



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-96-57

0-345

На правах рукописи
УДК 621.384.6
+539.1.076

ОВСЯННИКОВ
Владимир Петрович

ТЕХНИКА И ПРИМЕНЕНИЕ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Специальность: 01.04.13 — электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор ДЮБУА
Борис Чеславович

доктор технических наук старший научный сотрудник КОЗЛОВ
Святослав Иванович

доктор технических наук профессор ЗАЙЦЕВ
Лев Николаевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт теоретической и экспериментальной физики (Москва)

Защита диссертации состоится “___” _____ 1996 года в “___” часов на заседании диссертационного совета Д-047.01.02 в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” _____ 1996 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

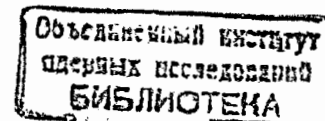
доктор физико-математических наук, профессор

М.В. Лихачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы: Пучки многозарядных ионов в широчайшем диапазоне энергий, от нескольких электроновольт до сотен ГэВ на нуклон, и столь же широким диапазоне интенсивностей, от единичных частиц до токов в десятки миллиампер, являются основой исследований в атомной физике, физике твердого тела и физике поверхности, ядерной и релятивистской ядерной физике. Увеличение заряда ионов открывают новые возможности в этих областях науки и техники. Поэтому, разработки и исследования новых типов источников многозарядных ионов, ECR - на основе электронного циклотронного резонанса, лазерного - на основе высокотемпературной плазмы, образованной лазерным излучением, и электронно - лучевого (EBIS - Electron Beam Ion Source); использующего ионную ловушку, образованную объемным зарядом плотного электронного пучка, - оформились, начиная с середины 60 - х годов, в отдельное направление в мировой науке и остаются актуальными до сих пор.

Электронно - лучевой метод ионизации, предложенный Е. Д. Донцом в 1967 году, был успешно реализован в ионизаторах “Крион - 1” и “Крион - 2” в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований к 1980 году. Однако, физико - технические возможности электронно - лучевых ионизаторов были исследованы далеко не полностью. Это послужило причиной того, что с середины 80 - х годов электронно - лучевой метод ионизации начал интенсивно разрабатываться во Франции - ионизаторы CRYEBIS-II, DIONE, как источники ионов для ускорителя SATURNE; в Швеции - CRYISIS - для накопителя CRYRING. В тоже время разрабатываются криогенные электронно - лучевые источники как для исследований самого метода получения многозарядных ионов в ионной ловушке, так и для атомной физики в ФРГ, - FrankfurtEBIS, в США, - KSUEBIS, CornellEBIS; и т. д. В этот период времени начат проект крупнейшего ионизатора такого типа SuperEBIS (SLNL, Sandia, USA), В лаборатории имени Лоуренса разрабатывается, оказавшееся очень успешным и предназначенное для исследований в области атомной физики и физики поверхности, направление установок типа EBIT (LLNL, Livermore, USA), представляющее собой модификацию электронно - лучевого метода ионизации. В 1994 году на ионизаторе SuperEBIT были зарегистрированы ионы U^{92+} .



Исследовательская программа "Крион - С", индекс "с" - означал стендовый вариант ионизатора, была начата в 1985 году в ЛВЭ ОИЯИ. Целью программы была разработка прототипа ионного источника для создаваемого в лаборатории ускорительного комплекса релятивистских ионов, на основе сверхпроводящего синхротрона "НУКЛОТРОН". Актуальность и современность этой задачи следует подчеркнуть ссылкой на ускорение в конце 1993 года в CERN ядер свинца Pb^{82+} до энергий 150 ГэВ / нуклон с интенсивностью $4 \cdot 10^8$ ионов в импульсе.

Цель диссертации: создание электронно - лучевого ионизатора, как прототипа ионного источника ускорительного комплекса "НУКЛОТРОН", позволяющего провести экспериментальную проверку технических решений на основе изучения физических процессов в ионной ловушке и работы электронно - лучевого ионного источника в составе инжекционного комплекса.

Научная новизна отражена в следующих тезисах:

- создан электронно - лучевой ионный источник, имеющий оригинальную модульную конструкцию, позволяющую исследовать различные электронно - оптические системы;
- впервые, получен электронный пучок в постоянном режиме с током 0.2А - 0.5А и энергией 4 - 100 кэВ с плотностью мощности 10^7 Вт / $см^2$ в криогенной системе, практически без нагрева последней, тем самым достигнуты параметры установки SuperEBIS;
- изучены процессы многократной ионизации в таких электронных пучках в условиях ионного охлаждения остаточным газом;
- впервые, экспериментально получены эволюции спектров зарядностей ионов Ag^{8+} - Ag^{16+} при энергии ионизирующих электронов до 30 кэВ, время пролетным методом;
- впервые, создан стенд электронно - лучевого ионизатора "Крион - С" на высоковольтной платформе электростатического форинжектора линейного ускорителя ЛУ - 20, позволяющего получать в этих условиях электронные пучки с током 0.25А и энергией 4 - 40 кэВ;
- изучена работа ускорительного комплекса в составе: электронно - лучевой ионизатор - линейный ускоритель - обдирочная углеродная фольга;

- получены и ускорены до энергии 5 МэВ / нуклон пучки ионов Si^{14+} , Ar^{14+} , ... Ar^{17+} , Kr^{29+} , ... Kr^{34+} с интенсивностью 10^8 - $5 \cdot 10^9$ элементарных зарядов в импульсе, тем самым достигнут фактор ионизации $2 \cdot 10^{21}$ $см^{-2}$ на форинжекторе линейного ускорителя;
- экспериментально изучены спектры многозарядных ионов серы, аргона и криптона после прохождения углеродной обдирочной фольги с энергией 5 МэВ / нуклон, хорошо совпадающие с теоретическими предсказаниями.

Практическая ценность работы заключается прежде всего в том, что:

- создан электронно - лучевой ионизатор "Крион - С" как прототип ионного источника ускорителя "НУКЛОТРОН"; ионизатор в совокупности с системами питания, управления и диагностики работает в составе инжекционного комплекса ЛВЭ; время безотказной работы источника превысило 72 часа; проведено пять сеансов ускорения тяжелых ионов; в настоящее время это второй работающий в составе ускорительного комплекса криогенный электронно - лучевой ионный источник, кроме ионизатора "DIONE" (Франция).
- пучки ионов Si^{14+} применены при ускорении ядер серы на Синхрофазотроне ЛВЭ до энергии 3.7 ГэВ / нуклон для экспериментов в области релятивистской ядерной физики;
- пучки ионов Kr^{29+} и Kr^{34+} применены при экспериментальной инжекции в "НУКЛОТРОН";
- пучки ионов Ar^{14+} с энергией 5 МэВ / нуклон использованы для экспериментов по производству политрековых мембран;
- разработана технология создания электронно - лучевых ионизаторов типа "Крион - С".

Апробация работы и публикации. Основные результаты и выводы, включенные в диссертацию обсуждались на научных семинарах и конференциях:

- XI - Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 1989;
- IV - ая Международная конференция по ионным источникам, Бинсхеим, Германия, 1991;
- Международная конференция по ионной имплантации, Люблин, Польша, 1988;

- форинжектора - Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Москва, СССР, 1990;
 - V - Международный симпозиум по электронно - лучевым ионным источникам и их применениям, Дубна, СССР, 1991;
 - V - Международная конференция по ионным источникам, Пекин, КНР, 1993;
 - форинжектора - Международный симпозиум по электронно - лучевым ионным источникам и их применениям, Стокгольм, Швеция, 1994;
 - LINAC94, Международная конференция по линейным ускорителям, Цукуба, Япония, 1994;
 - VI - Международная конференция по ионным источникам, Вислер, Канада, 1995.
- Основные результаты диссертации опубликованы в работах, список которых приведен в конце реферата.

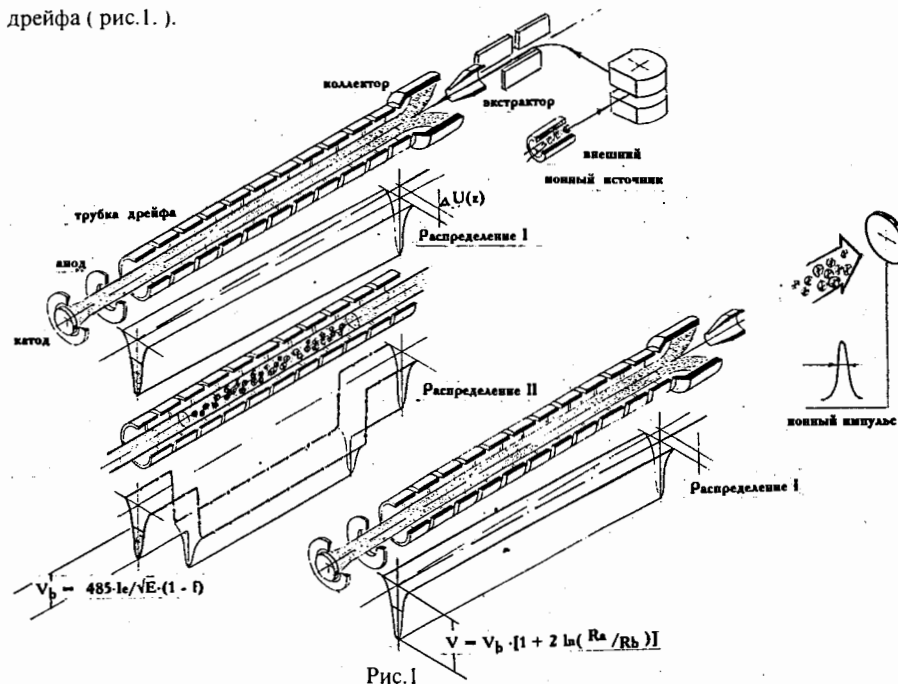
СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении прослежены тенденции развития источников многозарядных ионов от ионизатора с осцилирующим разрядом - PIG IS (Phillips ionizing gauge ion source), который можно считать прототипом электронно - лучевых ионных источников. Показана историческая ретроспектива развития EBIS и определены задачи для ионизатора "Крион - С".

В первой главе рассмотрена теория электронно - лучевых ионных источников, которая состоит из теории многократной ионизации и накопления ионов в ионной ловушке и теории формирования аксиально - симметричных плотных электронных потоков. Если теория формирования электронных пучков хорошо развита для СВЧ приборов, то теория накопления ионов в ионной ловушке создана в последние годы в Дубне и, главным образом в Ливерморе. Эти теории основаны на уравнениях зарядового и энергетического баланса в ионной ловушке. Напомним, что двумерная потенциальная ионная ловушка, - основа электронно - лучевого метода ионизации, образована объемным зарядом электронного пучка, который удерживает ионы в

радиальном направлении и потенциальными барьерами на оконечных секциях трубки дрейфа (рис.1.).



Суть электронно - лучевого метода ионизации заключается в управлении ионами, захваченными в ионную ловушку и подвергающимися ионизации электронным ударом, при помощи различных распределений потенциалов на секциях дрейфовой трубки. Последовательность таких распределений создает цикл работы источника. Основное распределение потенциалов таково, что все ионы, образованные в электронном пучке покидают его вдоль оси источника (рис. 1а). В момент времени t_0 - создается конфигурация потенциальной ионной ловушки (рис. 1б), в которую тем или иным способом вводится некоторое количество низкозарядных ионов. Введенные в ионную ловушку ионы удерживаются в ней некоторое время t_i - называемое временем ионизации, после чего восстанавливается основное распределение и многозарядные ионы покидают электронный пучок в виде ионного импульса. Время ионизации, в первом приближении, зависит от скорости компенсации объемного

заряда ионной ловушки однозарядными ионами остаточного газа. Число ионов с зарядом Z_i , выведенных из ловушки, определяется выражением

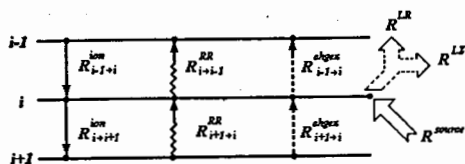
$$N_i = f \cdot \alpha(j_e t) PLV \cdot \frac{1}{Z_i}, \quad \text{где}$$

$f = \langle Z_i \rangle n_i / n_e$ - степень компенсации электронного пучка, $\alpha(j_e t)$ - относительное количество ионов с зарядом Z_i в спектре зарядностей, P - перванс электронного пучка, т. е. отношение тока пучка к напряжению в степени $3/2$, ($P = I_e / V^{3/2}$, мкА/В^{3/2}), L - длина ионной ловушки (М), V - напряжение электронного пучка (В).

Величина $j_e t$ или $n_e v_e t$ - фактор ионизации, определяющий спектр зарядностей ионов. Количество ионов с зарядом i определяется из уравнения зарядового баланса учитывающего равенство скоростей процессов ионизации электронным ударом и конкурирующих процессов. Наиболее полная модель рассмотрена в Ливерморе

$$\frac{dN_i}{dt} = R_{i-1 \rightarrow i}^{ion} - R_{i \rightarrow i+1}^{ion} + R_{i+1 \rightarrow i}^{RR} - R_{i \rightarrow i+1}^{RR} + R_{i+1 \rightarrow i}^{chex} - R_{i \rightarrow i+1}^{chex} - R_i^{ex} - R_i^{rad} + R_i^{unrec}$$

Графически



Скорость реакции ионизации - $R_{i-1 \rightarrow i}^{ion} = J_e \cdot N_i \cdot \sigma_{i-1 \rightarrow i}^{ion}(E_e) \cdot f(r_i, r_e)$, где J_e - плотность электронного пучка, N_i - количество ионов с зарядом i , $\sigma_{i-1 \rightarrow i}^{ion}(E_e)$ - сечение ионизации электронным ударом, зависящее от энергии электронов и рассчитанное по формуле Лотца, $f(r_i, r_e)$ - так называемый "overlap factor", учитывающий несовпадение радиальных размеров электронного и ионного пучков. Скорость процесса радиационной рекомбинации равна

$$R_{i \rightarrow i-1}^{RR} = J_e \cdot N_i \cdot \sigma_{i \rightarrow i-1}^{RR}(E_e) \cdot f(r_i, r_e), \quad \text{где}$$

$\sigma_{i \rightarrow i-1}^{RR}$ - сечение радиационной рекомбинации. Наиболее важная с нашей точки зрения скорость реакции перезарядки на нейтральном газе, очевидно равна

$$R_{i \rightarrow i-1}^{chex} = N_0 \cdot N_i \cdot \sigma_{i \rightarrow i-1}^{chex} \langle v_i \rangle, \quad \text{где}$$

N_0 - концентрация нейтральных атомов, $\sigma_{i \rightarrow i-1}^{chex}$ - сечение перезарядки иона с зарядом i на атоме остаточного газа, рассчитанное по формуле Мюллера - Зальцборна, $\langle v_i \rangle$ - средняя скорость столкновений. Считается, что распределение ионов по энергиям в центральном поле объемного заряда электронного пучка соответствует распределению Больцмана и, соответственно, усредненная скорость столкновений иона Z_i, M_i с температурой T_i для Максвелловского распределения по скоростям равна

$$\langle v_i \rangle = \sqrt{\frac{8kT_i}{\pi M_i}} = \sqrt{\frac{2Z_i V_b}{M_i}}, \quad \text{где}$$

V_b - потенциал на границе электронного пучка, отчитываемый от его центра

$$V_b = 485 \frac{I_e}{\sqrt{E_e}} \cdot (1-f) \quad (\text{В. А. кэВ});$$

I_e - ток пучка (А), E_e - энергия электронного пучка (кэВ), f - степень компенсации.

Мы упрощаем уравнение зарядового баланса, основываясь на результатах решения обратных задач ионизации, при определении сечений ионизации по экспериментальным эволюциям спектров зарядностей, полученных в условиях значительных потерь ионов из ионной ловушки в зависимости от времени ионизации [1,2]. Несмотря на это, достигнуто хорошее совпадение полученных значений сечений ионизации электронным ударом с теоретическими при нормировании количества многозарядных ионов в каждый момент времени на единицу. Это дает основания решать уравнение зарядового баланса без учета скорости потерь и скорости поступления ионов Z_i в ионную ловушку. Во - вторых, электронно - лучевой ионный источник проектируется для энергии электронов, при которой сечение ионизации иона с зарядом Z_i близко к максимальному, и следовательно, сечение процесса радиационной рекомбинации пренебрежимо мало.

Уравнение зарядового баланса приобретает вид, наиболее важный для практического проектирования ионного источника, учитывающий только перезарядку на атомах и ионах остаточного газа:

$$\frac{dN_i}{dt} = R_{i-1 \rightarrow i}^{ion} - R_{i \rightarrow i+1}^{ion} + R_{i-1 \rightarrow i}^{chex} - R_{i \rightarrow i-1}^{chex}$$

Результаты решения системы уравнений по такой модели ионизации для эволюции зарядовых состояний ионов аргона при различных концентрациях остаточного нейтрального газа представлены на рис. 2.

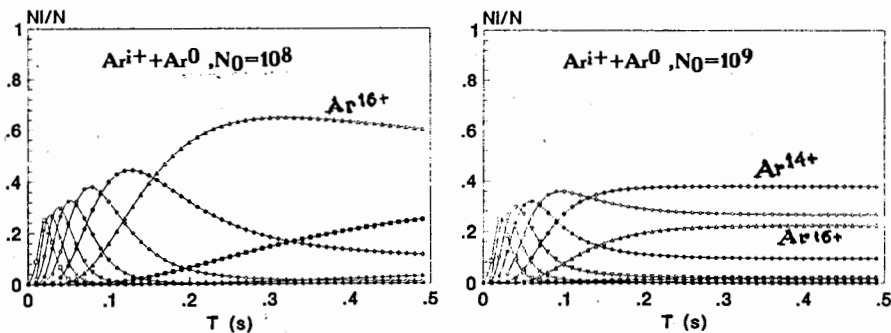


Рис.2

Из рассчитанных эволюций спектров зарядностей ионов Ar^{i+} следует, во-первых, что влияние перезарядки на эволюцию спектров зарядностей носит в зависимости от концентрации N_0 практически пороговый характер; второе - нейтральный газ с большим потенциалом ионизации валентного электрона позволяет работать электронно - лучевому ионизатору при больших давлениях остаточного газа, что естественно следует при применении формулы Мюллера - Зальцборна. Процесс перезарядки на многозарядных ионах, например Ne^{3+} , не влияет на эволюцию спектра зарядностей до весьма высоких концентраций относительно многозарядной примеси.

Решение уравнения зарядового баланса в модели последовательной ионизации для идеального без учета конкурирующих процессов хорошо известно и используется для оценки величины фактора ионизации и параметров электронно - оптической системы, - плотности тока, энергии электронов и времени ионизации необходимых, как минимум, для получения ионов с зарядом Z_i в максимуме спектра зарядностей (см. например, таблицы Р. Шмидера).

Для ионов захваченных в ионную ловушку, практически мгновенно, устанавливается распределение Больцмана по энергиям, следовательно, ион с зарядом Z_i и температурой T_i имеет свой характерный радиус колебания в электронном пучке, равный

$$r_i = r_0 e^{(1/2)kT_i/Z_i V_b}, T_i > Z_i V_b$$

Утверждается, что ионы с температурой $2Z_i V_b$ проводят только 37% своего времени в электронном пучке. Следовательно существует некая граничная энергия (температура) ионов равная или кратная $Z_i V_b$, зависящая от заряда, по достижении которой ион выпадает из процесса многократной ионизации.

Значительным потенциальным источником нагрева ионов могут быть плазменные и микроволновые неустойчивости в электронном пучке частично скомпенсированном ионами. Эта проблема требует отдельного и внимательного рассмотрения. Однако, и в отсутствие этих нестабильностей электрон - ионные эластичные столкновения приводят к нагреву ионов в ионной ловушке.

Скорость нарастания энергии иона с зарядом i в перпендикулярном электронному пучку направлении равна

$$\frac{dE_e}{dt} = \frac{0.442 i^2 J_e \ln(p_m / p_0) n_i}{A E_e} \quad (\text{эВ/сексм}^3), \text{ где}$$

A - масса иона в атомных единицах массы, i - заряд иона, J_e - плотность электронного пучка, $\ln(p_{max}/p_0)$ - кулоновский логарифм, равный 10 -15, n_i - объемная плотность ионов с зарядом i , E_e - энергия электронов (эВ). Для расчета полной энергии иона необходимо интегрировать это уравнение как функцию зарядового состояния, которая получается из уравнения зарядового баланса. Ион, достигший граничной

энергии за определенное время, покидает объем ионизации. Это время определяет максимально возможный фактор ионизации - J_i , и следовательно, максимально возможный заряд иона. Р. Беккер оценивает этот заряд $Z_i = +50$, М. Левин - соответственно, $Z_i = +39$, без диссипации энергии из ионной ловушки. Теория "испарительного охлаждения", предложенная в Дубне и значительно развитая в Ливерморе, позволяет объяснить экспериментальную ситуацию, при которой в электронно - лучевом ионизаторе получаются ионы большей зарядности. Ион - ионные столкновения, как наиболее быстрый процесс в ионной ловушке, приводят за времена порядка 1 мксек к установлению термодинамического равновесия для разных сортов ионов. Энергия, с которой ионы покидают ловушку, их температура "кипения", пропорциональна их заряду. Если мы имеем примесь низкозарядных ионов (LCI - low charge ions), то эти ионы первыми уходя из пучка, уносят энергию от высокозарядных ионов (HCI - high charge ions). Термин "низкозарядные ионы" тем не менее, означает, что их заряд может быть существенно больше единицы. Уравнение энергетического баланса имеет вид

$$\frac{d}{dt}(N_i k T_i) = \left\{ \frac{d}{dt}(N_i k T_i) \right\}^{E-NAGREV} + \left\{ \frac{d}{dt}(N_i k T_i) \right\}^{I-NAGREV} - \left\{ \frac{d}{dt}(N_i k T_i) \right\}_{R,Z-UHOD}^{OHL}$$

На основе уравнений зарядового и энергетического баланса в Ливерморе созданы численные модели по которым может быть оптимизирован электронно - лучевой ионный источник. Для экспериментальных оценок более удобна формула определяющая максимально возможный заряд иона, полученная М. Левином при условии, когда ионное охлаждение организовано наиболее простым образом, - в области ионной ловушки создается некая концентрация охлаждающего газа, ионизация которого постоянно поставляет низкозарядные ионы в электронный пучок.

$$i_{MAX}^{57} = 1 \times 10^3 \frac{g A^{1.5} V_w E_c i_{LCI}^2}{f \ln(P_{MAX} / P_0) V_b^{0.5}}, \text{ где}$$

$g = n_{i-1}/n_i$ - отношение концентраций предыдущей высокой зарядности к последующей, V_w - потенциал, при котором ионы покидают ловушку.

Оценки показывают, что оптимальным охлаждающим газом в схеме охлаждения с использованием остаточного газа является неон, из - за сравнительно высокого

потенциала ионизации валентного электрона которого, сечение перезарядки относительно мало, а охлаждение производится спектром зарядностей от Ne^{1+} - Ne^{10+} .

Итак, существующая теория получения многозарядных ионов электронно - лучевым методом рекомендует использовать систему ионного "испарительного" охлаждения. Тем не менее, основой получения многозарядных ионов в ионной ловушке остается электронный пучок.

Теория формирования электронных пучков была создана в 40 - 50 годах и за последние двадцать лет значительно обогатилась возможностями численного моделирования мощных электронных потоков. Эта теория приведена в той степени, которая необходима для обоснования системы фокусировки электронных пучков в криогенных электронно - лучевых ионных источниках, использующих сверхпроводящие магнитные фокусирующие системы. Основой теории фокусировки однородных аксиально - симметричных электронных пучков продольным магнитным полем является параксиальное уравнение. В этом приближении существует Бриллюэновская система фокусировки с магнитным полем на катоде равно нулю, когда некому значению фокусирующего магнитного поля, называемого в этом случае Бриллюэновским, (B_w) соответствует минимальный Бриллюэновский равновесный радиус электронного пучка с соответствующим напряжением $-V$. Электронная плотность в этом случае максимальна и равна $J_c^{Br} = 463 B_w^2 V^{1/2}$ (А/см², В, Т), соответственно $B_w = 0.147 J_c^{1/2} V^{-1/4}$. Бриллюэновская система фокусировки является очень привлекательной, т. к. позволяет достигать максимально возможную плотность тока для заданного фокусирующего магнитного поля, однако эти замечательные для электронно - лучевого метода значения плотности тока недостижимы по двум причинам. Первая из них связана с учетом тепловых скоростей на катоде. Поправку к Бриллюэновской теории дает теория Херрмана, вносящая поправку в значения

$$\text{равновесного радиуса } r_0 = a \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[1 + 4 \left(\frac{8kT_c r_c^2}{m\eta^2 B^2 r_c^4} + \frac{B_c^2 r_c^4}{B^2 a^4} \right) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \text{ где}$$

r_c , B_c , T_c - радиус, магнитное поле и температура катода, a - Бриллюэновский равновесный радиус, B - индукция фокусирующего магнитного поля, m - масса

электрона и $\eta = e/m$ для электрона. Основная проблема реализации Бриллюэновской системы фокусировки (с поправками Херрманна) связана с поведением электронного пучка в области неоднородного магнитного поля (переходной области) между катодом электронной пушки и регулярным фокусирующим магнитным полем. Актуальность решения такой проблемы особенно возрастает для сверхпроводящих магнитных фокусирующих систем с индукцией 1-6 Т, переходные области которых имеют особенно большую длину. Основной подход к решению этой проблемы был предложен Ж. Арианером при создании ионизатора CRYEBIS. Необходимая для Бриллюэновской фокусировки "ступенька" магнитного поля с длиной близкой к длине волны пульсаций создавалась в переходной области для значений магнитного поля < 3 кГс, т.е. в области хорошо освоенной в серийных приборах СВЧ, хорошо изученными методами. Электронный пучок вводился в эту область радиусом близким к Бриллюэновскому, дальнейшее сжатие электронного пучка производится в адiabатически нарастающем магнитном поле. Условие такой компрессии определено Р. Беккером

$$\frac{dB(T)}{dZ(sm)} = 7,9 \frac{P(A/V^{3/2})V^{1/2}}{r_c^2}, \text{ где } r_c - \text{ радиус кроссовера. Процесс компенсации}$$

ионами ионной ловушки в Бриллюэновском электронном пучке не однозначен. Согласно параксиальному уравнению, равновесному Бриллюэновскому радиусу соответствует динамическое равновесие фокусирующих и дефокусирующих сил. При компенсации ионной ловушки сила расталкивания, связанная с объемным зарядом электронов уменьшается на величину степени компенсации, динамическое равновесие нарушается, в результате чего электронный пучок сжимается за счет пульсаций направленных внутрь. Электронная плотность возрастает, - эффект "суперкомпрессии" экспериментально обнаруженный Ж.Арианером в 1980 году. К сожалению, можно предположить, что стабильная работа ионизатора при этом утрачивается, т. к. повторить эти результаты не удалось.

При разработке криогенных электронно - лучевых ионизаторов типа "Крион" нами рассмотрена система формирования с магнитным полем на катоде электронной пушки, настолько большим, что дальнейшее сжатие электронного пучка можно

рассматривать из условия сохранения магнитного потока через его сечение. Величина компрессии, оцениваемая в этом случае как

$$r_c = r_c \sqrt{\frac{B_c}{B}} \quad \text{или} \quad J_c = J_c \frac{B_c}{B}, \text{ ограничена значением регулярного магнитного}$$

поля в системе В и значением магнитного поля удерживающего электронный пучок в кроссовере. Для короткофокусных электронных пушек "Крион" без электростатической компрессии можно считать радиус катода равным радиусу кроссовера и можно оперировать термином магнитное поле на катоде электронной пушки - B_c . Мы измеряем магнитное поле на катоде в значениях эквивалентного для плотности эмиссии с катода и напряжения в электронной пушке Бриллюэновского магнитного поля - $B^{экв}$. Численное моделирование, проведенное И.И. Голеницим для различных значений регулярного фокусирующего магнитного поля показало, что значение магнитного поля на катоде $B_c = B^{экв}$ является предельным для такой системы формирования, после чего электронный пучок разваливается в нарастающем магнитном поле под действием объемного заряда и "магнитной пробки". Электронный пучок приемлемого качества можно получить при $B_c = 2B^{экв}$. Уменьшение этого соотношения приводит к росту эффективного диаметра электронного пучка за счет роста пульсаций, что было замечено на проводимых экспериментах.

В заключении первой главы рассмотрены возможности электронно - лучевых ионизаторов, в которых фокусировка электронного пучка осуществляется периодической магнитной фокусирующей системой на основе постоянных магнитов $SmCo_5$ и X - EBIS, предложенный Р. Беккером, с ионной ловушкой в области кроссовера электронного пучка при фокусировке электростатическими линзами.

Во второй главе рассмотрена техника криогенных электронно - лучевых источников многозарядных ионов, которая в значительной степени базируется на технике и технологии мощных СВЧ приборов с линейным электронным пучком. Особенностью существующих ионизаторов типа EBIS является применение сверхпроводящих магнитных фокусирующих систем. Криогенные электронно - лучевые ионизаторы представляют собой, по сути дела, электронно - оптическую систему, состоящую из элементов при различных температурах от 4.2К (ионная ловушка) до 300К (

электронная пушка, электронный коллектор). Проблема соосности оси магнитного поля и оси электронно - оптической системы, осложненная требованием низких теплопритоков к криогенным жидкостям, определяет принцип построения криогенных электронно - лучевых ионизаторов. По принципу построения существующие EBIS могут быть разделены на несколько групп. К первой, и исторически первой, относятся ионизатор типа "Крион - 1" и "Крион - 2", в которых базовым элементом конструкции выбран корпус сверхпроводящего соленоида. Электронная пушка и электронный коллектор устанавливаются с учетом возможных температурных деформаций при охлаждении системы. Конструкция вполне удовлетворительна для формирования магнито ограниченных электронных потоков с магнитным полем на катоде. Вторая группа ионизаторов создана на базе конструкции установки "CRYEBIS - 1". Это наиболее многочисленное семейство EBIS, к которому относятся практически все ионизаторы, созданные на Западе, - "CRYEBIS - 2", "CRYSIS", "DIONE", "KSUEBIS" и др. Главный магнитный экран таких установок, он же вакуумный корпус, к которому крепятся модули электронной пушки и электронного коллектора. Сверхпроводящий фокусирующий соленоид устанавливается на ось электронно - оптической системы посредством системы юстировочных узлов. Такая конструкция идеально решает проблему соосности, но технически сложна. К оригинальным конструкциям относятся установки "CEBIS" (Cornell EBIS) и "Крион - С". В ионизаторе "CEBIS" криогенно - магнитная и электронно - оптические системы совершенно разделены, это два различных вакуумных корпуса. Базой прибора служит оптическая скамья, относительно которой устанавливаются все элементы прибора. В противоположность этой, конструкция ионизатора "Крион - С" предполагает отсутствие каких либо юстировок. Соосность элементов электронно - оптической системы обеспечивается точностью изготовления, сборки и принципом конструкции [3]. Базовым элементом конструкции выбран корпус сверхпроводящего соленоида, к которому посредством специальных тепловых мостов, сохраняющих соосность системы после охлаждения до криогенных температур, крепятся блоки электронной пушки и электронного коллектора.

Криогенно - магнитные системы электронно - лучевых ионизаторов, построенных по проектам середины 80 - х годов, имеют максимальную индукцию 5 - 6 Т. Выбор

величины фокусирующего магнитного поля определяется выбором системы формирования электронного пучка. Магнитное поле с индукцией $> 1\text{T}$ достаточно для формирования потока Бриллюэна с плотностью $< 1000\text{ A/cm}^2$. Абсолютная величина магнитного поля не так важна как его градиент в переходной области. Требования к качеству магнитного поля высоки. Неоднородность азимутальной симметрии, т. е. изменения радиального поля при вращении на некоем радиусе, составляет менее 0.1%. Расчеты влияния радиальной неоднородности магнитного поля на траектории электронов затруднительны, т. к. требуют решения трехмерных задач. Некоторые оценки приведены в работе К. Амбосса.

Сверхпроводящие соленоиды большинства EBIS изготавливались специализированными фирмами. Для ионизаторов типа "Крион" нами разработана оригинальная технология изготовления сверхпроводящих соленоидов в которой решена проблема перехода со слоя на слой.

Теория и технология электронных пушек - это еще одна область привлеченная к технике электронно - лучевых ионных источников. В EBIS применяются в основном, электронные пушки, разработанные известными фирмами, как например, HIGHES type HB - 112, в ионизаторе "CEBIS" и т. д. Электронные пушки Пирса с высокоэффективными катодами, практически без электростатической компрессии, могут решить задачу формирования плотного электронного пучка наиболее простым способом, - магнитной компрессией в сильных магнитных полях сверхпроводящих соленоидов. Для электронной пушки "Крион - С" нами выбран металлосплавной катод и унифицированный катодно - подогревной узел разработанные О.К. Култашевым в ГНПП "ИСТОК". Катодно - подогревной узел, позволяющий использовать катоды различного диаметра от 0.4 мм до 5 мм и определил модульную конструкцию электронной пушки. Электронная пушка состоит из набора оригинальных модулей; катодных узлов, фокусирующих электродов, анодов и керамического изолятора. Конструкция допускает возможность сборки электронной пушки в интересующей экспериментатора комбинации. Конфигурация электродов и геометрические размеры определялись по результатам моделирования. Модульная конструкция электронной пушки очень удобна для экспериментальной работы, и в значительной степени предопределила успех разработки ионизатора "Крион - С".

Дрейфовые структуры электронно - лучевых ионизаторов создаются с учетом геометрических размеров и материала пролетных трубок. Секционированная трубка дрейфа, в принципе, представляет собой периодическую структуру резонаторов, которые могут возбуждаться электронным пучком на соответствующих частотах. Вероятность такого процесса растет с ростом мощности электронного пучка. Рекомендации общего плана, такие как, уменьшение числа дрейфовых трубок, изучение волновых свойств структуры, изложены в работе Р.Беккера. Соотношение внутреннего диаметра дрейфовой трубки и диаметра электронного пучка важно по двум причинам. Во - первых, это соотношение определяет предельный первеанс электронно - оптической системы, во - вторых задает скорость диффузии молекул остаточного газа в область ионной ловушки между границей электронного пучка и стенкой дрейфовой трубки.

Электронный коллектор и вытягивающий электрод проектируются и изготавливаются по общепринятым правилам. В электронно - лучевых ионных источниках, как правило, применяются коллекторы, так называемого, закрытого типа, созданные для установок электронного охлаждения. Подавление потока электронов вторичной эмиссии производится комбинацией специального электрода, - "суппрессора" и "пробки" магнитного поля перед входом в коллектор. Подавлению вторичной эмиссии с внутренней поверхности электронного коллектора способствует и поле вытягивающего электрода, системный анализ формы и положения которого, приведен в работе Р.Беккера.

Форма и положение вытягивающего электрода ионизатора "Крион - С" близки к оптимальным, что явилось результатом экспериментальной отработки. Водоохлаждаемый электронный коллектор и вытягивающий электрод, впервые, выполнены в виде одного блока, что мы считаем наиболее оптимальной конструкцией.

Электронные пучки с энергией >100 кэВ вызывают интерес для получения ионов очень высокой зарядности (проект "SuperEBIS"). Получение таких электронных пучков в постоянном режиме с одним источником питания электронной пушки технически невозможно из - за большой мощности источника питания. Два источника питания, один из которых, относительно высоковольтный и слаботочный,

обеспечивает только ускорение электронного пучка в области ионной ловушки, а второй - поддерживает электронный пучок между катодом и электронным коллектором, решают эту проблему. Таким образом создаются два высоковольтных зазора, один ускоряющий а другой замедляющий электронный пучок. Возможны три варианта такой схемы. В первой, - положительный высоковольтный потенциал подается внутрь вакуумной камеры ионизатора, непосредственно на трубки дрейфа, которые образуют ионную ловушку. Такой вариант успешно реализован в установках LLNL EBIT, и планировался в проекте CEBIS - 2M. Тем не менее, такой способ получения электронного пучка высокой энергии имеет ограничения связанные с использованием криогенной техники. Поэтому, для энергий электронов > 30 кэВ мы рассматриваем другие схемы. Конструктивное решение ионизаторов выполненных по этим схемам одинаково. Электронная пушка и электронный коллектор изолированы от корпуса установки изоляторами. Высоковольтные зазоры формируются за анодом электронной пушки и перед электронным коллектором электродами, имеющими комнатную температуру. Такие высоковольтные зазоры хорошо изучены. Возможно ускорение электронного пучка положительным потенциалом на корпусе ионизатора. Альтернативный, третий, вариант заключается в подаче отрицательного высоковольтного потенциала на электронную пушку и электронный коллектор.

Сверхвысокий вакуум - обязательное условие получения многозарядных ионов электронно - лучевым методом. Техническое решение проблемы получения такого вакуума в ионной ловушке, представляющей собой длинную трубу малого диаметра, было найдено в 1971 году, когда Е.Д.Донцом были предложены криогенные электронно - лучевые ионизаторы. В таких установках основа получения сверхвысокого вакуума - криооткачка на криогенных поверхностях. В настоящее время только ионизаторы "Крион - С" и "Крион - 2M" имеют один вакуумный объем, эффективно откачиваемый криосистемой. Все остальные работающие источники "CRYSIS", "DIONE", "CEBIS", "KSUEBIS", и находящийся в стадии наладки "SuperEBIS", имеют несколько отдельных вакуумных объемов, откачиваемых сложными вакуумными системами. Появление водорода в составе остаточного газа (водородная проблема) является основной вакуумной трудностью в электронно - лучевых ионизаторах. Причина заключается в относительно высоком парциальном

давлении при температуре жидкого гелия и большом сечении перезарядки высокозарядных ионов на атомах водорода из - за низкого потенциала ионизации. Эксперименты на ионизаторе "Крион -С" показали, что после охлаждения криогенно - магнитной системы до гелиевой температуры спектр остаточного газа не содержит водород. При стандартном вакууме 10^{-8} Тор, измеренном при комнатной температуре, остаточный газ содержит 65% паров воды и 35% окиси углерода. В спектре присутствует не более 0.2% водорода. Производителями водорода являются электронный пучок, попадающий на дегазированные поверхности, высоковольтные пробои и электрические утечки по поверхности высоковольтных изоляторов. Методом решения "водородной проблемы" выбрано отепление криогенно - магнитной системы выше температуры конденсации водорода, при которой десорбированный водород откачивается предварительной системой откачки. Весь процесс очистки ионизатора от водорода занимает <4 часов. Это является неоспоримым преимуществом ионизаторов типа "Крион", обладающих малой массой криогенно - магнитной системы.

Итак, технические основы криогенных электронно - лучевых ионизаторов составляет комплекс достижений в криогенной технике, технике прецизионных сверхпроводящих соленоидов, технике и технологии формирования электронных пучков, электронных пушек, технологии катодных материалов, электронных коллекторов и технологии рекуперации энергии. Созданные с учетом вышеизложенного электро - вакуумные устройства служат основой для экспериментального изучения процессов многократной ионизации в ионной ловушке, образованной объемным зарядом электронного пучка, по сути дела для изучения кинетики заряженных частиц в искусственно создаваемой плазме.

Результаты экспериментов по получению многозарядных ионов электронно - лучевым методом рассматриваются на примере созданного ионизатора "Крион-С". В основе конструкции ионного источника лежит модульный принцип, как наиболее удовлетворяющий поставленной цели - экспериментальному исследованию различных систем формирования электронного пучка и различных элементов электронно - оптической системы, наиболее подходящих для получения многозарядных ионов электронно - лучевым методом. Установка "Крион - С"

состоит из трех независимых блоков (рис. 3) - криогенно - магнитной системы, модуля электронной пушки и модуля электронного коллектора с ионной оптикой.

Электронная пушка и электронный коллектор изолированы от корпуса установки при помощи проходных и внутренних изоляторов, выполненных из пластика, что оказалось вполне оправданным для криогенной установки.

Распределение магнитного поля на оси источника рассчитывалось и измерялось, впервые для ионизаторов типа "Крион" непосредственно в рабочих условиях в переходных областях [4,5]. Измерения показали высокую аксиальную симметрию магнитного поля и следовательно хорошее совпадение оси магнитной и электронно - оптической систем. Относительная неоднородность магнитного поля в области значений $>1T$ не превышает 10^{-3} .

Катод электронной пушки диаметром 1 мм в экспериментах устанавливался в магнитном поле 0.5 - 2 кГс. На расстоянии 16 мм от анода электронной пушки устанавливался высоковольтный анод, соединенный с корпусом установки, и имеющий температуру близкую к комнатной. Такая организация высоковольтных зазоров наиболее оптимальна в криогенных установках. Аналогичный высоковольтный зазор между аналогичными электродами, один из которых имел в проведенных исследованиях температуру 77К обладает меньшей электрической прочностью. Дрейфовая структура состоит из 26 трубок дрейфа с внутренним диаметром 5 мм. Секции 1,21, 22, 23 имеют азотную температуру (77К), секции 25,26 представляют собой миниатюрные эффузионные ячейки с температурой 200° - 300° С для ввода в электронный пучок молекул кадмия, висмута и урана из металлорганического соединения. Ионная потенциальная ловушка создается в области гелиевых трубок дрейфа (2 - 20, счет ведется по ходу электронного пучка) подачей положительных потенциалов на секции 2,3 и 19,20. Дополнительно в этих дрейфовых трубках установлены танталовые диафрагмы толщиной 0.02 мм и диаметром 2 мм.

В установке получен электронный ток 0.5А с энергией 4 - 80 кэВ в постоянном режиме. Экспериментально, впервые, показана возможность получения электронного пучка в постоянном режиме с плотностью мощности 10^7 Вт/ см² в протяженной дрейфовой структуре при температуре 4.2К практически без нагрева последней.

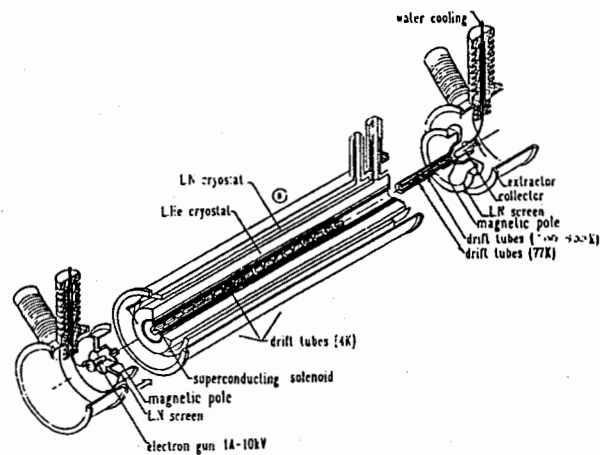


Рис. 3

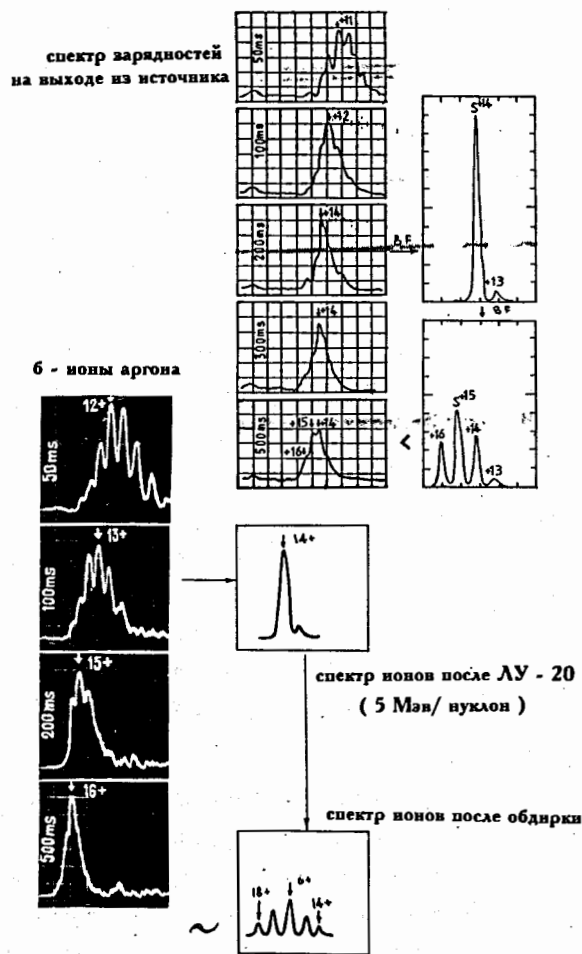
Отношение величины интегрального токооседания в системе к полному электронному току является критерием достижения рабочих условий в электронно - лучевом ионизаторе. Это отношение в среднем равно $10^{-3} - 10^{-4}$. Критериями качества электронного пучка служат и измерения температуры трубок дрейфа и измерения интегральных потерь мощности в гелиевой структуре по изменению скорости испарения жидкого гелия. Для электронного пучка с током 0.5A и напряжением 60 кВ, т. е. полной мощности 30 кВт эти потери измеряются величиной 0.03 - 0.05 Вт. С использованием этих критериев экспериментально исследована система формирования электронного пучка [6]. Удовлетворительный электронный пучок из пушки "Крион - С" с магнитным полем на катоде 1 кГс возможен только для электронного тока 100 мА. Дальнейший рост тока приводит к лавинообразному росту

токооседания в системе. Этот результат полностью совпадает с результатами численного моделирования и подтверждает выводы об ограниченности магнитной компрессии магнитоограниченного электронного пучка.

Рабочий цикл электронно - лучевого ионизатора в "Крион-С" осуществлен для электронных пучков от 0.09A / 4 кВ до 0.4A / 40 кВ. Малые токи и напряжения использованы только для определения базовых вакуумных условий в ионной ловушке. Экспериментально измеренная величина 10^{-12} Тор. Процесс получения многозарядных ионов в ионизаторе "Крион-С" характеризуется потерями ионов из ловушки, связанными с их нагревом за счет эластичных кулоновских столкновений. Особенностью ионизатора является то, что существует довольно значительный поток молекул рабочего газа из области ввода рабочего вещества в область ионизации между внутренней поверхности дрейфовой структуры (Φ 5 мм) и электронным пучком (Φ 0.3 мм) [7,8]. Это приводит к тому, что начиная с времени ионизации $t_i = 0.5$ сек процессы неорганизованного ионного охлаждения и процессы перезарядки на охлаждающем газе влияют на эволюцию спектра зарядностей. Очевидно, что в таких условиях в качестве охлаждающего газа выступает низкозарядная компонента рабочего газа. Для управления процессом охлаждения в этом случае и установлены танталовые диафрагмы в бартерные секции дрейфовой трубки, с диаметром меньшим чем регулярный. За время ионизации $t_i = 0.5$ сек получены пучки ядер аргона, при максимальной зарядности Ag^{16+} в спектре и пучки ядер серы. Впервые, время пролетным спектрометром измерена эволюция спектра зарядностей ионов Ag^{16+} в электронном пучке с энергией электронов 30 кэВ (рис. 4). Критерием того, что ионный источник существует является его способность служить инжектором ускорительного или технологического комплекса.

В третьей главе диссертации изложены результаты применения ионизатора "Крион С" на форинжекторе линейного ускорителя. Получение в 1968 году дейтронов на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ с энергией 5 ГэВ / нуклон положило начало релятивистской ядерной физике, направлению которое интенсивно развивается в крупнейших мировых ускорительных центрах. Ускорение тяжелых ионов осуществляется как непосредственно из ионных источников, производящих пучки ионов с фиксированным отношением заряда к массе, например, ускорение C^{6+} , N^{7+} ,

$08+$, Ne^{10+} от ионизатора "Крион-1", так и с использованием каскадного метода ускорения, в процессе которого ион изменяет свой заряд, проходя через ряд обдирочных станций. Последний метод получил наибольшее распространение.



Совершенно очевидно, что тип ионного источника определяет структуру ускорительного комплекса. Последовательность ионного источника и линейного ускорителя с обдирочной фольгой представляют собой два последовательных ионизатора с индивидуальными факторами ионизации. Линейный ускоритель с энергией более 4 МэВ/ нуклон и углеродной обдирочной фольгой обладает значительно большим фактором ионизации, чем, например, ECR - источник, при сохранении его интенсивности. Применение ионизатора "Крион-С" в каскадном методе ускорения с линейным ускорителем ЛУ - 20, ускоряющим ионы с $Z/A = 0.3-0.4$ до энергии 5 МэВ/нуклон, вполне оправдано для первых четырех периодов периодической таблицы до кальция включительно. Такой вывод следует из сравнения спектров зарядностей ионов таких элементов после обдирочной фольги и зарядовых спектров из электронно - лучевого ионизатора. На рис. 4 приведены

сравнительные спектры зарядностей ионов серы из ионизатора "Крион - С" и спектры ионов серы после углеродной обдирочной фольги при энергии 5 МэВ/нуклон. Спектр полученный после обдирочной фольги содержит более высокие зарядовые состояния, чем спектр зарядностей из ионного источника даже за 0.5 сек ионизации. Преимущества каскадного метода ускорения с линейным ускорителем ЛУ - 20 над прямым ускорением тяжелых ионов из ионизатора "Крион - С" практически исчезают для ионов аргона (рис. 4). В таком случае фактор ионизации источника "Крион - С", оцениваемый как величина $6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$, становится равным фактору ионизации, достигаемому в системе линейный ускоритель (5 МэВ/ нуклон) и обдирочная фольга. Ускорение же таких ионов, как ионы криптона Kr^{34+} ($I_i = 4.1 \text{ кВ}$), висмута Bi^{64+} ($I_i = 6.98 \text{ кВ}$) потребуют существенно большего фактора ионизации, чем $j_t = 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Такой ионизационной способностью в настоящее время обладают только электронно - лучевые ионные источники. Следовательно, применение электронно - лучевого ионизатора "Крион - С" для линейного ускорителя ЛУ - 20, настроенного на отношение $Z/A = 0.2-0.3$, может способствовать ускорению тяжелых ионов всех элементов периодической таблицы на ускорительном комплексе "НУКЛОТРОН".

Электростатический форинжектор линейного ускорителя ЛУ -20 представляет собой высоковольтную платформу с импульсным положительным напряжением до 700 кВ.

На этой платформе, впервые, воссоздана электрическая схема исследовательского стенда. Корпус ионизатора изолирован от главной высоковольтной платформы на напряжение $< +60$ кВ, образуя с частью управляющей аппаратуры дополнительный высоковольтный терминал. Это позволяет получать электронные пучки с энергией до 40 кэВ. Система управления и сбора информации использует волоконные оптические линии связи. Система защиты отключает электронный пучок и высоковольтные блоки питания при ухудшении вакуума до 10^{-7} Тор, возникновении вакуумной дуги, электрических пробоях и при переходе сверхпроводящего соленоида в нормальное состояние.

Электронно - лучевой ионизатор "Крион -С" устойчиво работает на высоковольтном терминале, обладая следующими параметрами:

- электронный ток - 0.2 - 0.25 А (постоянный режим)
- энергия электронов - 5 - 7.5 кВ
- плотность электронов - 200 - 250 А/ см²
- фактор ионизации - $2 \cdot 10^{20}$ - $2 \cdot 10^{21}$ см⁻²

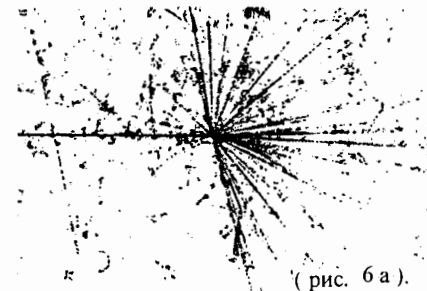
Время непрерывной работы комплекса, практически без отказов, превысило 72 часа. Время необходимое для выхода ионизатора на рабочий режим после сборки его на платформе форинжектора не превышает 24 часов.

Схема ускорительного комплекса тяжелых ионов Лаборатории высоких энергий представлена на рис. 5. От электронно - лучевого ионизатора по этой схеме ускорены ионы серы, аргона и криптона [9, 10, 11].

Ускорение ионов серы на Синхрофазотроне ЛВЭ осуществлено для продолжения серии исследований по изучению ядерных взаимодействий в диапазоне энергий 1 - 200 ГэВ/ нуклон. В качестве рабочего газа использовался сероводород. В качестве охлаждающего газа применялся тот же сероводород, проникновение которого в область ионной ловушки было значительным. Это позволило достичь 25 % степени компенсации ионной ловушки за время ионизации 0.2 сек. Ионный пучок из источника с интенсивностью $> 5 \cdot 10^9$ 1/Z состоял из ионов S¹⁴⁺ - 80%, S¹³⁺ - 15% и S¹²⁺ - 5%. Такой состав ионов S¹⁴⁺ в спектре зарядностей определялся выбором энергии электронов, недостаточной для эффективной ионизации К - оболочки ионов серы.

Спектр зарядностей, в этом случае, " сжимается" в одну линию, соответствующую иону с электронами только на К - оболочке. Ускоренный пучок после линейного ускорителя, настроенного на отношение $Z/A = 0.437$, состоящий из ионов S¹⁴⁺ - 98% и S¹³⁺ - 2%, проходил через обдирочную фольгу и трансформировался без потери интенсивности в ионный пучок из S¹⁶⁺ - 20%, S¹⁵⁺ - 45%, S¹⁴⁺ - 30% и S¹³⁺ - 5%. Только ядра серы вводились в вакуумную камеру Синхрофазотрона. Количество ядер серы, захваченных в β - тронный режим составило величину $3.7 \cdot 10^7$ 1/Z.

В результате экспериментов были облучены трековые пластиковые детекторы и получена новая информация о взаимодействии ядер с энергией 3.7 ГэВ/ нуклон (рис.6



(рис. 6 а).



Эксперименты с ионами Ag¹⁺ и Kr¹⁺ проводились с целью инъекции в камеру "НУКЛОТРОН"а и для прикладных исследований. В экспериментах было применено охлаждение рабочих ионов ионами неона, методика которого заключалась в том, что при помощи дополнительного натекавателя создавались криосорбированные слои неона на внутренней поверхности гелиевой дрейфовой структуры. Сорбированный газ создает над поверхностью известное давление, зависящее от температуры. Численное моделирование показывает, что оптимальной является температура дрейфовой структуры в области ионной ловушки 6К. Эксперименты показали высокую стабильность ионного импульса и увеличение выхода многозарядных ионов Kr³⁴⁺, в среднем в 2 - 3 раза при нагреве трубки дрейфа. Криосорбированный охлаждающий газ, естественно, вводится в ионную ловушку совместно с рабочим газом. Это создает некоторые удобства в настройке линейного ускорителя. Предложенная методика позволяет настраивать ускоритель на соответствующую зарядность сравнительно легких ионов охлаждающей примеси, получаемой за сравнительно малое время ионизации (например, Ne⁴⁺ за 50 мсек ионизации с $Z/A =$

0.4) с большой интенсивностью, а затем переходить к ускорению рабочих ионов (например, Kr^{34+} с близким отношением $Z/A = 0.404$) простым увеличением времени ионизации. Настройка ускорителя при этом сохраняется.

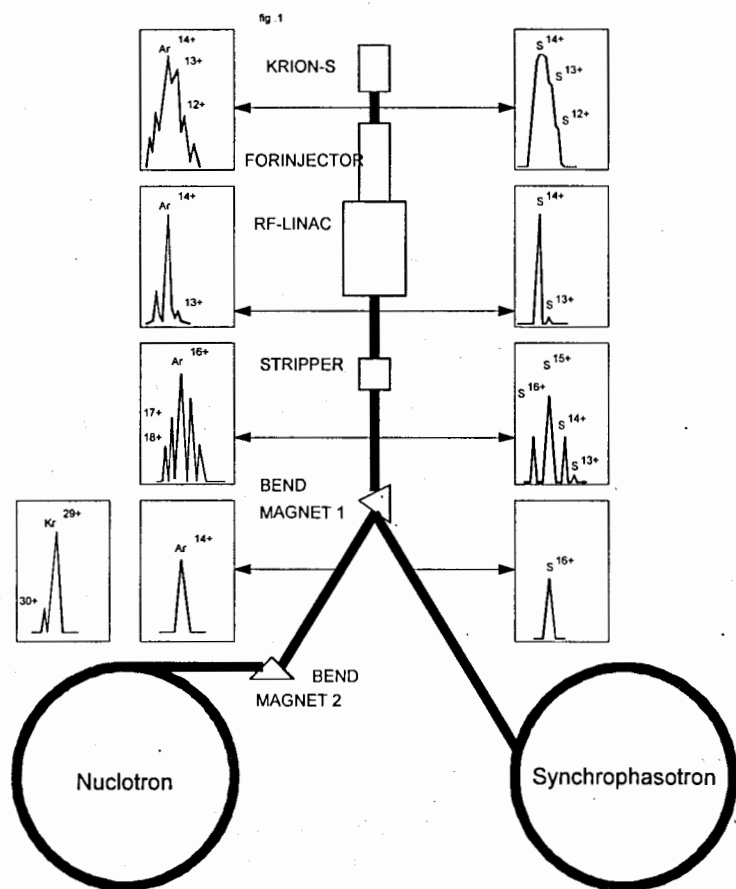


Рис. 5

Параметры полученных пучков многозарядных ионов серы, аргона и криптона приведены в таблице 1.

Таблица 1

Выход ионов из ионизатора (элементарных зарядов в импульсе)

S^{14+}	$5 \cdot 10^9$	Ar^{14+}	$3 \cdot 10^9$	Kr^{29+}	$5 \cdot 10^8$
		Ar^{15+}	$3 \cdot 10^9$	Kr^{30+}	$5 \cdot 10^8$
		Ar^{16+}	$1 \cdot 10^9$	Kr^{31+}	$4 \cdot 10^8$
		Ar^{17+}	$3 \cdot 10^8$	Kr^{32+}	$3 \cdot 10^8$
				Kr^{33+}	$2 \cdot 10^8$
				Kr^{34+}	$1 \cdot 10^8$

В проведенных экспериментах было продолжено изучение процессов ионизации многозарядных ионов при их прохождении через углеродную обдирочную фольгу. Измеренные спектры равновесных зарядовых распределений для ионов S, Ar и Kr при энергии 5 Мэв / нуклон хорошо совпадают с известными теоретическими и экспериментальными значениями. Рекордная зарядность ионов Kr^{34+} ($I_i = 4.1$ кВ, $Z/A = 0.404$) ускорена впервые. Следовательно, ускорительный комплекс "Крион - С" - ЛУ20 может быть использован для ускорения ионов с таким же или близким потенциалом ионизации, например Xe^{44+} ($I_i = 3.33$ кВ, $Z/A = 0.338$). Для получения необходимых линейному ускорителю ионов урана U^{74+} ($I_i = 9.7$ кВ, $Z/A = 0.31$) потребуется фактор ионизации $jt = 5 \cdot 10^{21}$ см⁻². Такой фактор ионизации может быть достигнут на источнике "Крион - С" простым увеличением времени ионизации до 8 секунд.

В процессе адаптации ионизатора "Крион - С" к ускорительному комплексу "НУКЛОТРОН" исследована методика сокращения длительности ионного импульса методом введения в рабочий цикл электронно-лучевого ионизатора дополнительного распределения потенциалов, формирующего "предстартовую" ионную ловушку с меньшей длиной. В проведенных предварительных экспериментах

получено сокращение длительности ионного импульса в два раза при сохранении ионного заряда. Предложенная методика позволяет также исследовать термодинамические процессы в ионной ловушке. Очевидно, что источник многозарядных ионов может быть основой технологического имплантатора. На рис. 6б показан скол политрековой мембраны полученной после облучения лавсановой пленки ионами Ar^{14+} с энергией 5 МэВ / нуклон. Электронно - лучевой ионный источник "Крион - С" может работать в составе коммерческого имплантатора при увеличении его интенсивности на два - три порядка. Таким образом по достигнутому фактору ионизации на терминале линейного ускорителя ионизатор "Крион - С" может считаться прототипом ионного источника для ускорительного комплекса "НУКЛОТРОН".

В заключении приводится сравнение, созданного электронно - лучевого источника "Крион - С" с другими типами источников многозарядных ионов, решающих аналогичную проблему, и обсуждается проблема увеличения интенсивности. Среди криогенных электронно - лучевых источников многозарядных ионов в качестве аналога мы можем взять только ионизатор "DIONE", работающий на форинжекторе ускорителя "SATURNE". Главные характеристики криогенных электронно - лучевых ионных источников "Крион - С" (+) и "DIONE" (o), - количество ионов с зарядом Z_i в зависимости от времени ионизации приведены на рис. 7а. Эта зависимость для различной плотности ионизирующих электронов носит в логарифмическом масштабе практически линейный характер. Можно предположить, что выход ионов с зарядом Z_i в зависимости от фактора ионизации в условиях слабого ионного охлаждения носит универсальный характер (рис. 7б). Точность этого предположения можно проверить после численного моделирования. Обоснованность такого предположения на первый взгляд очевидна, т. к. электронная плотность определяет как заряд иона так и его нагрев в ионной ловушке. По - видимому, плотность тока 200 - 500 А / см² является оптимальной в электронно - лучевых ионизаторах, предназначенных для ускорителей , работающих с частотой в 1 Гц. Падающая зависимость количества многозарядных ионов от их заряда (тоже самое, от фактора ионизации) характерна для всех типов источников

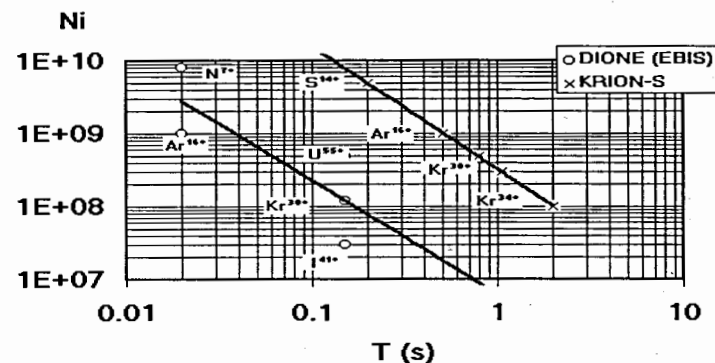


Рис.7а

тяжелых ионов. Например, максимально достигнутому в установке "SuperEBIT" фактору ионизации $jt = 10^{24} \text{ см}^{-2}$ соответствуют всего 10 ионов U^{92+} и порядка 500 частиц U^{91+} в импульсе. На рис. 7б приведено сравнение ионизатора "Крион - С" с источниками многозарядных ионов, работающими в импульсном режиме, а именно, лазерным и ECR в режиме "afterglow". В последних получен ток >80 емкА в импульсе длительностью 2 мсек для ионов Pb^{27+} ($I_i = 883 \text{ В}$), что эквивалентно ионам Ar^{15+} . Это означает, что фактор ионизации $jt = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ достигнут для объемного заряда ионов в 10^{12} элементарных зарядов.

Итак, электронно - лучевой ионизатор "Крион-С" имеет преимущества начиная с фактора ионизации $jt > 10^{21} \text{ см}^{-2}$, существенно уступая по интенсивности ECR (afterglow) источникам в диапазоне фактора ионизации $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-2}$. Причина этого заключена в разных объемах ионизации этих двух типов ионных источников. По числу ионов в плазме ECR - ионизаторы , приблизительно, на шесть порядков превосходят электронно - лучевые источники. Однако, по относительному выходу высокозарядных ионов, особенно тех, для получения которых требуется фактор ионизации $> 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$, электронно - лучевые ионизаторы в настоящее время остаются наиболее эффективными. Явно обозначена проблема увеличения емкости

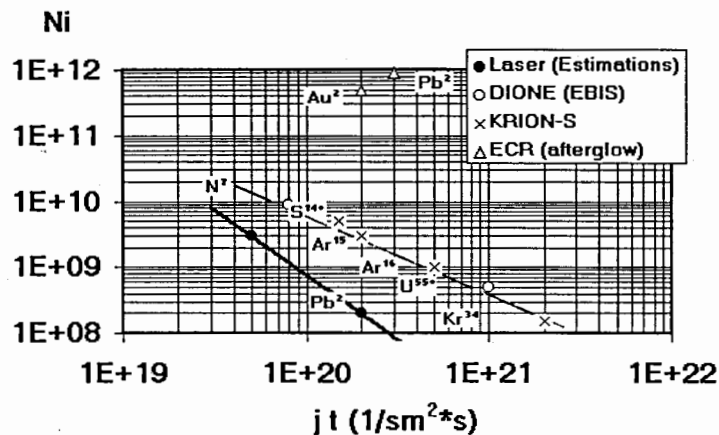


Рис.76

ионной ловушки в таких источниках для более широкого их применения в ускорительных комплексах. Особенно важной остается возможность использования электронно - лучевых ионизаторов для сверхпроводящих синхротронов (НУКЛОТРОН, RHIC, LHC), в которых из-за короткого времени инжекции преимущества ECR (afterglow) уменьшаются. Поэтому, проблема получения высокозарядных ионов с объемным зарядом 10^{12} элементарных зарядов в электронно - лучевых ионизаторах, декларированная еще в 1976 году, остается и в настоящее время актуальнейшей задачей. Емкость ионной ловушки зависит от первеанса электронного пучка, его напряжения и длины. Важнейшим параметром остается первеанс электронного пучка, величина которого ограничена явлением "виртуального катода". Из формулы Смита - Хартмана

$$I_0 = \frac{25 \cdot 10^{-6} V^{3/2}}{1 + 2 \ln R / r_c}$$

, где r_c - радиус электронного пучка, R - радиус трубки дрейфа,

I_0 и V - предельный ток и напряжение электронного пучка, для отношения $R/r_c = 2^2$, следует приемлемое значение первеанса $10 \text{ мкА} / \text{В}^{3/2}$. В таком электронном пучке длиной 1M емкость ионной ловушки 10^{12} элементарных зарядов может быть достигнута при напряжении 10 кВ, Мы считаем, что с использованием

высокоэффективных металлосплавных катодов, разработанных в ГНПП "ИСТОК" и результатов проведенных исследований по магнитной компрессии магнитоограниченных электронных потоков на установке "Крион -С" проблема реализации таких пучков решается наиболее просто. Для электронной пушки с плотностью тока эмиссии 50 А/см^2 и напряжением 10 кВ эквивалентное магнитное поле $B_{\text{экв}} = 0.1 \text{ Т}$. Очевидно, что в приборе, с весьма заурядным для сверхпроводящих магнитных систем полем в 3Т, необходимая в ионной ловушке плотность тока в 500 А/см^2 , достигается, если катод электронной пушки находится в поле 0.3 Т , т. е. имеется трехкратный запас по полю для подавления тепловых скоростей и дефокусирующего действия анодной линзы. Электронная пушка Пирса с первеансом $10 \text{ мкА/В}^{3/2}$ без электростатической компрессии в сильном магнитном поле могут быть созданы тривиальным методом, - уменьшением расстояния катод - анод. Этот метод был исследован в 1971- 1975 годах при разработке электронных пушек "Крион -1". В результате были изготовлены электронные пушки с первеансом до $16 \text{ мкА/В}^{3/2}$, в которых отношение диаметра катода ($\Phi_c 3 \text{ мм}$) к расстоянию катод - анод ($d = 0.8 \text{ мм}$) равно 3.75. Недостатком такого диода, который не считается критичным для электронно - лучевого метода ионизации, остается сильная неоднородность распределения плотности электронов по радиусу. Ситуация исправляется при помощи "теневого сетки" на катоде и сетки в аноде электронной пушки. Технология такой электронной пушки разработана нами для случая, когда "теньевая сетка" изготавливалась профилированием поверхности катода. "Теньевые сетки" в настоящее время широко применяются в мощных СВ приборах с линейным пучком и технология их находится на очень высоком уровне. Другой подход к получению электронного пучка с высоким первеансом может быть реализован с использованием продольной компрессии. Такая модель предлагается для возрождения установки "SuperEBIS". Электронный пучок с током 10А из электронной пушки с первеансом $3.5 \text{ мкА/В}^{3/2}$ вводится в область ионной ловушки, где тормозится до потенциала 10 кВ. Комбинация двух методов, возможно, является наилучшим способом решения проблемы электронного пучка с высоким первеансом. Рассмотренную проблему необходимо решать совместно с обеспечением мощности электронного пучка и ее диссипации. Оценки показывают, что для интересующего нас электронного пучка возможна 50% рекуперация энергии, т. е. мощность источников питания - 50 кВт. При

импульсной работе с длительностью импульса 100 мсек и частоте 1 Гц эта цифра снижается до 5 кВт, что является приемлемым для форинжектора ускорительного комплекса ЛВЭ.

Таким образом, принципиально и технически возможно создать ионную ловушку с емкостью 10^{12} элементарных зарядов при факторе ионизации 10^{21} см⁻².

Основные результаты диссертации могут быть сформулированы следующим образом:

1. Создан электронно - лучевой ионизатор "Крион - С", производящий пучки ионов от S^{14+} до Kr^{34+} , как прототип ионного источника для ускорительного комплекса "НУКЛОТРОН"
2. Разработана технология изготовления такого рода ионных источников.
3. Экспериментально изучены системы формирования электронных пучков в магнитных полях сверхпроводящих соленоидов и получены электронные пучки с плотностью мощности $10^6 - 10^7$ Вт/см² (впервые). Тем самым достигнуты параметры установки "SuperEBIS".
4. Изучены процессы многократной ионизации в таких пучках. Получены экспериментальные эволюции спектров зарядностей ионов аргона при энергии ионизирующих электронов 30 кэВ. (впервые)
5. Экспериментально исследована работа ионизатора "Крион -С" в составе ускорительного комплекса ЛВЭ ОИЯИ в комбинации электронно - лучевой ионный источник - линейный ускоритель - обдирочная фольга. (впервые)
6. Получены от ионизатора "Крион -С" ускоренные пучки ионов S^{14+} , $Ar^{14+} - Ar^{17+}$ и $Kr^{29+} - Kr^{34+}$ с энергией 5 МэВ / нуклон (впервые). Экспериментально измерены спектры зарядностей этих элементов после прохождения углеродной обдирочной мишени.
7. Ионизатор "Крион - С" обеспечил экспериментальную инжекцию многозарядных ионов в "НУКЛОТРОН", работу ускорительного комплекса Синхрофазотрон при ускорении ядер S^{16+} до энергии 3.7 ГэВ / нуклон и эксперименты на линейном ускорителе ЛУ - 20 по производству политрековых мембран при ускорении ионов Ar^{14+} .

Список цитируемой литературы насчитывает 214 названий. Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Б.Ш.Бочев, Т.Куцарова, В.П.Овсянников, ОИЯИ, Р5 - 11566, Дубна, 1978.
2. Б.Ш.Бочев, В.П.Овсянников, Т.Куцарова, ОИЯИ, Р7 - 11567, Дубна, 1978.
3. В.П.Овсянников, АС СССР № 1459527 от 15 октября 1988 года.
4. Е.П.Жидков, С.В.Карташов, В.П.Овсянников, Р.В.Полякова, Б.Н.Хоромский, ОИЯИ, Р11 - 88 - 225, Дубна, 1988.
5. Ю.В.Куликов, В.П.Овсянников, А.И.Стариков, ОИЯИ, Р9 - 88 - 263, Дубна, 1988.
6. В.П.Овсянников, Труды 10 - ого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, D9 - 89 - 52, 1989, 206.
7. В.П.Овсянников, М.И.Шелаев, ОИЯИ, Р13 - 90 - 296, 1990.
8. V.P.Ovsyannikov, Proc. of the 5-th Int. Symp. on EBIS and Their Appl. Dubna, USSR, 1991, 59.
9. A.D.Kovalenko, V.P.Ovsyannikov et al., JINR Rapid Commun. 2, 53, 1993.
10. V.P.Ovsyannikov, V.S.Alfeev et al., Proc. of the 5-th Int. Conf. on Ion Sources, Beijing, China, 1993, Rev. Scient. Instr., v.65, p.2, 1994, 1133.
11. V.P.Ovsyannikov, Proc. of the 1994 LINAC Conf., Tsukuba, Japan, 1994, 384.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 февраля 1996 года.