

П-321

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7 - 11256

ПИКИН

Александр Иванович

**РАЗРАБОТКА
КРИОГЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСТОЧНИКА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ КРИОН - 1**

**Специальность: 05.09.04 - электрофизические установки
и ускорители**

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

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Евгений Денисович
старший научный сотрудник ДОНЕЦ.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Борис Николаевич
старший научный сотрудник МАКОВ,

кандидат физико-математических наук Иван Максимович
старший научный сотрудник МАТОРА.

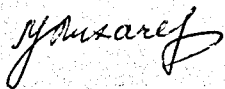
Ведущее научно-исследовательское учреждение: Украинский физико-технический институт, г. Харьков.

Автореферат разослан "___" _____ 1978 г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1978 г. в _____ часов на заседании специализированного Ученого совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московская область, ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета



М.Ф. Лихачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Возрастающий с каждым годом круг задач быстро развивающейся релятивистской ядерной физики, а также широкий диапазон практических приложений ускоренных до высоких энергий тяжелых ионов определили необходимость создания эффективных источников многозарядных ионов. В ускорительных комплексах, где не предусмотрено увеличения зарядности ионов в процессе ускорения, а ускоряются ядра, получаемые непосредственно из ионного источника /таковым является ускорительный комплекс синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ/, проблема создания ионного источника особенно актуальна и фактически является проблемой создания источника ядер.

Вторым кругом проблем является ряд задач атомной физики, связанных с взаимодействием быстрых электронов с ионами, в частности задача измерения сечений глубокой ионизации положительных ионов электронным ударом, которая до последнего времени не находила своего решения.

Цель работы

Целью работы является разработка криогенного электронно-лучевого источника многозарядных ионов, проведение экспериментов по глубокой ионизации атомов и ионов электронным ударом, использование разработанного ионного источника для измерения сечений глубокой ионизации положительных ионов электронным ударом и для проведения сеансов ускорения легких ядер на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Научная новизна

В основу диссертации положены работы^{/1-6/}, выполненные автором в 1971-77 годах. Разработана конструкция основных узлов криогенного электронно-лучевого источника многозарядных ионов КРИОН-1. Исследованы режимы работы созданного ионного источника. Реализованная величина фактора ионизации ($6,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) обеспечила получение в ионном источнике КРИОН-1 ядер углерода, азота, а также ионов Ar^{+15} и Xe^{+29} . Реализация "чистых" условий ионизации позволила впервые измерить сечения глубокой ионизации положительных ионов аргона электронным ударом при фиксированной энергии бомбардирующих электронов 2,5 КэВ. В частности, были выделены случаи одно- и двухэлектронной ионизации ионов Ar^{+5} и Ar^{+6} и измерены отдельно сечения этих процессов.

Практическая ценность

Создан криогенный электронно-лучевой источник многозарядных ионов КРИОН-1. Использование этого источника на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ позволило впервые провести длительный сеанс ускорения углерода и кислорода на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ до энергии 4,2 ГэВ/нуклон и выполнить ряд физических экспериментов с этими ядрами.

Разработанная технология и накопленный опыт работы использованы в ионном источнике КРИОН-2 и могут быть использованы при создании новых, более мощных и производительных электронно-лучевых источников многозарядных ионов.

Апробации

По материалам работы сделаны доклады на IV Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1976) и на X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий (Серпухов, 1977).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано шесть работ в виде статей в журналах ЖТФ, ЖЭТФ, препринтов и сообщений ОИЯИ, докладов в трудах конференций.

Объем работы

Диссертация содержит 87 страниц машинописного текста, 23 страницы рисунков, состоит из пяти глав, выводов и библиографии, включающей 48 наименований.

Состояние вопроса и задачи исследования

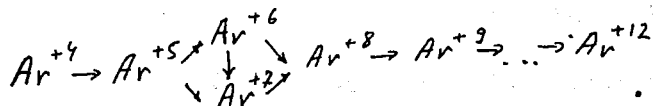
Эксперименты, проведенные с первыми вариантами электронно-лучевого ионного источника - установками ИЭЛ-1^{/7/} и ИЭЛ-2^{/8/}, показали, что в электронном пучке возможно удержание положительных ионов. Были зарегистрированы ионы C^{+5} , N^{+6} , O^{+7} , а также $\text{Au}^{+19/7/}$. Аналогичные электронно-лучевые ионные источники, создаваемые во Франции^{/9/}, США^{/10/} и ФРГ^{/11/}, в настоящее время находятся в стадии проектирования или наладки.

Одной из задач работы является разработка, на основе предложенной Е.Д.Донцом идеи использования криогенной откачки и сверхпроводящего фокусирующего соленоида, конструкции криогенно-магнитной системы с контактным методом термостатирования^{/1/} и ряда физических систем обеспечения криогенного электронно-лучевого источника многозарядных ионов. Задачей исследования является изучение режимов работы созданного источника с целью получения "чистых" условий ионизации, обеспечивающих длительные времена удержания ионов в области ионизации и, следовательно, получение высоких зарядностей этих ионов^{/2,3/}. Кроме того, в задачи исследования входит проведение экспериментов по глубокой ионизации C , N , Ar и Xe ^{/2-4/}, проблемы адаптации ионного источника КРИОН-1 на ускорителе^{/5,6/} и его использование в сеансе ускорения ядер C , N , O и Ne на ускорительном комплексе синхрофазотрона^{/6/}.

К защите представляется

- а) Конструкция и результаты испытаний криогенно-вакуумной системы, сверхпроводящей магнитной системы с контактным методом термостатирования и элементов электронно- и ионно-оптической систем электронно-лучевого ионного источника.
- б) Результаты исследований режимов работы ионного источника КРИОН-1 при использовании магнитопогруженной электронной пушки.
- в) Результаты экспериментов по глубокой ионизации углерода, азота, аргона и ксенона, в которых были получены ядра C^{+6} , N^{+7} , а также ионы Ar^{+15} и Xe^{+29} .

г) Измерение сечений ионизации положительных ионов аргона электронным ударом при фиксированной энергии бомбардирующих электронов 2,5 КэВ в ионизационной цепочке:



д) Результаты работ по адаптации ионного источника КРИОН-1 к условиям на ускорителе и его использования для ускорения ядер C, N, O и Ne на ускорительном комплексе синхрофазотрона.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Принцип действия электронно-лучевого ионного источника

I. В электронно-лучевом ионном источнике задача обеспечения большого числа актов взаимодействия быстрых электронов с ионом, необходимого для образования иона с высокой кратностью ионизации, решается созданием в объеме электронного пучка ловушки для положительных ионов. Уход ионов из ловушки в радиальном направлении ограничивается "провисанием" потенциала, обусловленным пространственным зарядом электронного пучка, проходящего в дрейфовой трубке. Аксиальный уход ионов предотвращается созданием потенциальных барьеров на оконечных секциях дрейфовой трубки [12]. Инжекция рабочего вещества, удержание ионов в ловушке при ионизации и вывод ионов из ловушки осуществляется созданием на секциях дрейфовой трубки соответствующих распределений потенциалов.

В главе I рассмотрена предложенная модификация известного метода импульсной инжекции рабочего вещества в ионную ловушку (метода "электронного регулирования" [12]), суть которой состоит в том, что во время инжекции глубина аксиального запираения, создаваемого на секциях дрейфовой трубки, делается меньше глубины радиального "провисания" потенциала в дрейфовой трубке. Преимущество такой инжекции состоит в том, что введенные ионы находятся в узкой области электронного пучка вблизи его оси и имеют энергию колебаний меньше, чем при полном запираении. Это обстоятельство представляется существенным с точки зрения обеспечения высокой эффективности ионизации. Связь между глубиной аксиального запира-

ния ΔU (В) и граничным радиусом области ионизации r (см) в случае центрального прохождения электронного пучка и равномерного распределения электронного заряда в пучке дается уравнением:

$$\Delta U = 1,52 \cdot 10^4 \frac{I}{U^{1/2}} \frac{r^2}{a^2} \left[\ln \frac{R^2}{r^2} + 1 \right], \quad (I.1)$$

I - ток электронного пучка (А), U - потенциал в области ионизации относительно катода (В), R - внутренний радиус дрейфовой трубки (см), a - радиус электронного пучка (см).

2. Вывод ионов из области ионизации осуществляется предложенным Е.Д. Донцом методом увеличения потенциала секций, ограничивающих область ионизации, до потенциала крайней, запирающей секции и выше. Рассмотрено четыре режима вывода ионов. Минимальный энергетический разброс ионов реализуется при адиабатическом выводе, когда время подъема потенциала секций значительно превосходит период аксиальных колебаний ионов. Условие адиабатичности:

$$T \gg 1,44 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{M}{2}} \frac{L}{\Delta U}, \quad (I.2)$$

T - время подъема потенциала секций до уровня запирающего потенциала (с), $\frac{M}{2}$ - отношение массы к заряду иона (ат.ед.), L - длина области ионизации (см), ΔU - глубина аксиального запираения (В).

В этом случае время вывода ионов равно времени подъема потенциала секций T .

Если при выводе ионов в области ионизации образуется выталкивающий аксиальный градиент потенциала и время его установления превосходит время выхода ионов, то для случая, когда градиент потенциала равномерен, энергетический разброс ионов, обусловленный выходом, определяется из соотношения:

$$\Delta V = 6,52 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{\frac{M}{2}} \left(\frac{LW}{T} \right)^2, \quad (I.3)$$

время выхода ионов из области ионизации:

$$t_{\text{вых.}} = 1,84 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{M}{2}} \frac{LW}{W}, \quad (I.4)$$

T - время установления конечного градиента потенциала (с), $t_{\text{вых.}}$ - время выхода ионов из области ионизации (с), W - конечная разность потенциалов на краях области ионизации, ΔV - энергетический разброс ионов ($\frac{\Delta V}{2}$).

Минимальное время выхода ионов для данного выталкивающего градиента соответствует мгновенному установлению градиента и определяется выражением:

$$t_{\text{вых.}} = 1,44 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{M}{Z} \frac{L^2}{W}} \quad (I.5)$$

В этом случае энергетический разброс ионов

$$\Delta V = W \quad (I.6)$$

II. Конструкция ионного источника КРИОН-I

I. Электронно-лучевой источник многозарядных ионов КРИОН-I предназначен для генерации пучков ядер легких элементов с целью их последующего ускорения на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Такое назначение ионного источника определило ряд физических и эксплуатационных требований к нему: обеспечение необходимой интенсивности ядерного пучка, его "чистоты", ограничение потребляемой мощности величиной 5 кВт, требование длительной работы в автономном режиме.

Разработанная на основе предложенной Е.Д.Донцом идеи использования криогенной откачки и сверхпроводящего соленоида, конструкция основных узлов электроннолучевого ионного источника позволила создать установку КРИОН-I, удовлетворяющую этим требованиям.

2. Созданная криогенно-магнитная система ионного источника ^{I/}позволила успешно решить ряд сложных технических задач.

а) Получено "замороженное" фокусирующее магнитное поле с напряженностью ~ 13 кЭ, обеспечивающее возможность получения плотных электронных пучков с высокой степенью компенсации электронного заряда ионами.

б) Применение сверхпроводящего соленоида позволило сформировать магнитное поле с допуском на отклонение оси магнитного поля от геометрической оси корпуса 0,01 см, обусловленным жесткими требованиями к величине токооседания электронного пучка на дрейфовую трубку.

в) Конденсация и криосорбция на стенках дрейфовой трубки, имеющих температуру около 4,2 К, обеспечили сверхвысокий вакуум в области ионизации и эффективную вакуумную развязку области ионизации от внешнего объема.

Особенностями сверхпроводящей фокусирующей магнитной системы (СМС) ионного источника КРИОН являются режим "замороженного" тока и контактный метод термостатирования всех элементов СМС, раз-

мещенных в вакууме и охлаждающихся за счет тепловых контактов в местах их прижима к гелиевому криостату ^{I/}. На рис. I представлена схема криогенно-магнитной системы ионного источника КРИОН-I. Параметры фокусирующего соленоида приведены в табл. I.

Криогенная система ионного источника КРИОН-I разрабатывалась с учетом необходимости непрерывной автономной работы источника на ускорительном комплексе синхрофазотрона в течение нескольких суток. Измеренные величины теплопритоков к жидкому гелию и азоту составили 0,125 и 9,9 Вт, соответственно, что определило время между очередными заливками криоагентов, равное 3 суткам.

3. Разработанная конструкция системы секций дрейфовой трубки электронного пучка позволила создать в части секций дрейфовой трубки локальную область с повышенным давлением рабочего вещества - область ввода, необходимую для осуществления импульсной инжекции ионов рабочего вещества в ионную ловушку методом "электронного регулировщика" ^{I2/}. На рис. 2 представлена схема внутренней части источника КРИОН-I. Центральные секции дрейфовой трубки, ограничивающие область ионизации, в рабочем режиме имеют температуру около 4,2 К, обеспечивая высокий вакуум в области ионизации и эффективную развязку от внешнего объема и от области ввода, которая создается в районе первых секций, находящихся в рабочем режиме при температуре жидкого азота. Внутренний диаметр секций дрейфовой трубки - 0,5 см.

4. В экспериментах по ионизации применялась магнитопогруженная электронная пушка с системой электродов типа Пирса. Для нагрева термокатода диаметром 0,3 см использовался электронный подогрев. Период электронного пучка составлял $(5+10) \cdot 10^{-6} \frac{\text{А}}{\text{В}^{3/2}} / \text{I3/}$.

5. Система подачи рабочего газа в область ввода включает в себя один или три натекатели и капиллярную трубку, подающую газ от натекателей непосредственно в область ввода. Натекатели обеспечивают стабильный и регулируемый в пределах $(10^{-4} - 10^{-8})$ Тор.л/с поток газа. Расход рабочего газа составляет $(10^{-5} + 10^{-6})$ Тор.л/с. В качестве рабочих газов используются этилен (C_2H_4), азот, кислород, неон, аргон, ксенон.

6. Зарядовый состав ионов, образующихся в источнике КРИОН-I, анализируется в масс-спектрометре по времени пролета. Отличительной особенностью применяемых спектрометров является наличие периодической фокусировки в пространстве дрейфа ^{4/}, позволяющей

проводить на ионный коллектор до 50% ионного тока из источника. Разработана серия из трех масс-спектрометров по времени пролета с длиной пролетной базы 1, 2 и 4 м. Разрешающая способность одно-метрового спектрометра, использовавшегося в экспериментах, составляет $R = 30$ по основанию пика для ионов с $\frac{Z}{M} = \frac{1}{2}$.

III. Результаты исследования режимов работы источника КРИОН-I

Целью данной серии экспериментов с ионным источником КРИОН-I было получение такого режима его работы, который в отсутствие фона остаточных газов позволял бы получать фактор ионизации $\int \tau = (4-6) \cdot 10^{18} \text{ см}^2$, обеспечивая при этом интенсивность ионов $\sim 10^{11}$ эл. зар/имп.

Основные результаты экспериментов сводятся к следующему:

1. Устойчивый режим ионизации с удержанием ионов в ловушке и их последующим выводом можно получить только при структуре секций дрейфовой трубки, исключающей взаимодействие электронного пучка с внутренней полостью медного корпуса фокусирующего соленоида, который при наличии такого взаимодействия представляет собой резонатор с высокой добротностью.

2. Установлено, что имеют место два канала поступления фонового газа в область ионизации криогенного электронно-лучевого ионного источника:

- молекулы газа, поступающие в область ионизации из внешнего объема;
- молекулы газа, сконденсированные на внутренней поверхности дрейфовой трубки, сбиваемые компонентами электрон-ионной системы в области ионизации.

Таким образом, для получения высокого вакуума в области ионизации криогенного электронно-лучевого ионного источника необходимо обеспечить низкое парциальное давление плохо конденсирующихся газов (главным образом, водорода и гелия) и исключение токооседания на секции дрейфовой трубки. Установлено, что токооседание величиной в несколько микроампер исключает возможность получения ионов высоких зарядностей.

В экспериментах по ионизации рабочих газов: этилена, азота, аргона и ксенона - был реализован режим работы ионного источника

КРИОН-I, в котором за время ионизации 40 мс доля ионного заряда фоновых газов составляла не более (5-10)% от общего ионного заряда на выходе ионного источника. Величину эквивалентного давления остаточного газа, обеспечивающего за время ионизации τ (с) степень компенсации электронного заряда ионами λ при скорости электронов $v_{эл}$ (см/с), можно найти по формуле:

$$P = \frac{\kappa \lambda}{A \sigma_{\rightarrow 1} \tau \bar{z} \cdot v_{эл}} \quad (3.1)$$

$$\bar{z} = \frac{\int z(t) dt}{\tau} \quad (3.2)$$

P - величина эквивалентного давления остаточного газа (Тор),

$\kappa = 3 \cdot 10^{-17}$ при комнатной температуре газа,

A - количество атомов в молекуле остаточного газа,

$\sigma_{\rightarrow 1}$ - сечение ионизации атома остаточного газа (см^2).

Расчет по формуле (3.1) показывает, что в условиях проведенных экспериментов скорость поступления фонового газа в электронный пучок соответствовала эквивалентному давлению азота, имеющего комнатную температуру, равному $\sim 8 \cdot 10^{-11}$ Тор, которое с помощью традиционных методов откачки в трубке дрейфа обеспечить затруднительно.

3. В ходе экспериментов с ионным источником КРИОН-I были испытаны следующие виды регулировки количества инжектируемых в область ионизации ионов рабочего вещества:

- изменение величины давления рабочего газа в области ввода,
- изменение величины тока электронного пучка во время ввода,
- метод "электронного регулировщика" /I2/,
- изменение амплитуды аксиального записания во время ввода - модифицированный метод "электронного регулировщика".

Наиболее удобным для практического применения выбран метод "электронного регулировщика", позволяющий осуществлять регулировку дистанционно и с высокой точностью.

4. Параметры ионного источника КРИОН-I.

- Для целей ионизации использовался электронный пучок с током (1 - 1,5) А и энергией электронов (2-4) КэВ.

- б) Плотность тока электронного пучка составляла $(15+30) \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$.
- в) Максимальная длительность ионизации - 40 мс.
- г) Суммарный ионный заряд, регистрировавшийся на выходе из источника, составлял $(6-8) \cdot 10^{10}$ элем.зар.
- д) Длительность ионного импульса на уровне половины амплитуды составляла $(60 + 100)$ мкс.
- е) Частота следования циклов ионизации - $(0,1 + 0,2)$ Гц.

В ионном источнике КРИОН-I впервые удалось реализовать импульсную инжекцию рабочего вещества в ионную ловушку методом "электронного регулятора". В этих экспериментах был реализован режим с "чистыми" условиями ионизации, что при использовании ионного источника КРИОН-I на ускорителе важно для обеспечения требуемой чистоты ускоренного ядерного пучка. Кроме того, отсутствие постоянного потока молекул в ионную ловушку позволяет значительно упростить процедуру нахождения из экспериментальных данных сечений ионизации электронным ударом и, следовательно, повысить точность этих измерений.

IV. Результаты экспериментов по ионизации углерода, азота, аргона и ксенона в ионном источнике КРИОН-I

I. С использованием электронно-лучевого ионного источника КРИОН-I экспериментально изучались процессы глубокой ионизации ряда элементов электронным ударом в диапазоне величин фактора ионизации $(0 + 6,4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ и энергии электронов $(2,1+3)$ КэВ.

В экспериментах по ионизации углерода и азота были зарегистрированы ядра C^{+6} в количестве до $3 \cdot 10^9$ ядер/имп. и ядра N^{+7} в количестве до $2 \cdot 10^9$ ядер/имп. На рис. 3 представлен спектр ионов азота, полученных за 39 мс ионизации при токе электронного пучка $0,9 \text{ А}^{1/2}$.

При ионизации аргона были зарегистрированы ионы с максимальной зарядностью +15. На рис. 4 представлен ряд осциллограмм спектров зарядностей ионов ксенона, полученных за время ионизации от 3 до 39 мс. Из рисунка видно, что с увеличением времени ионизации ионы низких зарядностей переходят в ионы более высоких зарядностей, при этом спектр зарядностей остается довольно узким. Из осциллограммы спектра зарядностей ионов ксенона, соответствующей времени ионизации 39 мс, следует, что максимальная заряд-

ность ионов в спектре составила +29, минимальная - +18, зарядность в максимуме спектра +24. Примесь ионов фоновых газов за 39 мс ионизации не превышает $(5 + 10)\%$, что свидетельствует о "чистых" условиях ионизации¹²⁾.

Таким образом, на установке КРИОН-I впервые удалось реализовать фактор ионизации $j\tau = 6,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, превышающий фактор ионизации, достигнутый в ионном источнике Пеннинга, примерно в 100 раз. Реализация такого фактора ионизации обеспечила получение рекордных зарядностей ионов.

2. Экспериментальные данные в виде осциллограмм спектров зарядностей ионов аргона, полученные при плотности тока электронного пучка $17,5 \text{ А/см}^2$ и энергии электронов 2,5 КэВ, были реализованы для нахождения сечений глубокой ионизации ионов аргона электронным ударом в диапазоне величин фактора ионизации $(0,6 - 4,5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Эта задача решалась с применением математического аппарата (4,1 - 4,3) из работы¹⁴⁾:

$$\begin{aligned} N_1(j\tau) &= A_{11} e^{-\sigma_1 j\tau} \\ N_2(j\tau) &= A_{21} e^{-\sigma_1 j\tau} + A_{22} e^{-\sigma_2 j\tau} \\ N_k(j\tau) &= A_{k1} e^{-\sigma_1 j\tau} + \dots + A_{kk} e^{-\sigma_k j\tau} \end{aligned} \quad (4.1)$$

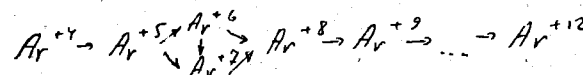
Коэффициенты A_{ki} определяются выражениями:

$$A_{ki} / k \neq 1 = A_{k-1} i \frac{\sigma_k}{\sigma_k - \sigma_i}, \quad (4.2)$$

$$A_{kk} = N_k(0) - A_{k,k-1} - A_{k,k-2} - \dots - A_{k1}, \quad (4.3)$$

σ_i - сечение однократной ионизации иона с зарядностью i ,
 $N_k(j\tau)$ - количество ионов с зарядностью k при факторе ионизации $j\tau$.

Для ионизационной цепочки^{*)}



*) Ионизационная цепочка предложена Е.Д. Донцом.

найден набор сечений, удовлетворяющий экспериментальным данным. В строке (1) табл. II представлены найденные величины сечений, в строке (2) приведены экспериментальные результаты из работы /15/, в строке (3) - результаты теоретических расчетов А.Салопа /16/ по модели двойных соударений.

Результаты расчетов для взятой ионизационной цепочки, проведенных в соответствии с математическим аппаратом (4.1-4.3) при полученном наборе сечений, вместе с экспериментальными точками представлены в виде кривых на рис. 5. Ошибки в определении сечений оцениваются в $\pm 15\%$.

На рис.6 представлены значения сечений ионизации (полных, одно- и двухэлектронной ионизации) в зависимости от зарядности ионов.

V. Ионный источник КРИОН-I на ускорительном комплексе синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ

I. На первом этапе этого цикла экспериментов ионный источник КРИОН-I был установлен на инжекторном комплексе ЛУ-9М. Преследовалась цель изучения возможностей использования ионного источника КРИОН-I в качестве элемента ускорительного комплекса для проведения сеансов ускорения легких ядер (главным образом, C^{+6} и N^{+7}) на синхрофазотроне.

В ходе экспериментов было установлено, что получению рабочего режима препятствует поток водорода из объема форинжектора, с которым ионный источник КРИОН-I был состыкован через оптический согласователь, обладавший большой вакуумной проводимостью.

Тем не менее в ходе одного из кратковременных экспериментов были получены ускоренные до энергии 2,2 МэВ/нуклон ядра азота N^{+7} в количестве $\sim 10^7$ ядер/имп. и ядра гелия He^{+2} в количестве $\sim 10^8$ ядер/6/имп.

2. В ходе подготовки к сеансу с целью повышения надежности и мобильности ионного источника КРИОН-I был модернизирован ряд его систем. Модернизация вакуумной системы заключалась в установке между КРИОН-I и форинжектором импульсного вакуумного затвора, соединяющего их вакуумные объемы для пропускания ионного пучка на время 13 мс и закрытого между импульсами инжекции /5/.

Использование затвора позволило получить режим работы ионного источника, идентичный режиму в стендовых условиях с автономной вакуумной системой. Модернизация электронно-оптической системы заключалась в замене магнитопогруженной пушки электронной пушкой с катодом, вынесенным в магнитное поле, составляющее 16% от поля в центре соленоида, так что имела место шестикратная компрессия электронного пучка магнитным полем /17/. В ходе сеанса ионный источник имел следующие рабочие параметры. Ток электронного пучка составлял 50 мА при плотности тока 60 А. Время ионизации - до 150 мс, длительность ионного импульса на уровне половины амплитуды - 35 мкс, частота циклов ионизации определялась частотой работы ускорителя и составляла 0,12 Гц. Ионный заряд на выходе из источника не зависел от вида рабочего вещества и составлял $2 \cdot 10^9$ эл.зар/имп., причем до 80% этого заряда регистрировалось на входе ЛУ-20 в апертуре цилиндра Фарадея диаметром 1 см. На линейном ускорителе ЛУ-20 были ускорены ядра C^{+6} , N^{+7} , O^{+8} и N^{+10} со следующими интенсивностями:

$$C^{+6} - 2 \cdot 10^7 \frac{\text{ядер}}{\text{имп.}}, \quad N^{+7} - 1 \cdot 10^7 \frac{\text{ядер}}{\text{имп.}}, \quad O^{+8} - 5 \cdot 10^6 \frac{\text{ядер}}{\text{имп.}}, \\ N^{+10} - 1 \cdot 10^6 \frac{\text{ядер}}{\text{имп.}}.$$

Максимальная интенсивность ускоренных на синхрофазотроне и зарегистрированных на выходе канала медленного вывода ядер C^{+6} и O^{+8} составила соответственно $2,8 \cdot 10^4$ ядер/имп. и $6 \cdot 10^3$ ядер/имп. При попытке ускорить ядра неона было зарегистрировано индикаторное количество ускоренных до энергии 84 ГэВ ядер неона.

На рис. 7 представлены спектры ускоренных на синхрофазотроне ядер C , O и N^{+7} , зарегистрированные на выходе канала медленного вывода с помощью спектрометра удельных потерь энергии /18/. Анализ этих спектров показывает, что при ускорении ядер углерода их доля в общем спектре превышает 90%, при ускорении кислорода доля ядер кислорода превышает 80%. Потери вследствие подхвата электронов при столкновениях с молекулами остаточного газа, несовершенство системы подачи рабочего вещества в ионный источник и, как следствие этого, недостаточно высокая чистота вводимого рабочего вещества обусловили неудачу попытки ускорения ядер неона.

В ходе сеанса общее время работы ионного источника КРИОН-I на ускорителе составило 540 часов, за это время источник ни разу не вскрывался. Потери времени на текущее обслуживание КРИОН-I не

превышали двух часов каждые двое суток и были вызваны необходимостью заливки криоагентов в криостаты источника.

Нестабильность заряда ускоренных ядер на выходе ДУ-20 за все время не превышала 20% /6/.

Использование источника КРИОН-I впервые в мире дало возможность провести длительный сеанс ускорения ядер С и О до энергии 4,2 ГэВ/нуклон и выполнить ряд физических экспериментов с этими ядрами на пропановой, струйной камере и на фотоэмульсиях.

Выводы

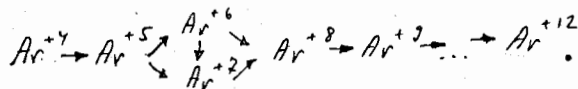
1. Разработаны, испытаны и применены в электронно-лучевом ионном источнике криогенно-вакуумная и сверхпроводящая магнитная система фокусирующего соленоида с контактным методом термостатирования.

2. Разработаны и применены элементы электронно- и ионно-оптической систем электронно-лучевого ионного источника, а также система подачи рабочего вещества в область ввода ионного источника. Разработана и введена в эксплуатацию серия из трех масс-спектрометров по времени пролета с длиной пролетной базы 1, 2 и 4 м.

3. Проведено исследование режимов работы ионного источника КРИОН-I, в результате которого были реализованы "чистые" условия ионизации, позволившие получить фактор ионизации $\sigma = 6,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

4. В экспериментах по ионизации углерода, азота, аргона и ксенона получены ядра азота N^{+7} в количестве $2 \cdot 10^9$ ядер ИМП., ядра углерода C^{+6} в количестве $3 \cdot 10^9$ ядер ИМП., а также ионы Ar^{+15} и Xe^{+29} .

5. Впервые измерены сечения глубокой ионизации положительных ионов аргона электронным ударом при фиксированной энергии бомбардирующих электронов 2,5 КэВ в ионизационной цепочке



6. Проведена работа по адаптации ионного источника КРИОН-I к условиям работы на ускорителе, в результате которой в источнике был получен устойчивый рабочий режим с "чистыми" условиями ионизации.

7. С использованием ионного источника КРИОН-I на синхротроне проведен длительный сеанс ускорения ядер С, N, O и Ne и выполнен ряд физических экспериментов с трековыми детекторами и фотоэмульсиями. Впервые в мире ядра кислорода и неона ускорены до энергии 4,2 ГэВ/нуклон.

Табл. I. Параметры фокусирующего соленоида

№ пп	Наименование параметров	Величина
1.	Длина обмотки соленоида	120 см
2.	Внутренний диаметр обмотки	5 см
3.	Материал сверхпроводника	НТ-50
4.	Диаметр сверхпроводящего кабеля без изоляции	0,5 мм
5.	Общая длина сверхпроводника в обмотке соленоида	2550 м
6.	Общее количество витков в обмотке	15000
7.	Индуктивность соленоида	0,54 Гн
8.	Напряженность магнитного поля в центре соленоида при токе 80 А	12,8 кЭ
9.	Величина запасенной энергии магнитного поля соленоида при токе 80 А	1,75 кДж
10.	Площадь поперечного сечения материала корпуса соленоида	10 см ²

Таблица II. Значения сечений полной, одно- и двухэлектронной ионизации ионов аргона электронным ударом (в единицах 10^{18} см^{-2})

1 - экспериментальные результаты, полученные на установке КРИОН-I /14/
 2 - экспериментальные результаты, полученные на КРИОН-2 /16/
 3 - результаты расчетов Салона А /17/.

	σ_4	σ_5			σ_6			σ_7	σ_8	σ_9	σ_{10}	σ_{11}	σ_{12}
		σ_{5x}	σ_{5+6}	σ_{5+7}	σ_{6x}	σ_{6+7}	σ_{6+8}						
1	4,6	3,5	2,05	1,45	2,3	0,92	1,38	1,4	0,88	0,65	0,45	0,30	0,20
2									0,6	0,48	0,35	0,25	0,18
3	3,31	2,39	1,67	0,72	1,76	1,10	0,66	1,56	0,68	0,45	0,34	0,26	0,18

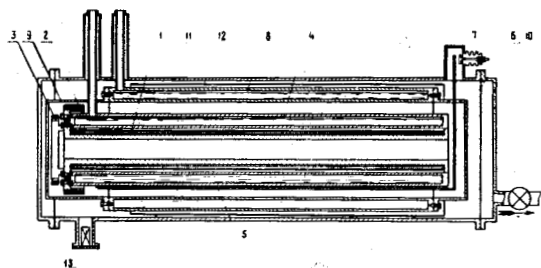


Рис. 1. Общий вид криогенно-магнитной системы. 1 - сверхпроводящий соленоид, 2 - ключ, 3 - промежуточное кольцо со спаями сверхпроводников, 4 - гелиевый криостат, 5 - токоподводящие шины, 6 - жесткие участки шин, 7 - подвижные электроды контактора, 8 - азотный криостат, 9,10 - торцевые радиационные экраны, II - вакуумный кожух, I2 - "плавающий" радиационный экран, I3 - манометрический датчик.

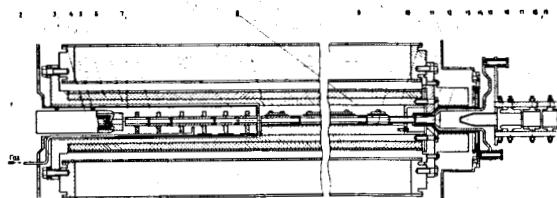


Рис. 2. Внутренняя часть ионного источника КРИОН-1. I - трубка подачи газа в область ввода, 2, I5 - торцевые радиационные экраны, 3 - электронная пушка, 4 - текстолитовые столбики, 5 - обмотка соленоида, 6 - корпус соленоида, 7 - секции дрейфовой трубки, имеющие температуру жидкого азота, 8 - секции, имеющие температуру жидкого гелия, 9 - гелиевый криостат, I0 - шина, II - последняя (25-я) секция, имеющая температуру жидкого азота, I2, I3 - магнитный полюс, I4 - электронный коллектор, I6 - изолятор вытягивающего электрода, I9 - электроды выходной линзы.

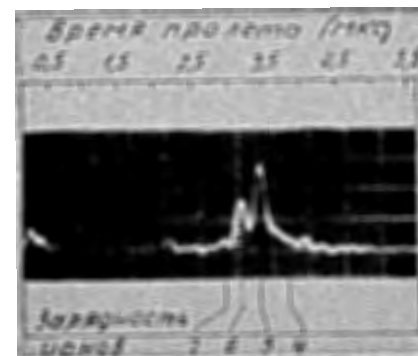


Рис. 3. Спектр зарядностей ионов азота за 39 мс ионизации.

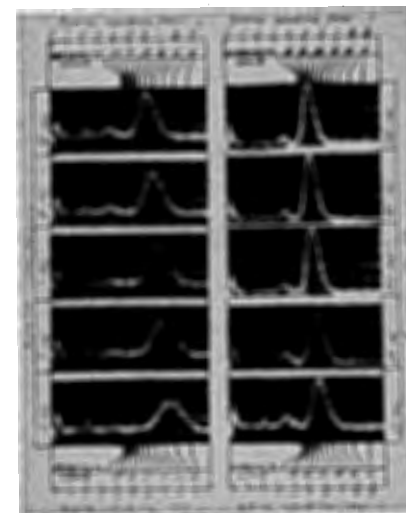


Рис. 4. Зависимость вида спектров зарядностей ионов ксенона от времени ионизации.

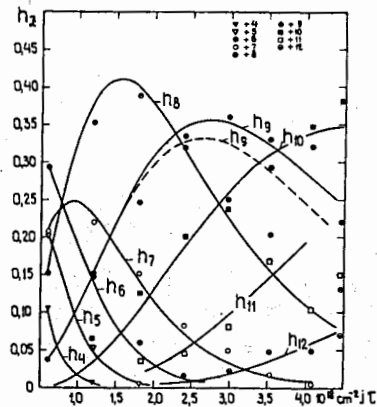


Рис. 5. Эволюция спектра зарядностей ионов аргона в зависимости от фактора ионизации.

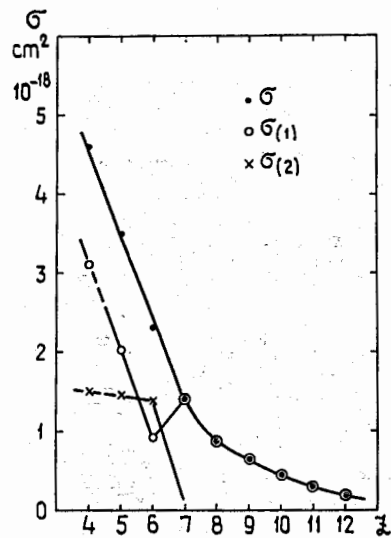


Рис. 6. Зависимость сечений ионизации ионов аргона от зарядности. σ - полное сечение, $\sigma(1)$ - сечение одноэлектронной ионизации, $\sigma(2)$ - сечение двухэлектронной ионизации.

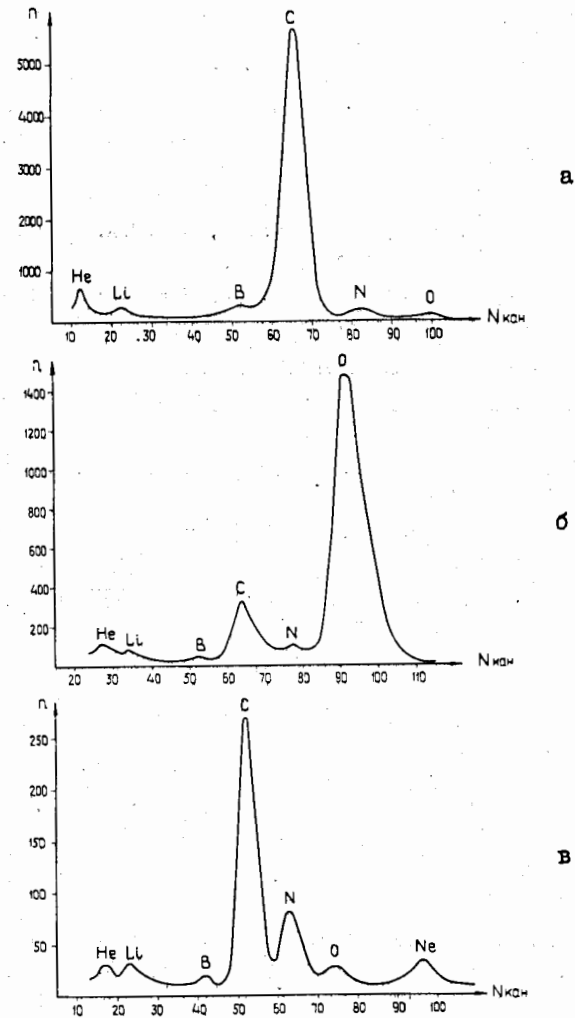


Рис. 7. Спектры ядер на выходе синхрофазотрона при ускорении а - углерода, б - кислорода, в - неона.

Работы, положенные в основу диссертации:

1. В.Г.Аксёнов, В.Д.Донец, А.И.Пикин, М.А.Широв.
ОИЯИ, Р8-8563, Дубна, 1975.
2. Е.Д.Донец, А.И.Пикин. ЖТФ, 45, II, 2373, 1975.
3. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.П.Овсянников, А.И.Пикин.
Материалы IV Всесоюзного совещания по ускорителям, Москва,
т. I, 314, 1974.
4. Е.Д.Донец, А.И.Пикин. ЖТФ, 70, 6, 2025, 1976.
5. В.Н.Булдаковский, В.П.Вадеев, А.И.Пикин, В.И.Черников.
ОИЯИ, Р9-10836, Дубна, 1977.
6. В.П.Вадеев, Е.Д.Донец, В.Г.Дудников, Л.П.Зиновьев,
А.И.Пикин. ОИЯИ, Р7-10823, Дубна, 1977.

Цитированные работы

7. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-4124, Дубна,
1968.
8. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-4469,
Дубна, 1969.
9. J.Ariener, C.Goldstein. IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-23,
2, 979, 1976.
10. R.W.Namm, L.M.Choat, K.A.Kenefick. IEEE Trans. on Nucl. Sci.,
NS-23, 2, 1013, 1976.
11. R.Becker, H.Klein. IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-23, 2, 1017,
1976.
12. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. Авт. свид. № 375708
Бюлл. изобрет. № 16, 1973.
13. В.П.Овсянников, ОИЯИ, I3-9584, Дубна, 1976.
14. Экспериментальная ядерная физика. Под редакцией Э.Сегре.
Иностранная литература, Москва, т.Ш, стр. I3, 1961.
15. Е.Д.Донец, В.П.Овсянников. ОИЯИ, Р7-10780, Дубна, 1977.
16. A.Salop. Phys. Rev., A14, 2095, 1976.
17. Е.Д.Донец, В.П.Овсянников. ОИЯИ, Р7-9799, Дубна, 1976.
18. А.Х.Аникина и др. ОИЯИ, I3-9030, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 января 1978 года.