании неявнополюсных линз различной мультипольности.

Гексаполь имеет внутренний диаметр 7 см, определяемый диаметром ионизационной камеры. Толщина гексаполя должна быть достаточной для создания необходимой величины магнитного поля и вместе с тем минимизирована с точки зрения уменьшения веса, а следовательно и цены гексаполя. Кроме того, увеличение его внешнего диаметра приводит к возрастанию диаметра соленоидальных катушек и, как следствие, значительному увеличению потребляемой мощности. Для выбора внешнего диаметра гексаполя были проведены

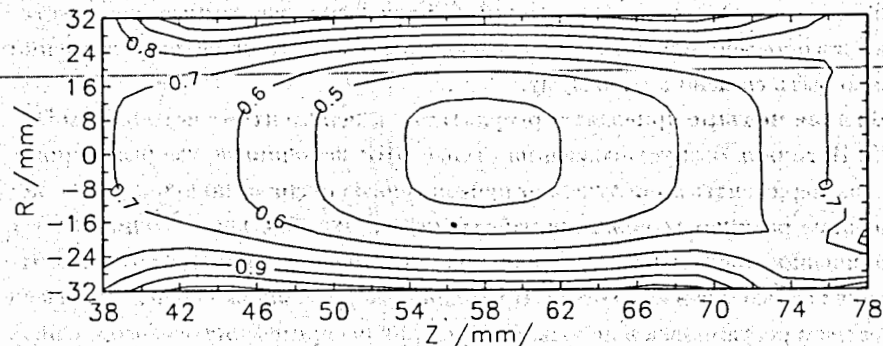


Рис. 5. Топография магнитного поля во второй ступени источника

расчеты магнитного поля для гексаполей различной толщины. Согласно расчетам был выбран внешний диаметр гексаполя 190 мм. Данная конструкция гексаполя и специально разработанная технология его сборки обеспечила возможность получения величины магнитной индукции на рабочей поверхности гексаполя, превышающей 1 Т при неравномерности поля по азимуту менее 3%.

Топография сформированного магнитного поля в основной ионизационной камере показана на рис.5. Резонансная поверхность $B_{res} \approx 0.5T$ симметрично расположена внутри ионизационной камеры и нигде не пересекает ее стенок. Магнитное поле равномерно возрастает от уровня, приблизительно 0.4 Т в центре камеры до 1 Т на ее поверхности.

В качестве СВЧ-генератора использован выпускаемый серийно передатчик спутниковой связи, работающий в диапазоне $14 \div 14.5$ ГГц. Усилителем мощности является многорезонаторный клистрон воздушного охлаждения с выходной мощностью до 2.2 кВт и полосой усиления около 70 МГц. Мощность от усилителя через ферритовый вентиль передается к источнику по волноводному тракту, выполненному на волноводах сечением 19×9.5 мм с целью сокращения на 25% потерь мощности при ее транспортировке. Высоковольтная изоляция волноводного тракта осуществляется с помощью одного или нескольких слоев полиамидной пленки толщиной 0.1 мм, обеспечивающей изоляцию до 30 кВ. Гермоекно "баночного" типа, изготовленное из нитрида бора, присоединяется непосредственно к вакуумной камере источника.

Как отмечалось ранее, подавление процессов перезарядки в основной ступени ионизации накладывает жесткие требования на вакуумные условия в ионном источнике. Ограниченные проходные сечения для откачки требуют

минимизации паразитных утечек. С этой целью вакуумные части установки изготовлены из меди и нержавеющей стали, а количество уплотнений должно быть сведено к минимуму.

В главе четыре приводятся результаты экспериментов с источником DECRIS. Источник был установлен на стенде ЭЦП-источников, где были проведены эксперименты по получению пучков многозарядных ионов, а также исследование различных режимов работы источника. Так как источник имеет ограниченное число параметров настройки в процессе работы, к которым относятся подаваемая в источник СВЧ-мощность, регулировка подачи рабочего вещества и регулировка в небольших пределах распределения осевого магнитного поля, к источнику предъявляются жесткие требования при его подготовке к работе. Первым является формирование заданной магнитной конфигурации. Другим условием является согласование СВЧ-генератора и волноводного тракта с нагрузкой, которой в данном случае является ионизационная камера источника.

Проведены эксперименты по получению многозарядных ионов газовых элементов. Получены пучки ионов Ar^{8+} с интенсивностью более 100 мкА и ионов Ar^{11+} , O^{7+} , N^{6+} с интенсивностью более 10 мкА. Типичный спектр ионов аргона приведен на рис. 6, а результаты по выходу многозарядных ионов некоторых элементов приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Токи многозарядных ионов из источника DECRIS /мкА/.

Заряд / ион	4+	5+	6+	7+	8+	9+	11+	Дополнительный газ
Азот	270	92	17					
Кислород		160	87	26				
Аргон					70	24		
Аргон					95	45	9	гелий
Аргон				120	110	70	15	кислород

Экспериментально установлено, что при увеличении мощности СВЧ-накачки суммарный ионный ток и токи отдельных зарядностей монотонно возрастают, причем скорость роста существенно снижается при мощностях более 500 Вт (Рис.7). В диапазоне мощностей 500 - 800 Вт наблюдается срыв разряда, причем значение максимально возможной вводимой в разряд мощности определяется как распределением магнитного поля, так и количеством подаваемого рабочего вещества.

Проведены исследования влияния различных вспомогательных газов на выход многозарядных ионов аргона. Показано (Таблица 2), что добавление в разряд легких газов, таких как He, N_2 , O_2 приводит к увеличению выхода

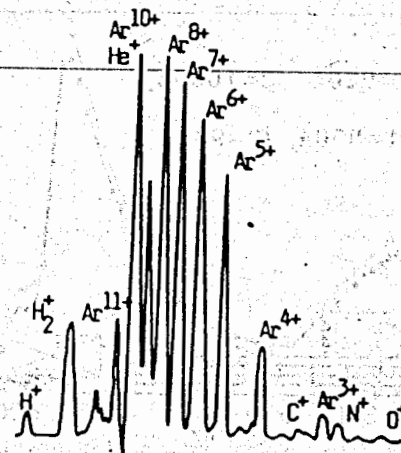


Рис. 6. Спектр ионов аргона

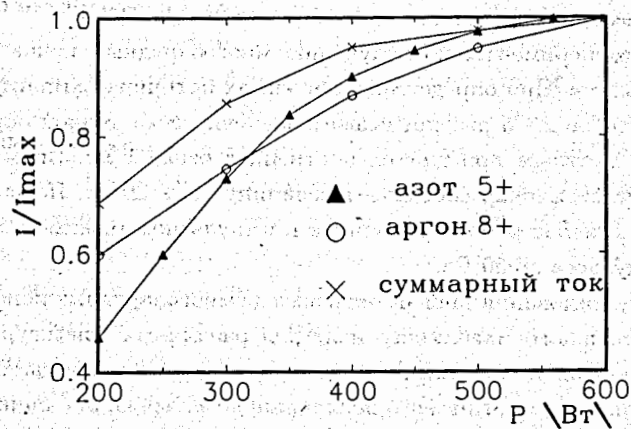


Рис. 7. Зависимость тока ионов от вводимой СВЧ-мощности

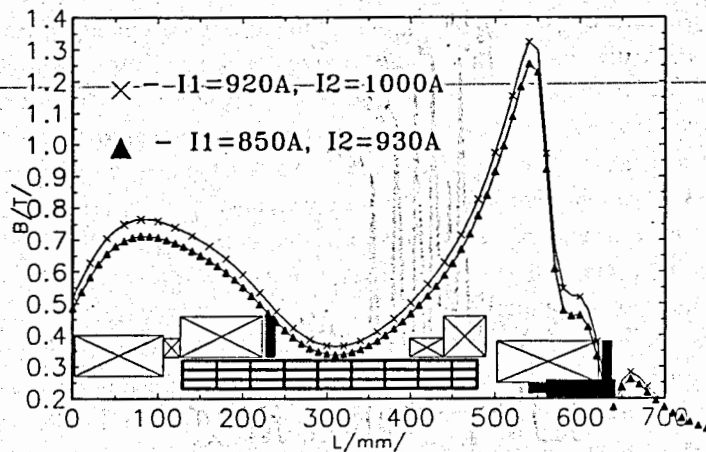


Рис. 8. Аксиальное распределение магнитного поля в источнике при использовании коаксиального СВЧ-ввода

многозарядных ионов и приводит к значительному (в 2 - 4 раза) снижению расхода рабочего газа. При этом наилучшие результаты получены при использовании кислорода в качестве добавочного газа.

Проведены эксперименты по получению многозарядных ионов в квазиимпульсном режиме. При определенных режимах источника амплитуда пика "afterglow current" в 2 - 5 раз превышает значение тока данной зарядности во время СВЧ-импульса при длительности пика около 1 мс. Время выхода ионного тока на стационар составляет величину $20 \div 30$ мс. Показано, что возможна эффективная работа источника в импульсном режиме с частотой следования импульсов до 50 Гц.

Проведены исследования зависимости выхода многозарядных ионов от распределения аксиального магнитного поля для различных конфигураций магнитного поля в первой ступени. В процессе исследования работы источника получено, что значение магнитного поля в районе экстракции с точки зрения максимального выхода многозарядных ионов имеет оптимальное значение, меняясь в небольших пределах для различных ионов, однако извлекаемый ток ионов данной зарядности, как и суммарный ионный ток, возрастает при увеличении уровня магнитного поля в области первой ступени.

Для решения этой проблемы была разработана конструкция первой ступени, обеспечивающая наличие зоны резонанса в ней практически при любом уровне магнитного поля (Рис. 8). Резонанс в первой ступени осуществля-

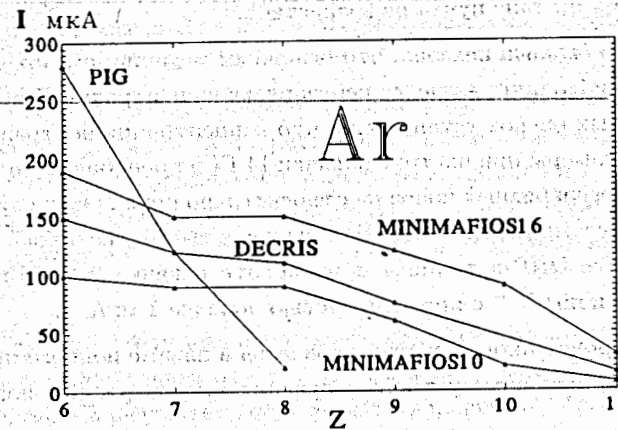


Рис. 9. Сравнение выхода понов аргона из источников PIG, MINIMAFIOS и DECRIС

ется при этом на спаде магнитного поля, т. е. в первой ступени отсутствует зеркальная ловушка. Аналогичная конфигурация магнитного поля используется в источниках типа CAPRICE. Уровень магнитного поля в максимуме в этом случае удастся увеличить на 0.5 Т по сравнению с первоначальным вариантом и он достигает величины 1.3 Т, а зона резонанса в первой ступени приближается к основной ионизационной камере примерно на 10 см.

В результате проведенных экспериментов получено, что оптимальное распределение магнитного поля вдоль оси источника строго несимметрично: порядка 0.7 - 0.8 Т в области экстракции и более 1.2 Т в области первой ступени. Показана возможность работы ионного источника как в классическом двухстадийном варианте, так и при использовании коаксиального СВЧ-ввода с редуцированной первой ступенью.

Сравнение результатов по выходу ионов аргона из источника DECRIС с результатами, полученными на источниках аналогичных конструкций, а также из дугового источника, приведены на рис. 9.

В заключении сформулированы основные результаты разработок и исследований источника DECRIС:

1. Рассмотрены основные процессы образования и потерь ионов в плазме с характерными для ЭЦР-источника параметрами. Показано, что обмен энергией между горячими электронами и ионами за счет упругих столкновений может происходить за времена, значительно превышающие время жизни ионов в ловушке. В результате этого ионы остаются

"холодными" и эммитанс пучка не возрастает.

Анализ ионного баланса показал, что основным механизмом объемных потерь ионов в источнике является перезарядка на нейтралах. В результате проведенных оценок установлено, что концентрация нейтралей на оси разрядной камеры при частоте накачки 14 ГГц пренебрежимо мала, а получение многозарядных ионов на относительно низких частотах затруднено процессами перезарядки. Это было подтверждено экспериментально на макете ЭЦР-источника при частоте накачки 2.45 ГГц, где были получены ионы N^{3+} с интенсивностью порядка 1 мкА.

В результате проведенного анализа процессов в плазме ионного источника определены основные условия получения многозарядных ионов в ЭЦР-разряде.

2. Проведен анализ существующих конструкций ЭЦР-источников. В качестве базовой для реализации источника DECRIIS выбрана классическая магнитная конфигурация источника MINIMAFIOS, которая является перспективной с точки зрения экспериментального изучения условий получения многозарядных ионов в ЭЦР-разряде, исследования различных конструкций инжекторной части источника и различных магнитных конфигураций.

Для СВЧ-нагрева плазменных электронов выбрана частота 14 ГГц, которая является оптимальной для ЭЦР-источников с "теплой" магнитной системой. Данная частота обеспечивает создание концентрации плазмы, приводящей к "выгоранию" нейтралей и подавлению процессов перезарядки в плазме ионного источника.

3. Разработана магнитная система источника, обеспечивающая создание конфигурации "минимум В" в основной ступени ионизации с пробочным отношением $\beta \sim 2$ и замкнутой зоны резонанса $B=0.5$ Т.

Радиальная составляющая магнитного поля создается гексаполем на постоянных магнитах из NdFeB с концентрацией магнитного потока в рабочей области. Впервые для ЭЦР-источника применена конструкция гексаполя, состоящая из идентичных трапециевидных секторов с соответствующим направлением оси легкого намагничивания. Разработанная технология сборки гексаполя позволила получить отклонение магнитного поля от поля идеального гексаполя менее 3% и величину магнитного поля на поверхности гексаполя, превышающую 1 Т.

4. Разработаны и созданы система СВЧ-питания и вакуумная система ис-

точника, а также другие вспомогательные системы, обеспечивающие его работу.

Система СВЧ-питания позволяет вводить до 2 кВт СВЧ-мощности в рабочую область и предусматривает вакуумную и высоковольтную (до 30 кВ) изоляцию ионизационной камеры от волноводного тракта. Элемент подстройки связи волноводного тракта с резонатором позволил получить значения отраженной мощности в рабочем режиме в диапазоне 1 - 10 %.

5. Проведены эксперименты по получению пучков многозарядных ионов, газов в непрерывном режиме. Найдены оптимальные режимы работы источника. В результате получены токи ионов Ar^{8+} более 100 мкА, токи ионов N^{6+} , O^{7+} , Ar^{11+} , превышающие 15 мкА.

Экспериментально установлено, что при увеличении мощности СВЧ-накачки суммарный ионный ток и токи ионов отдельных зарядностей монотонно возрастают, причем скорость роста существенно снижается при мощностях более 500 Вт. При достижении определенного предела, лежащего в диапазоне мощностей 500 - 800 Вт происходит срыв разряда. Значение максимальной мощности, вводимой в разряд, определяется как распределением магнитного поля, так и количеством подаваемого в источник газа.

6. Исследовано влияние добавочных газов на выход многозарядных ионов. Показано, что использование легких добавочных газов при получении многозарядных ионов средних и тяжелых масс приводит не только к увеличению выхода многозарядных ионов, но и существенно (в 2 - 4 раза) позволяет снизить расход рабочего вещества, что является важным при получении ионов разделенных изотопов.

При использовании в качестве добавочного газа кислорода интенсивность пучка ионов Ar^{8+} увеличена в 1.6 раза, а Ar^{11+} в два раза по сравнению с работой на чистом аргоне.

7. Проведено экспериментальное изучение импульсного режима СВЧ-питания источника. Установлено, что амплитуды импульсов тока многозарядных ионов в режиме "послесвечения" в 2 - 5 раз превосходят значения тока во время СВЧ-импульса. Длительность импульса "послесвечения" на полувысоте порядка 1 мс.

Время выхода амплитуды ионного тока на насыщение для Ar^{8+} и водородоподобных ионов азота и кислорода лежит в диапазоне 20 - 30 мс.

Использование квазиимпульсного режима работы источника с частотой до 50 Гц является перспективным для решения некоторых физических задач, требующих использования модулированного ионного пучка.

8. Экспериментально исследовано влияние распределения осевого магнитного поля в различных конфигурациях на выход многозарядных ионов. Показано, что в оптимальном режиме распределение магнитного поля вдоль оси источника является несимметричным.

Значение магнитного поля в области экстракции ионного пучка имеет оптимальное значение для всех исследованных случаев, при этом величина магнитного поля отличается незначительно и лежит в диапазоне 0.75 - 0.8 Т.

Значение магнитного поля в инжекторной части источника должно быть максимально возможным в случае использования в первой ступени пробочной конфигурации магнитного поля и составлять величину 1.2 - 1.3 Т в случае организации резонансной поверхности в первой ступени на спаде магнитного поля.

Результаты выполненного цикла работ положены в основу создаваемого в настоящее время в ЛЯР ОИЯИ нового ЭЦР-источника. Концентрация магнитного поля в рабочей области источника позволила сократить его габаритные размеры в два раза, а потребляемую мощность на создание магнитного поля снизить до 60 кВт. Кроме этого разработан компактный ЭЦР-источник на частоту 10 ГГц оригинальной конструкции, который может быть использован как в обычном режиме, так и для получения вторичных пучков ионов радиоактивных изотопов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Efremov A.A., Kutner V.B., Biri S. et. al. Prospects of the ECR source coupling to Dubna and Kiev cyclotrons. -In: Proc. of the First INR Int. Seminar on Accelerators, Kiev, June 18-22, 1990, INR 1990, p.90-99.

2. Efremov A. and Kutner V.B. Study of an ECR ion source prototype with ultrahigh frequency heating of electrons at 2.45 GHz. -In: Contributed papers of the XIX Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Belgrade, 10-14 July 1989, v.2, p.424-425.

3. Efremov A.A., Kutner V.B. Исследование макета источника ионов с СВЧ-нагревом электронов на частоте 2.45 ГГц. -Препринт ОИЯИ, P9-88-895, Дубна 1988, 4 с.

4. Efremov A.A., Kutner V.B., Biri S., Chugreev V.A. Проблемы формирования магнитного поля ЭЦР-источника. -Сборник аннотаций Рабочего со-

вещения по источнику ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР) 29-31 января 1991 г., P9-91-263, с. 12-13

4. Кутнер В.Б., Ефремов А.А., Бехтерев В.В., Бири Ш., Ковальчук И.М., Колесов И.В., Лебедев А.Н., Оганесян Ю.Ц., Пиварч Ю., Чугреев В.А. Источник многозарядных ионов DECRIS-14 для циклотронов ЛЯР ОИЯИ. -Тезисы докладов XII Всесоюзного Совещания по Ускорителям заряженных частиц, 3-5 октября 1990 г., ИТЭФ, Москва, с. 166

5. Biri S., Efremov A.A., Kutner V.B. The design of the ECR-sources at the LNR JINR. -Scientific Report LNR JINR 1989-1990, E7-91-75, Dubna, 1991, p.208-209

6. Акишин П.Г., Ефремов А.А. Математическое моделирование магнитной системы ЭЦР-источника. -Сборник аннотаций Рабочего совещания по источнику ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР) 29-31 января 1991 г., P9-91-263, с. 14-15

7. Акишин П.Г., Ефремов А.А., Кутнер В.Б. Расчет магнитной структуры источника DECRIS-14. -Сообщения ОИЯИ, P9-91-555, Дубна, 1991, 4 с.

8. Ефремов А.А., Бири Ш., Бехтерев В.В., Молнар Й. Комплекс для измерения полей в осесимметричных магнитных элементах. -Тезисы докладов XII Всесоюзного Совещания по Ускорителям заряженных частиц, 3-5 октября 1990 г., ИТЭФ, Москва, с. 44

9. Бири Ш., Ефремов А.А., Молнар Й. Интерфейс для управления и автоматического измерения на основе ПК типа IBM PC XT/AT. -Микропроцессорные средства и системы, No 4, 1990, с. 79-80

Препринт ОИЯИ, P10-89-166, Дубна, 1989

10. Ефремов А.А., Кутнер В.Б., Чугреев В.А., Гриднев А.И., Клевесц Н.И., Чохели М.А. Гексаполь для источника многозарядных ионов ЭЦР-типа. -Тезисы докладов X Всесоюзной конференции по постоянным магнитам, Суздаль, 14-18 октября 1991 г., М., 1991, с. 198

11. Efremov A., Kutner V.B., Chugreev V.A., Gridnev A.I., Klevec N.I., Choheli M.A. Permanent magnet hexapole for ion source DECRIS. -Preprint JINR, E9-92-495, Dubna, 1992, 8 p.

12. Ефремов А.А., Кутнер В.Б., Лебедев А.Н., Чугреев В.А. СВЧ-система ЭЦР-источника DECRIS-14. -Сборник аннотаций Рабочего совещания по источнику ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР) 29-31 января 1991 г., P9-91-263, с. 32-33

13. Efremov A.A., Ivanenko A.I., Kutner V.B., Pivarch J., Tumanov K.D. Vacuum system for the Dubna ECR-ion source DECRIS-14. -Vacuum, v.44, N.10, 1993, p.983-986

14. Пиварч Ю., Кутнер В.Б., Ефремов А.А., Ковальчук И.М., Иваненко А.И., Туманов К.Д. Вакуумная система ЭЦР-источника DECRIS-14. -Сборник аннотаций Рабочего совещания по источнику ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР) 29-31 января 1991 г., P9-91-263, с.34-35

15. Efremov A.A., Ivanenko A.I., Kutner V.B., Pivarch J., Tumanov K.D. Vacuum system for the Dubna ECR ion source DECRIS-14. -Proc. of the Third European Particle Accelerator Conference, Berlin, 24-28 March, 1992, p.1567-1569

16. Кутнер В.Б., Ефремов А.А. Проблемные и перспективные направления развития источников ионов с электронно-циклотронным резонансом. - Сборник аннотаций Рабочего совещания по источнику ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР) 29-31 января 1991 г., P9-91-263, с.4-6

17. Bogomolov S.L., Efremov A.A., Kolesov I.V., Kutner V.B., Pivarch Ju., Lebedev A.N., Chugreev V.A. The status of DECRIS-14. JINR FLNR Scientific Report 1991-1992, Dubna, 1993, p.297

18. Кутнер В.Б., Ефремов А.А., Бири Ш., Богомолов С.Л., Бондаренко П.Г., Ковальчук И.М., Колесов И.В., Лебедев А.Н., Оганесян Ю.Ц., Пиварч Ю., Чугреев В.А. Источник многозарядных ионов DECRIS-14 для циклотронов ЛЯР ОИЯИ. -Аннотации докладов XIII совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 13-15 октября 1992, Д9-92-380, Дубна, 1992, с. 140

19. Efremov A.A., Kutner V.B. Preliminary results on DECRIS. -Proc. of the V Int. Symposium on EBIS and their Application, Dubna, 24-27 September 1991, JINR, Dubna, 1992, p.263-267

20. Efremov A., Kutner V.B., Lebedev A.N., Pivarch J. The status of the ion source DECRIS and prospects of the ECR source coupling to FLNR accelerators. -Abstracts of the Int. School-Seminar on Heavy Ion Physics, May 10-15 1993, Dubna, Russia, FLNR JINR, E7-93-126, Dubna, 1993, p. 166

21. Efremov A., Kutner V.B., Lebedev A.N., Pivarch J., Chugreev V.A. Ion source DECRIS. -Proc. of the 11th Int. Workshop on Electron Cyclotron Resonance Ion Sources (ECRIS 11), May 6-7 1993, Groningen, The Netherlands, A.G.Drentje editor, KVI-Report 966, p.159-161.

22. Efremov A., Kutner V.B., Lebedev A.N., Loginov V.N., Pivarch J. Ion source DECRIS: the results of the first operation. -Abstracts of the 2th Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasma, Nizny Novgorod, Russia, August 15-22 1993, IAP Russian Academy of Sciences, p. D-25

23. Efremov A., Kutner V.B., Lebedev A.N., Loginov V.N., Golubev S.V. UHF pulse mode operation on ion source DECRIS. -Abstracts of the 2th Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasma, Nizny Novgorod, Russia, August 15-22 1993, IAP Russian Academy of Sciences, p. D-26

24. Kutner V.B., Efremov A.A. Status and evolution of ion source DECRIS and prospects of ECR ion sources coupling to FLNR accelerators. -Abstracts of the 2th Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasma, Nizny Novgorod, Russia, August 15-22 1993, IAP Russian Academy of Sciences, p. D-22

25. Efremov A., Kutner V.B., Lebedev A.N., Pivarch J., Chugreev V.A. An ECR ion source DECRIS. -Abstracts of the 5th Int. Conf. on Ion Sources, Beijing, China, August 31 - September 4 1993, Inst. of Heavy Ion Physics, Peking University, p. 7

26. Wei B., Liu Z., Zhang W., Wu D., Zhao H., Yuan P., Zhang X., Ma Y., and Efremov A. Study of the magnetic field of CAPRICE type ECR source. -Proc. of the 13th Int. Conf. on Cyclotron and Their Application, Vancouver, Canada, July 6-10, 1992, G.Dutto and M.K.Craddock editors. World Scientific, 1993, p. 344-347

Рукопись поступила в издательский отдел
25 марта 1994 года.