

0-345



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7 - 11237

ОВСЯННИКОВ  
Владимир Петрович

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ  
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИОНОВ  
ВЫСОКОЙ ЗАРЯДНОСТИ

Специальность: 05.09.04 - электрофизические установки  
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Заказ 24317. Тираж 140. Уч.-изд. листов 1,08.  
Редактор Б.Б. Колесова. Подписано к печати 24.1.78 г.  
Корректор В.А. Халякина

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований ( Дубна )

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Евгений Денисович Донец

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Игорь Александрович Шелаев

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Олег Константинович Култашев

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ 1978 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ 1978 г.  
в " \_\_\_\_\_ часов на заседании Специализированного учёного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московской области, ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в Лаборатории  
высоких энергий.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физ.-мат. наук, старший  
научный сотрудник *Лихачев*

М.Ф. ЛИХАЧЕВ

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Основной причиной, стимулирующей развитие источников многозарядных ионов (МЗИ) тяжелых элементов и ядер некоторых легких элементов, является широкая программа фундаментальных и прикладных исследований, связанная с использованием ускоренных пучков тяжелых ионов и ядер <sup>7,8/</sup>.

В области энергий  $E \leq 30$  МэВ/нуклон <sup>7/</sup> (нерелятивистская ядерная физика) ускорение все более тяжелых ионов значительно расширяет существующие экспериментальные возможности <sup>8/</sup>. Разработка ионного источника, обладающего ионизационной способностью, достаточной для получения ионов урана зарядностью  $Z = 24+40$  <sup>9/</sup>, позволит осуществить широкую программу исследований синтеза ядер новых элементов, включая реакцию  $U + U$  на существующих ускорителях ЛЯР ОИЯИ.

Возникшее за последнее время и успешно развивающееся направление <sup>7,10/</sup> - релятивистская ядерная физика - существенно дополняет проблематику исследований на ускорительных комплексах высоких энергий <sup>7/</sup>.

Расширение диапазона возможных исследований требует решения основной технической проблемы - получения пучков ядер <sup>7/</sup>. Создание эффективного источника ядер позволит превратить ускорители физики высоких энергий в ускорители релятивистских ядер без существенной реконструкции инжекционных комплексов ускорителей. Так, например, ускоряющая система синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ в настоящее время способна принципиально ускорять ядра элементов, включая <sup>Ca20</sup> <sub>40</sub>.

Пучки многозарядных ионов могут применяться, в частности:

- для изучения перезарядки на твердом веществе и газе;
- для получения информации о поверхности твердого тела;
- для ионного легирования и получения материалов с заданными свойствами, например, обладающими высокой вторичной эмиссией

Изучение образования многократно ионизированных ионов представляет возможность экспериментально получить фундаментальную информацию о сечениях глубокой ионизации и других глубоконеупругих процессах в электрон-ионных столкновениях, которые для элементов с большим  $Z$  изучены далеко не достаточно /10/.

Цель работы. Целью диссертационной работы является создание электронно-оптической системы (ЭОС), формирующей плотные электронные пучки для получения в электронно-лучевом ионном источнике ядер легких элементов; исследование эффективности удержания и ионизации в ионной ловушке в зависимости от параметров ЭОС; измерение сечений ионизации полученных ионов.

Научная новизна. Разработаны и экспериментально подобраны параметры ЭОС, в которой при плотности тока  $j \approx 150 \text{ А/см}^2$  в течение 100 мс удержания сохраняется 20-25%-ная степень компенсации объемного заряда ионной ловушки и впервые получены пучки ядер кислорода  $O^{+8}$  и неона  $Ne^{+10}$  с интенсивностью  $10^8$  ядер/имп. /1,2/.

Впервые в ионном источнике реализован фактор ионизации (произведение плотности тока на время взаимодействия)  $j\tau \approx 3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$  и произведена ионизация К-оболочки Ar, причём в экспериментах не обнаружено причин, однозначно ограничивающих фактор ионизации /2,3/.

Впервые измерены величины и энергетические зависимости сечений последовательной ионизации электронным ударом L- и K-оболочек ионов азота, кислорода и аргона в диапазоне энергий 1-7 кэВ и оценены сечения последовательной ионизации L- и K-оболочек ионов неона при энергии  $\sim 2,5$  кэВ. Полученные данные хорошо совпадают с расчетами по теории двойных соударений /3/.

Практическая ценность. I. Создана экспериментальная установка "Крион-2" /1/, использующая ЭОС с магнитной компрессией магнитоограниченного электронного пучка в магнитном поле сверхпроводящей магнитной системы (СМС), в которой могут быть проведены различные физические исследования, в частности, исследования устойчивости электронных пучков, нагруженных ионами.

2. В установке "Крион-2" получены пучки ядер  $N^{+7}$ ,  $O^{+8}$ ,  $Ne^{+10}$ ,  $Ar^{+18}$  и МЗИ  $Xe^{+37}$ , которые могут быть использованы в физических экспериментах; впервые измерены энергетические зависимости сечений последовательной ионизации электронным ударом L- и K-оболочек ионов N, O, Ar в диапазоне энергий - 1-7 кэВ, необходимые в различных областях науки и техники: атомной физике, астрофизике, физике плазмы, технике ионных источников и пр.

3. Создана методика измерений тепловыделений в СМС, которая может быть использована для исследования СМС с переменными магнитными полями.

4. Элементы ЭОС "Крион-2" могут быть применены в электронно-лучевых приборах с электронными пучками, сочетающими высокую плотность тока и жесткость фокусировки, в частности, электронная пушка "Крион-2" применена в источнике "Крион-1" при ускорении ядер углерода, азота, кислорода и неона на синхротроне ЛВЭ ОИЯИ /11/.

Апробация работы. Работы, положенные в основу диссертации, были представлены на IV Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1974) и на X Международную конференцию по физике электронных и атомных столкновений (Париж, 1977).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано шесть статей в сообщениях ОИЯИ, трудах совещаний и конференций.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 96 страницах машинописного текста и иллюстрируется 43 рисунками и 15 таблицами. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 122 наименований.

Состояние вопроса и задачи исследования. Принцип электронно-лучевого ионного источника предложен Е.Д. Донцом в 1967 году /12/. В первых разработках этого источника в варианте "ИЭЛ" достигнут фактор ионизации  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при плотности электронного пучка  $\sim 8 \text{ А/см}^2$  и получены ионы  $Au^{+19}$  /13,14/.

В электронно-лучевом источнике "Крион-1", использующем криогенную систему откачки и сверхпроводящий соленоид, достигнут фактор ионизации  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  и произведена ионизация К-оболочки азота /15,16,17/. Создание такой установки позволило провести измерения сечений глубокой ионизации электронным ударом, которые



являются фундаментальными величинами и для элементов с большим  $Z$  изучены далеко не достаточно <sup>/10/</sup>. В экспериментах измерены сечения ионизации L- и K-оболочек азота при энергии 2,1 кэВ <sup>/16/</sup>, углерода при энергии 2,5 кэВ <sup>/16/</sup>, M- и, частично, L-оболочек аргона при энергии 2,5 кэВ <sup>/17/</sup>.

Однако при рабочих параметрах электронно-лучевого источника "Крион-1" в спектре зарядностей содержится лишь 5% ядер азота <sup>/15/</sup>. В приведенных работах отсутствуют данные о зависимости эффективности удержания и ионизации в ионной ловушке от параметров ЭОС. Разработки электронно-лучевых источников, начатые за рубежом <sup>/18-20/</sup>, в настоящее время не достигли параметров установки "Крион-1".

Актуальными вопросами дальнейшего исследования электронно-лучевого ионного источника являются реализация значительно больших значений фактора ионизации и экспериментальное изучение эффективности удержания и ионизации в ионной ловушке. Увеличение фактора ионизации связано с использованием более плотных электронных пучков и большего времени удержания. В общем случае время удержания ионов в ловушке и плотность электронного тока связаны в процессе электрон-ионных взаимодействий. Поэтому в задачу исследования входят: выбор системы формирования плотного электронного пучка, разработка и исследование экспериментальной установки, исследование процессов получения МЗИ в ионной ловушке, измерения сечений ионизации электронным ударом.

К защите представляются следующие тезисы:

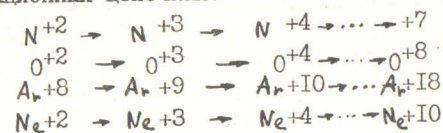
1. Выбор системы формирования плотного электронного пучка на основе требований получения пучков ядер легких элементов в электронно-лучевом ионном источнике.

2. Конструкция электронных пушек, формирующих электронные пучки высокой плотности, перванса и элементов электронно-оптической системы источника, использующей сверхпроводящую магнитную систему.

3. Идентификация процессов в криогенно-магнитной системе с контактным методом термостабилизации; гистерезисных и вихревых потерь в обмотке сверхпроводящего соленоида, при изменениях тока, причин, приводящих к деградации системы. Измерение теплопроводности обмотки и теплопроводности контактов.

4. Результаты применения магнитосжатого плотного электронного пучка для получения ядер  $N^{+7}, O^{+8}, Ne^{+10}$  и многозарядных ионов, выразившиеся в экспериментальном определении параметров ЭОС, позволившей получить пучки перечисленных ядер с интенсивностью  $\sim 10^8$  ядер/импульс.

Результаты измерения сечений ионизации методом ионной ловушки в ионизационных цепочках:



в диапазоне энергий 1-7 кэВ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены проблемы, связанные с реализацией электронно-лучевого источника многозарядных ионов (МЗИ), и выбрана основа источника - ЭОС. Принцип действия электронно-лучевого источника ионов основан на использовании ионной ловушки <sup>/12,14,15/</sup>. Необходимые величины фактора ионизации могут быть получены из работы <sup>/17/</sup>. Доля ядер  $Ar^{+18} \sim 50\%$  в спектре соответствует величине фактора ионизации  $\sim 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ , т.е. плотности электронов ( $I \div 10^3 \text{ А/см}^2$ ) и времени взаимодействия ( $330 \text{ с} \div 330 \text{ мс}$ ), которое может быть обеспечено ионной ловушкой. Условие сверхвысокого вакуума является необходимым <sup>/12/</sup> для такого времени удержания, но не достаточным, т.к. в общем случае эффективность ионной ловушки определяется устойчивостью многокомпонентной системы заряженных частиц. Для поперечной неустойчивости Будкера-Бунемана стабилизирующие магнитные поля <sup>/21/</sup> лежат в интервале (2,3 кэВ<sup>рез</sup>  $\div$  25 кэВ<sup>нерез</sup>) при 100%-ной степени компенсации объемного заряда ионной ловушки, плотности электронного тока  $i \approx 10^3 \text{ А/см}^2$ , длине системы  $\sim 1 \text{ м}$ ,  $\beta = 0,2$ . Интенсивность ионного пучка определяется выражением  $g: (I/\text{имп}) = \alpha(j\epsilon) f_c 10^7 P L U \frac{1}{z}$ , где  $\alpha(j\epsilon)$  - относительное количество ионов с зарядом  $\frac{z}{e}$  в спектре,  $f_c$  - степень компенсации объемного заряда ловушки, P - перванс электронного пучка (мкА/В<sup>3/2</sup>),

$\Delta$  - длина ловушки (м),  $U$  - напряжение (В). Интенсивность  $\sim 1,5 \cdot 10^{10}$  ядер/имп.  $A_{r+18}$  можно получить при 50%-ной степени компенсации электронного пучка с первеансом  $\sim 10$  мкА/В<sup>3/2</sup>, напряжением  $\sim 10$  кВ, плотностью тока  $\sim 10^3$  А/см<sup>2</sup>, длиной  $\sim 1$  м, за время ионизации  $\sim 0,3$  с в магнитном поле  $\sim 25$  кЭ.

КПД источника, влияющий на его надежность, в первую очередь определяется эффективностью использования ионной ловушки -  $\alpha(j^2)fe$ . ЭОС источника следует выбирать с учётом  $\alpha(j^2)fe$  при заданных выходных параметрах. Мощность источников питания понижается с использованием рекуперации энергии электронного пучка<sup>/22/</sup> и сверхпроводящей магнитной системы<sup>/15/</sup>. Криогенная техника рационально вписывается в общую схему источника и с точки зрения вакуумной технологии<sup>/15/</sup>, однако при этом возрастают требования к токопроводящему в ЭОС.

Требования, обуславливающие выбор ЭОС, следующие:

1) сверхпроводящая магнитная система (СМС) с индукцией в несколько Тл;

- 2) электронный пучок максимальной плотности и первеанса;
- 3) токопроводящее, близкое к 100%.

На основе этих требований и с учётом отсутствия известных данных о получении МЭИ в плотных электронных пучках ( $\sim 100$  А/см<sup>2</sup>), в качестве системы формирования выбрана система магнитной компрессии магнитоограниченного электронного пучка<sup>/1/</sup>.

Во второй главе рассмотрена конструкция экспериментальной установки "Крион - 2", предназначенной для изучения процессов удержания и многократной ионизации в плотном электронном пучке. Приведены результаты экспериментов с электронными пучками.

Экспериментальная установка (рис.1) состоит из следующих блоков: криогенно-магнитной системы (5-6), электронной пушки (1), дрейфовой структуры (22-23) и выходной оптики (6). Электронная пушка имеет возможность перемещения по координатам  $x, y, z$ ; вытягивающий электрод - вдоль оси соленоида. Молибденовые зонды контролируют распределение тока по поверхности коллектора. Танталовые диафрагмы дают информацию о радиальном положении электронного пучка.

Конструкция СМС использует контактный метод термостабилизации<sup>/23/</sup>. Исследование этого метода выполнено на установке "Крион-2"<sup>/4/</sup>. Методика экспериментов заключалась в измерении изменений тока в соленоиде, температуры соленоида, сверхпроводящей перемычки, спаев, ЭДС индукции и построении временных диаграмм (рис.2 а, б).

Ввод тока в соленоид сопровождается дополнительным перегревом перемычки, нагревом соленоида и ростом напряжения на токоведущих шинах (рис.2 а, б).

Необходимыми параметрами СМС с контактным методом термостабилизации являются величины теплопроводности контактов и обмотки соленоида, представляющие собой сложную структуру. Измерение мощности, выделяющейся в перемычке, и температуры дает теплопроводность контакта  $\sim 2,9$  Вт/град. По скорости охлаждения обмотки соленоида оценены абсолютные значения удельной и полной её теплопроводности, которая при изменениях поля от 0 до 25 кЭ меняется в  $\sim 5$  раз. Это можно объяснить ухудшением контакта обмотки - корпус соленоида. Постоянная тепловой диффузии  $\sim 6 \cdot 10^{-3}$  л/с ( $H=0$ ). Величины тепловыделений приблизительно соответствуют  $\Delta H$ <sup>/24/</sup>. Вклад вихревых потерь оценен по кривым нагрева соленоида при одинаковых

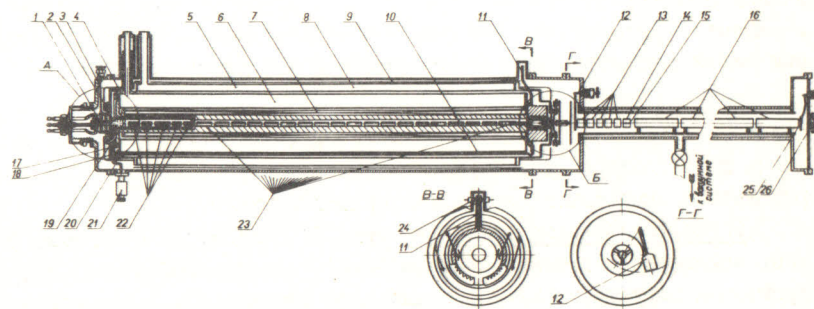


Рис.1. Конструкция электронно-лучевого источника "Крион-2" и масс-спектрометра по времени пролета.

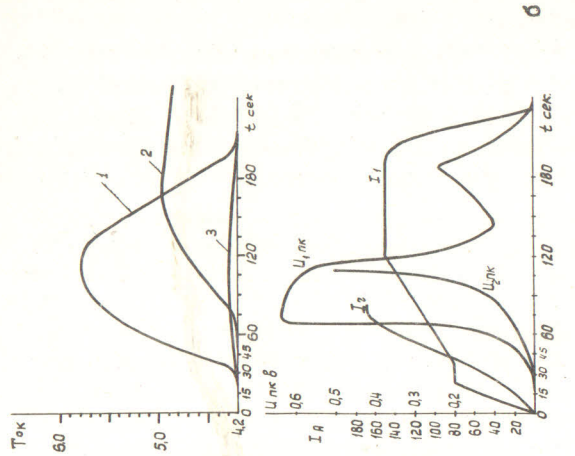
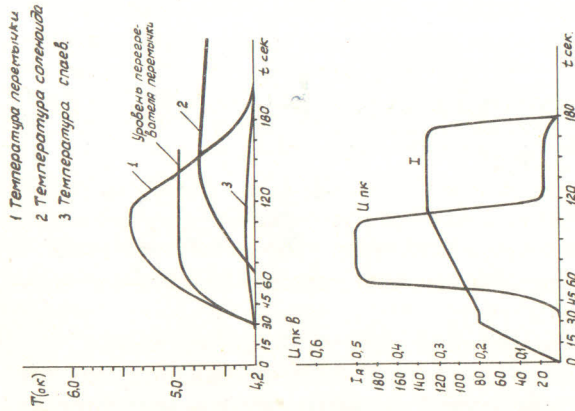


Рис.2 а, б. Процессы в СМС при вводе тока в соленоид

а - ввод тока 80 - 130 А;

б - ввод тока 80 - 150 А.

$U_{нк}$  - показания потенциальных кондов.

Δ Н. При принятых скоростях нарастания поля ( $\dot{B} \leq 150$  Гс/с) основными являются гистерезисные потери.

В СМС введен ток 168 А (28кЭ) и получен короткозамкнутый режим. Рабочие режимы 150 А и 130 А, что связано с нестационарными процессами на токоведущих шинах (рост "нормальной" зоны, рис.2 б). Переход в нормальное состояние при запасенной энергии  $\sim 8$  кДж не приводит к выходу системы из строя.

При соблюдении необходимых требований СМС с контактным методом термостабилизации обладает необходимыми эксплуатационными характеристиками и не уступает системам, погруженным в жидкий гелий.

Электронная пушка "Крион-2" обладает пирсовской геометрией электродов. Диаметр катода 0,8 мм, расстояние катод-анод -0,8 мм. Расчётные траектории  $^{1/2}$  на участке в 8 мм представлены на рис.3. Расчётный первеанс  $\sim 1,69$  мкА/В  $^{3/2}$ . Магнитное поле нарастает от 3 кЭ на катоде до  $22,5 + 25$  кЭ в области ионизации. Максимальный ток в системе 500 мА ( $j \approx 700$  А/см $^2$ ). Диаметр электронного пучка в регулярной области  $\sim 0,33$  мм. Такой пучок с помощью шиммирования магнитного поля выведен на электронный коллектор через дрейфовую структуру диаметром 3 мм и длиной 1200 мм без токооседания в области ионизации. Токооседание замечено только на аноде электронной пушки, диафрагмах, последней секции трубки дрейфа и составляет в рабочих условиях  $\sim 10^{-3}$  от общего тока. Наблюдается "следование" электронных траекторий магнитным силовым линиям и "фонтанирование" электронов в области коллектора. Отпечаток электронного пучка на диафрагме  $\sim 0,5$  мм, полученный изменением шиммирования, подтверждает регулярный диаметр пучка  $\sim 0,3$  мм.

Электронная пушка "Крион-1"  $^{1/5}$  сочетает первеанс  $\sim 10 + 16$  мкА/В  $^{3/2}$  и плотность тока  $\sim 100$  А/см $^2$ . Авторами проекта  $^{1/15}$  выбрана система формирования с полностью погруженной электронной пушкой и экстремальными параметрами промежутка катод-анод - "d". В этом случае основой конструкции является катодно-подогревный узел и выбор эмиттера.

Принята система эмиссионного подогрева. Держатель катода представляет собой цилиндр с прорезями, расположенными так, что при небольших габаритах 9 x 5 мм обеспечивается малая величина теплопроводности.

Экспериментально получены электронные пучки с током до 2,5 А и первеансом  $10 + 12$  мкА/В  $^{3/2}$ . Диаметр электронного пучка - 3 мм.

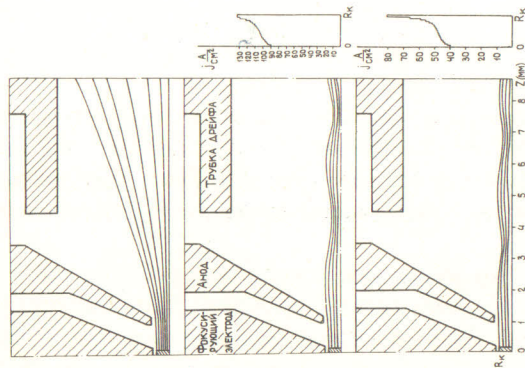


Рис. 3.

Расчетные траектории и профиль электронного пучка в электронной пушке "Крион-2"

- 1)  $I = 574$  мА,  $U_k = -5$  кВ,  $V=0$
- 2)  $I = 574$  мА,  $U_k = -5$  кВ
- 3)  $I = 278$  мА,  $U_k = -3$  кВ,  $U_a = -5$  кВ.

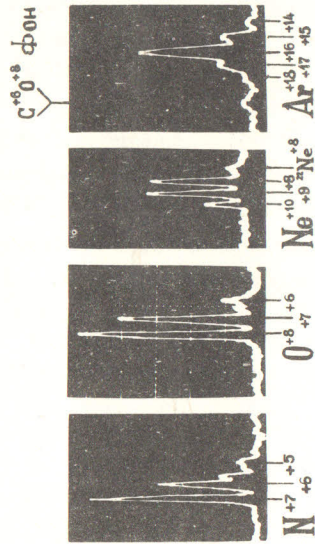


Рис. 4.

Спектры зарядностей пучков ионов, полученных в электронно-лучевом источнике "Крион-2".

Результаты расчётов по программе "КСИ - БЭСМ-6" /25/ хорошо совпадают с экспериментом и дают неоднородное распределение плотности тока по радиусу пучка. Для устранения неоднородности разработана серия электронных пушек с "теневой" сеткой и сеткой в аноде, среди которых электронная пушка с профилированным катодом обладает хорошей надежностью и даёт эффект ( $d = 1,1$  мм,  $P = 11,4$  мкА/В<sup>3/2</sup>).

Электронная пушка использовалась при ионизации углерода, азота, аргона и ксенона в электронно-лучевом источнике "Крион-1" /15, 16, 26, 6/.

В третьей главе представлены результаты экспериментов по получению МЗИ в электронном пучке "Крион-2". Цель экспериментов:

- 1) исследование режимов работы ионной ловушки, образованной объемным зарядом электронного пучка в зависимости от различных параметров ЭОС;
- 2) изучение кинетики образования МЗИ азота, кислорода, неона и аргона для различных значений фактора ионизации и параметров ЭОС.

Методика экспериментов заключалась в измерениях спектрального состава ионов и их общего количества в зависимости от времени удержания и параметров ЭОС.

Важнейшей закономерностью является присутствие некоторой скорости потерь ионов из ловушки, растущей с ростом тока и первеанса. Экспериментально показано, что на процессы удержания ионов в ловушке влияют:

- а) величина потенциала анода электронной пушки, что может быть объяснено качеством формирования электронного пучка;
- б) величина обратного потока электронов, т.е. возможна неустойчивость, для которой обратный поток является положительной обратной связью;
- в) вакуум в области анода электронной пушки, т.е. возможно возникновение электрон-ионных неустойчивостей в слабом магнитном поле;
- г) градиент потенциала в переходной области, что также, возможно, связано с электрон-ионными неустойчивостями.

Экспериментально подобраны параметры ЭОС:  $j \approx 150$  А/см<sup>2</sup>;  $U \approx 5$  кВ;  $I \approx 100$  мА, время удержания  $\tau = 100$  мс, при которых сохраняется 20-25%-ная степень компенсации. При  $j \approx 120$  А/см<sup>2</sup>,  $I \approx 130$  мА,  $U = 7$  кВ и  $\tau = 500$  мс удерживается 6-10%-ная степень

компенсации ионами  $Ar$ . Спектральный состав представлен на рис.4. Наблюдается отсутствие фона до 100 мс удержания. Фон заметен при 500 мс удержания (ядра  $C^{+6,0+8}$ ). Вакуум  $\sim 10^{-12}$  Тор (по уровню фона). Эффективность использования ионной ловушки для ядер  $N^{+7}$  в ЭОС "Крион-2"  $\sim 12\%$  при интенсивности  $\sim 10^8$  ядер/имп.

По экспериментально измеренному спектральному составу ионов построены картины спектральных эволюций в зависимости от экспериментально измеряемой величины количества электричества, прошедшего через мишень -  $qe$ . Спектральный состав  $P_i$  в каждом измерении нормирован на 1 (рис.6).

Картины спектральных эволюций несут информацию не только о фундаментальных процессах ионизации электронным ударом, но и о поведении ионов в ионной ловушке. Поэтому методика обработки экспериментальной информации является одной из важнейших проблем, требующих решения при разработке электронно-лучевого источника МЭИ. Тем более, что в экспериментах обнаружено неоднозначное соответствие экспериментально измеряемой величины -  $qe$  (произведение измеряемых времени удержания и среднего тока) и реального фактора ионизации.

В четвертой главе изложена методика и определены сечения ионизации электронным ударом по измеренным эволюциям спектров зарядностей. Измерения сечений методом ионной ловушки выполнялись и ранее при весьма приближенных предположениях [16,27]. Нами предлагается следующая методика:

1. Строится модель ионизации, учитывающая поведение иона в ионной ловушке.

2. Решается обратная задача соответствующей модели ионизации, находится наиболее точная модель, делаются выводы о факторе ионизации и поведении ионов в ловушке.

3. По известным сечениям проводится калибровка относительных единиц и сечения ионизации пересчитываются в абсолютных единицах.

Модели ионизации должны учитывать как процессы последовательной одноэлектронной, так и многоэлектронной ионизации [10]. В ионной ловушке с дозированной инъекцией процесс ионизации описывается системой нелинейных уравнений. Решение обратной задачи ионизации произведено по программе "CHARGE", написанной Б.Ш.Бочевым и основанной на программе "COMPILE" [27].

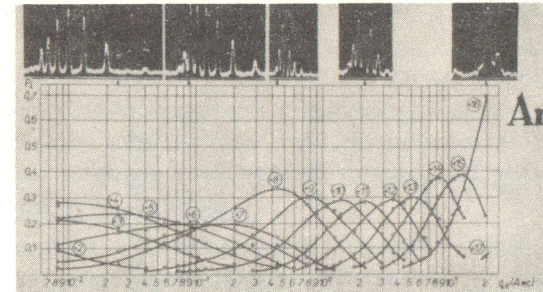


Рис.5. Экспериментальная картина эволюции спектра зарядностей ионов аргона.

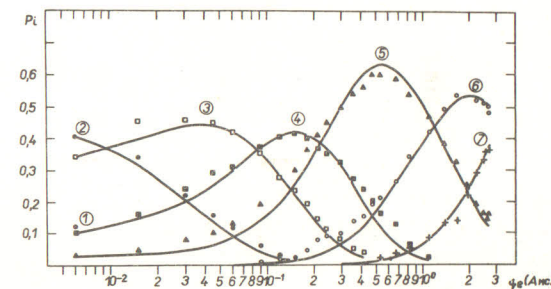


Рис.6. Пример воспроизведения экспериментальной картины эволюции спектра зарядностей ионов азота по результатам решения обратной задачи ионизации (непрерывные кривые).



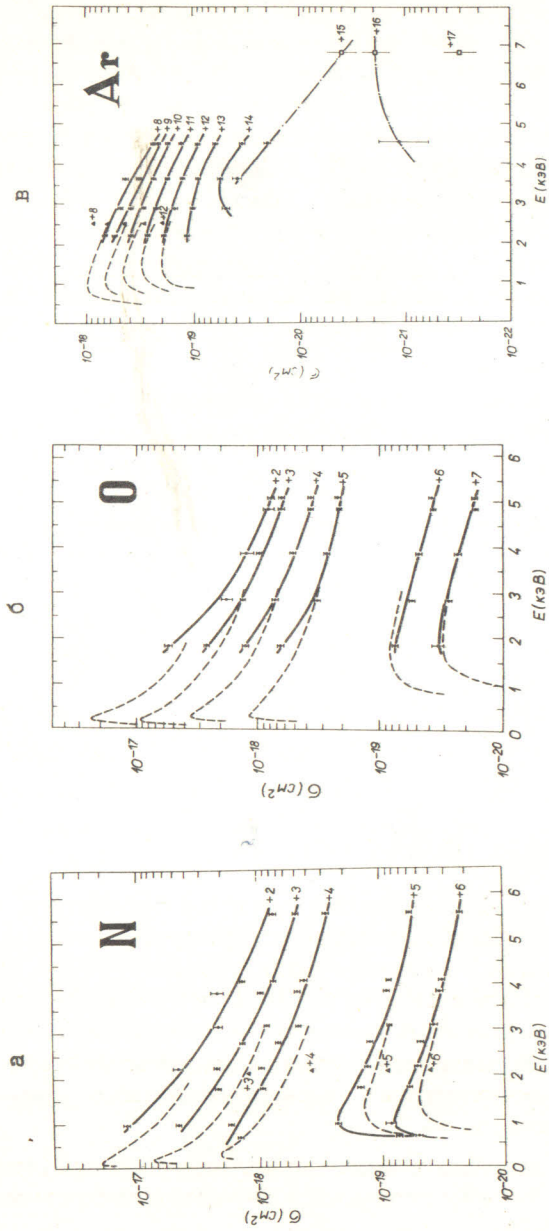


Рис. 7. Энергетические зависимости сечений последовательной ионизации

а) — ионы азота;  
 б) — ионы кислорода;  
 в) — ионы аргона  
 (пунктирные кривые — результаты расчетов А. Салопы)<sup>/30/</sup>.

Результаты решения обратной задачи ионизации в модели последовательной ионизации для L-, K-оболочек N, O, Ar (величина нормированного  $\chi^2 = 10^{-3}$ ) свидетельствуют о высокой точности решения (рис. 6). Решение с подобной точностью нельзя найти для M-оболочки Ar, где предсказывается <sup>/28/</sup> и обнаруживается экспериментально <sup>/26/</sup> многоэлектронная ионизация. Таким образом, процессы ионизации в "Крион-2" с хорошей точностью аппроксимируются моделью последовательной ионизации с линейным во времени фактором ионизации, и естественно предположить, что регистрируемые ионы основное время находятся в объеме электронного пучка, т.е. время ионизации эквивалентно времени удержания.

Учитывая это заключение и результат сравнения с единственной имеющейся в настоящее время калибровочной точкой (сечение  $\Sigma_2$  перехода  $N^{+2} \rightarrow N^{+3}$  при энергии  $\sim 1$  кэВ) <sup>/29/</sup>, мы определяем фактор ионизации как произведение времени удержания на плотность электронного пучка. Полученные энергетические зависимости сечений последовательной ионизации L- и K-оболочек ионов N, O, Ar хорошо совпадают с расчётами А. Салопы <sup>/30/</sup> по теории двойных соударений (рис. 7). Результаты измерений на источнике ионов "Крион-1" нанесены — "▲". Получены оценки сечений ионизации для ионов при энергии  $\sim 2,5$  кэВ.

Фактор ионизации, достигнутый на электронно-лучевом источнике "Крион-2", достаточен для получения в настоящее время ионов  $K^{+29}$ ,  $He^{+40}$ ,  $U^{+55}$ .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Создана ЭОС со сверхпроводящей магнитной фокусирующей системой напряженностью  $\sim 25$  кЭ, позволяющая формировать магнитоограниченные протяженные (отношение длины к диаметру  $\sim 4 \cdot 10^3$ ) электронные пучки с плотностью тока до  $700 \text{ A/cm}^2$  и энергией до 7 кэВ при токе  $\sim 0,5 \text{ A}$ .

Разработана серия электронных пушек, формирующих магнитоограниченные аксиально-симметричные электронные пучки с первеансом  $10 + 12 \text{ мкВ/V}^{3/2}$  и током  $\sim 2,5 \text{ A}$ .

2. Исследованы процессы в криогенно-магнитной системе, которая находится в вакууме и термостатируется с помощью теплового моста с

ванной жидкого гелия, при изменениях тока. Экспериментально оценены тепловыделения в обмотке и теплопроводность контактов "медь-медь" при гелиевой температуре.

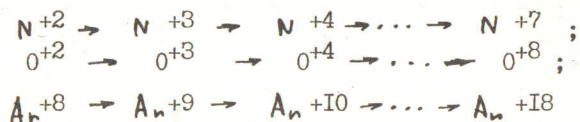
Обнаружены причины, приводящие к деградации соленоида при контактно-механическом методе термостабилизации.

3. Экспериментально исследована эффективность удержания ионов в ионной ловушке, образованной объемным зарядом магнитосжатого электронного пучка в зависимости от ряда параметров.

Найдены параметры ЭОС:  $I \approx 100$  мА;  $U \approx 5$  кВ;  $j \approx 150$  А/см<sup>2</sup>, при которых в течение времени удержания  $\tau \approx 100$  мс сохраняется 20-25%-ная степень компенсации, впервые из ионного источника получены пучки ядер кислорода и неона с интенсивностью  $10^8$  ядер/имп.

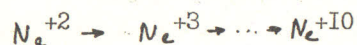
4. Впервые в электронно-лучевом ионном источнике реализован фактор ионизации, равный  $\sim 3 \cdot 10^{20}$  см<sup>-2</sup>, и получены полностью лишённые электронов ядра аргона ( $Ar^{+18}$ ).

5. С использованием метода ионной ловушки в ЭОС "Крион-2" впервые измерены величины и энергетические зависимости сечений последовательной одноэлектронной ионизации электронным ударом в цепочках



в диапазоне энергий 1-7 кэВ.

Сделаны оценки сечений последовательной ионизации электронным ударом в ионизационной цепочке



для энергии  $\sim 2,5$  кэВ.

В результате обработки экспериментальных данных с использованием программы решения обратной задачи ионизации показано, что в данном интервале энергий основным ионизационным процессом для L- и K-оболочек азота, кислорода и аргона является процесс последовательной ионизации электронным ударом. Полученные данные

подтверждают сделанные ранее выводы о процессе ионизации для азота и аргона при фиксированной энергии /16,17/.

Процессы ионизации в M-оболочке  $Ar^{+8}$  не могут быть описаны моделью последовательной одноэлектронной ионизации в данном диапазоне энергий, что подтверждает результаты работы /17/ для энергии 2,5 кэВ.

Измеренные энергетические зависимости сечений последовательной ионизации электронным ударом хорошо совпадают с расчётами по теории двойных соударений (BEA - theory). Зависимость измеренных сечений ионизации и величины сечений в каждой оболочке не могут быть описаны формулой Лотца с точностью, подобной точности совпадения с расчётами по теории двойных соударений для диапазона энергий 1 - 7 кэВ.

## ЛИТЕРАТУРА

### Работы, положенные в основу диссертации

1. Е. Д. Донец, В. П. Овсянников. ОИЯИ, Р7-9799, Дубна (1976)
2. Е. Д. Донец, В. П. Овсянников. ОИЯИ, Р7-10438, Дубна (1977).
3. Е. Д. Донец, В. П. Овсянников. ОИЯИ, Р7-10780, Дубна (1977).
4. В. П. Овсянников. ОИЯИ, 13-9597, Дубна (1976).
5. В. П. Овсянников. ОИЯИ, 13-9584, Дубна (1976)
6. Е. Д. Донец, В. И. Илющенко, А. И. Пикин, В. П. Овсянников. У Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. М., Наука, (1974).

### Цитированные работы

7. А. М. Балдин. ЭЧАЯ, т. 8, В. 3, 429, (1977)
8. Г. Н. Флеров. Международная конференция по физике тяжелых ионов, 43. ОИЯИ, Д7-5769, Дубна (1971).
9. Е. Д. Донец, В. И. Илющенко, В. А. Альперт. ОИЯИ, Р7-4124, Дубна (1968).
10. G. H. Dunn, IEEE Trans. on Nuclear Science, N9-24, 2, 929 (1976)
11. В. П. Вадеев, Е. Д. Донец, В. Г. Дудников, Л. П. Зиновьев, А. И. Пикин. ОИЯИ, Р7-10823, Дубна (1977).

12. Е.Д.Донец.АС № 248809.Бюлл.ОИПОТЗ, № 24 (1969)
13. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-4469, Дубна (1969).
14. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, Е.Д.Воробьев, А.И.Пикин.  
Международная конференция по физике тяжелых ионов, 621, ОИЯИ,  
Д-5769, Дубна, (1971).
15. Е.Д.Донец, А.И.Пикин. ЖТФ, 45, 2373 (1975).
16. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко. ОИЯИ, Р7-8310, Дубна (1974).
17. Е.Д.Донец. Труды пятого всесоюзного совещания по ускорителям  
заряженных частиц, I, 346, "Наука", Москва (1977).
18. J.Arianer and G.Goldstein. Int. Conf. on Heavy Ion Sources,  
Gutlinburg, (1975). IEEE Trans. on Nuclear Sci. vol. NS-23,  
No.2 (1976) p. 579.
19. R.W.Hamm et al. IEEE Trans. Nucl. Sci.; NS-23, No.2 (1976) p.1013.
20. R.Becken, H.Klein; IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-23, No.2 (1976) p.1017
21. А.П.Бонч-Осмоловский. ОИЯИ, Р9-8379, Дубна (1974).
22. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки.  
М., Сов. радио, (1966).
23. В.Г.Аксенов, Е.Д.Донец и др. ОИЯИ, Р9-8563, Дубна (1975).
24. В.А.Альтов, Б.В.Зенкевич и др. Стабилизация сверхпроводящих  
магнитных систем. М., Энергия, (1975).
25. Блейвас И.М., Годубцов Б.И. и др. Сб. "Методы расчёта  
электронно-оптических систем", ч. I. Новосибирск, ВЦ СО АН  
СССР (1973).
26. Е.Д.Донец, А.И.Пикин. ЖЭТФ, т. 70, 2025 (1976).
27. Л.Александров. ОИЯИ, Р5-7259, Дубна (1973).
28. A.Salop. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-23, 975 (1976).
29. K.L.Aitken, M.F.A.Harrison, R.D.Rundel. J.Phys.B,  
4, 1189 (1971).
30. A.Salop. Phys.Rev. A14, 2095 (1976).

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 января 1978 года.