

С 345 Н
Д - 672

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



3493/2-76

6/IX-76
P7 - 9799

Е.Д.Донец, В.П.Овсянников

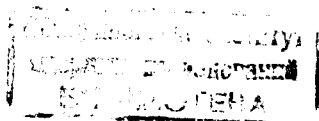
КРИОГЕННЫЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ИОННЫЙ
ИСТОЧНИК "КРИОН-2"

1976

P7 - 9799

Е.Д.Донец, В.П.Овсянников

**КРИОГЕННЫЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ИОННЫЙ
ИСТОЧНИК "КРИОН-2"**



1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы заметно вырос интерес к разработке новых типов источников высокозарядных ионов^{/1,2/}. Это можно объяснить тем, что на ряде синхротронов ускорены ядра легких элементов до релятивистских энергий и имеется совершенно определенная тенденция к расширению диапазона масс ускоренных ядер. С другой стороны, в физике низких энергий все еще не решена задача ускорения ионов тяжелых элементов, вплоть до урана. Если в первом случае для эффективного ускорения требуются на данном этапе пучки легких ядер, полностью лишенных электронов, то во втором случае требуются пучки ионов типа Xe^{+30} , U^{+45} . С точки зрения получения необходимых зарядностей ионов непосредственно в ионном источнике обе задачи имеют примерно один и тот же класс сложности и не могут быть решены традиционными методами.

Для получения ионов высокой зарядности в настоящее время разрабатываются, в основном, три типа ионных источников: электронно-лучевой^{/3-7/}, лазерный^{/8-10/} и плазменный, с подогревом электронов на циклотронном резонансе^{/11,12/}.

В Лаборатории высоких энергий ОИЯИ был разработан криогенный вариант электронно-лучевого ионного источника "Крион"^{/6/}. С помощью этого источника получены пучки ядер углерода и азота и высокозарядные ионы Ar^{+14} , Xe^{+29} . Источник "Крион" в настоящее время проходит адаптацию к условиям работы на синхрофазотроне ЛВЭ.

Для продолжения работ по исследованию возможностей применения плотных электронных пучков для целей ионизации в ЛВЭ создан стендовый экспериментальный источник "Крион-2". Криогенно-магнитная система этого источника описана ранее^{/13/}. Ниже дано описание системы формирования электронного пучка, экспериментальной установки и предварительных экспериментальных результатов, полученных на источнике "Крион-2".

II. ВЫБОР СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Как известно^{/3,4/}, принцип действия электронно-лучевого источника основан на использовании ионной ловушки, образованной объемным зарядом электронного пучка, который несет в этом случае две функции: удержание ионов в поле объемного заряда и ионизацию электронным ударом.

Суммарный ионный заряд ΣQ_i пропорционален объемному заряду электронного пучка

$$\Sigma Q_i = \alpha PUL,$$

где α - коэффициент пропорциональности, P - первичный ток электронного пучка, U - ускоряющее напряжение, L - длина ионной ловушки.

Зарядность ионов при данной энергии электронов eU определяется величиной фактора ионизации, представляющего собой произведение плотности потока электронов в пучке $-j$ на время взаимодействия иона с пучком $-t$. Для получения ионов высокой зарядности электронно-оптическая система должна обеспечивать формирование электронного пучка как можно более высокой плотности. Кроме того, производительность источника линейно возрастает с длиной и первичным током электронного пучка.

В источнике "Крион" был использован для ионизации электронный пучок с $P = 10 - 12 \text{ мкА/В}^{3/2}$, $U = 2,5 \text{ кВ}$, $j_e \leq 30 \text{ А/см}^2$ в течение 40 мс. Получение ядер более тяжелых элементов (Ne, Ar), а также увеличе-

ние доли ядер углерода и азота в спектре зарядностей ионов из электронно-лучевого источника связано с достижением больших значений фактора ионизации $j\tau$.

Работы по увеличению $j\tau$ за счет увеличения τ , по-видимому, нельзя считать перспективными, т.к. при этом, например, уменьшается возможная частота посылок, еще более повышаются требования к вакууму в области ион-электронного взаимодействия и усложняется проблема удержания ионов в электронном пучке в течение большего промежутка времени. С другой стороны, известно, что возможно получение электронных пучков, превосходящих по плотности пучок источника "Крион" на несколько порядков величины, и с этим связаны возможности существенного увеличения $j\tau$.

При принятой в настоящее время системе фокусировки аксиальным однородным магнитным полем максимальное значение j при минимальном значении индукции поля B получается в случае бриллюэновской фокусировки, характеризующейся отсутствием магнитного поля на катоде. В этом случае:

$$j_e = 46,3 B^2 \sqrt{U}$$

/единицы измерения здесь и далее выбраны соответственно: А/см^2 , Тл , В ./

В практическом соответствии с приведенным соотношением в экспериментальной работе^{/14/} получен электронный пучок с $j_e = 2,4 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ при $U = 10 \text{ кВ}$ и $B = 0,75 \text{ Тл}$.

Тем не менее, получить бриллюэновский пучок электронов практически чрезвычайно трудно. Необходимо тщательное согласование электронной пушки и магнитной фокусирующей системы. Например^{/14/}, 10%-ная ошибка в значениях радиуса или угла входа в магнитное поле приводит к 25%-ной величине пульсаций электронного пучка.

Кроме того, с точки зрения использования таких пучков в электронно-лучевом источнике, возникают дополнительные сложности, связанные с наличием изменяющегося во времени пространственного заряда ионов в пучке, который изменяется также вдоль оси источни-

ка. Следует учесть также, что для удержания ионов в аксиальном направлении имеется вариация потенциала пространства дрейфа пучка, также изменяющаяся во времени, в то время как бриллюэновская фокусировка при заданной В осуществляется лишь для электронного пучка одного напряжения. Поэтому в качестве первого шага для получения и применения плотных электронных пучков в ионном источнике целесообразно рассмотреть систему формирования с магнитным полем на катоде, в наиболее сильном случае, когда практически весь магнитный поток, проходящий через поперечное сечение пучка, проходит также через катод. В этом случае электронный пучок всегда пульсирует. Величина пульсаций зависит от радиальной компоненты скорости крайнего электрона и от значения магнитного поля^{/15/}. Как следует из теории формирования, удовлетворительно сфокусированный пучок можно получить с магнитным полем на катоде, превышающим более чем в 2 раза соответствующее плотности и напряжению электронного пучка вблизи катода бриллюэновское поле. При этом, если электронный пучок движется в нарастающем до индукции В магнитном поле, средний радиус пучка r_0 уменьшается в соответствии с закономерностью:

$$r_0 = r_k \sqrt{B_k / B},$$

где r_k - радиус катода, B_k - индукция магнитного поля на катоде.

Соответствующее данной плотности эмиссии электронов с катода $j_{эм}$ и напряжению пучка U_B бриллюэновское поле В находится из соотношения:

$$B_B = \frac{\sqrt{j_{эм}}}{6,8 \sqrt[4]{U}}.$$

Таким образом, при использовании системы формирования пучка с сильным полем на катоде максимально возможная плотность j_e для данного значения В зависит от плотности эмиссии катода и выражается соотношением:

$$j_e = 3,4 B \sqrt{j_{эм}} \sqrt[4]{U}, \text{ если } B_k = 2B_B.$$

Результаты оценок j_e для различных значений $j_{эм}$, В и U представлены на рис. 1. Естественно, что значения плотности j_e , полученные в реальных пучках, будут приближаться к расчетным значениям в случае минимальных радиальных компонент скорости электронов, т.е. при согласовании траектории крайнего электрона с магнитной силовой линией, и небольшом первеансе.

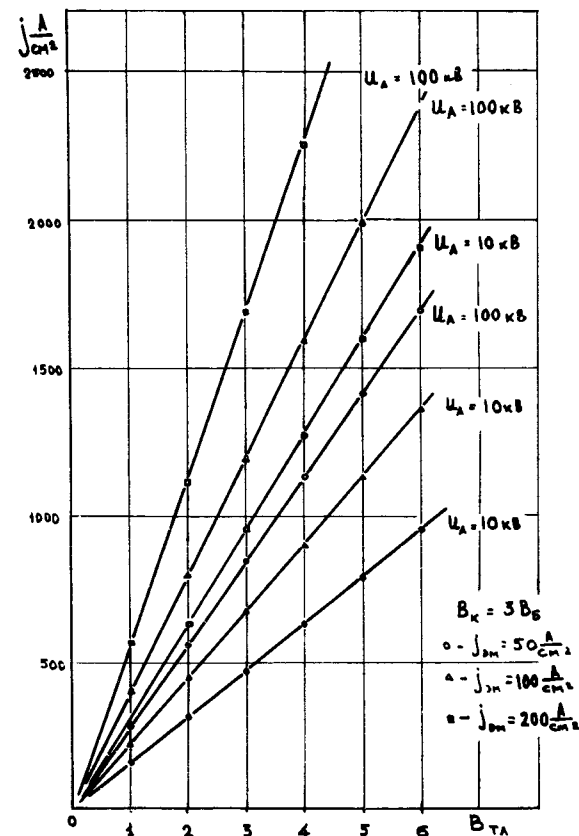


Рис. 1. Зависимости плотности тока электронного пучка от индукции поля соленоида для различных плотностей эмиссии катода и напряжений.

Таким образом, используя современные магнитные фокусирующие системы, создающие поля $2\div 3 \text{ Тл}$ и высокоэффективные эмиттеры электронов в случае магнитоограниченного потока, можно сформировать электронные пучки со средней плотностью тока $\sim 500\div 1000 \text{ А/см}^2$ при напряжениях $\sim 10 \text{ кВ}$. Именно такая система формирования, как обеспечивающая плотные пучки максимальной устойчивости, была выбрана для источника "Крион-2".

Само решение задачи формирования электронного пучка столь высокой плотности в ионном источнике естественно, может привести к увеличению фактора ионизации лишь в том случае, если обеспечена устойчивость пучка в присутствии ионов. Исследования устойчивости электронных пучков в плазме интенсивно развиваются^{/16/}. Однако применительно к электронно-лучевому источнику экспериментально не показано, к каким именно потерям в факторе ионизации или интенсивности ионного пучка приводит та или иная неустойчивость. Этот вопрос представляется сейчас основным в дальнейшей разработке такого типа ионного источника.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Устройство ионного источника "Крион-2" близко к устройству "Крион". На рис. 2 представлена схема внутренней части источника "Крион-2" и масс-спектрометра по времени пролета. Как и ранее^{/6/}, электронная

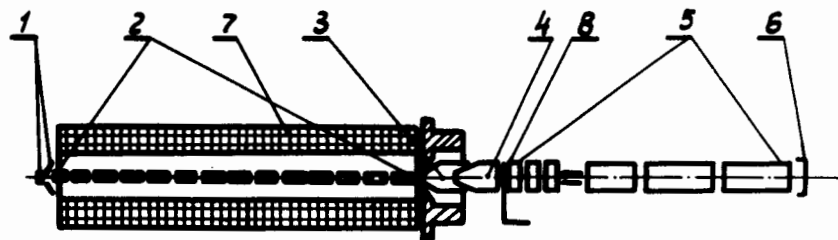


Рис. 2. Схема внутренней части источника "Крион-2" и масс-спектрометра по времени пролета.

пушка 1, система трубок дрейфа 2, электронный коллектор 3, вытягивающий электрод 4 и элементы масс-спектрометра 5 с ионным коллектором 6 расположены на оси фокусирующего соленоида 7.

В отличие от источника "Крион" секции трубки дрейфа имеют уменьшенный до 3 мм диаметр каналов для прохождения электронного пучка диаметром, не превышающим 0,8 мм. Кроме того, для увеличения разрешения "Крион-2" снабжен двухметровым масс-спектрометром, на входе которого размещен подвижный ионный коллектор 8 для оперативного контроля за количеством ионов на выходе из источника. Общая длина обмотки соленоида, как и ранее, составляет 120 см, однако максимальная индукция его магнитного поля увеличена до $\sim 2,5 \text{ Тл}$.

Электронно-оптическая система схематически представлена на рис. 3.

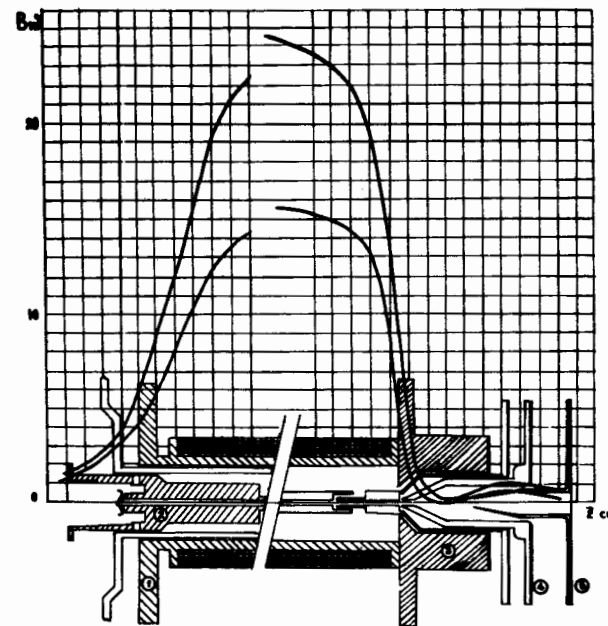


Рис. 3. Схема электронно-оптической системы источника "Крион-2". Расположение элементов соответствует изображенным В-кривым для двух значений индукции магнитного поля.

В рассеянном поле соленоида 1 расположена электронная пушка 2 с пирсовской конфигурацией электродов. Обычно использовался катод диаметром 0,8 мм. Положение катода относительно В-кривой соленоида таково, что $V_k \approx 3V_B$. Имеется возможность оперативного изменения положения электронной пушки вдоль магнитной оси системы. У другого торца соленоида расположен магнитный полюс с экраном 3, электронный коллектор 4 и вытягивающий электрод 5. Магнитный экран, как следует из расчетной В-кривой при выбранной геометрии, не является оптимальным. Некоторый рост магнитного поля в области вытягивающего электрода может приводить к возникновению отраженного от вытягивающего электрода потока электронов.

Геометрические параметры электронно-оптической системы не являются окончательными. В дальнейшем с целью оптимизации системы планируется ряд экспериментов и расчетов.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. *Электронный пучок.* В таблице приведен ряд экспериментальных результатов по получению плотных электронных пучков в источнике "Крион-2". Из таблицы следует, что параметры реализованной электронно-оптической системы соответствуют получению плотности в пучке в несколько сотен ампер на $см^2$.

Характеристики аксиальной симметрии магнитного поля, а также механическая система установки электронной пушки и секционированной трубки дрейфа на оси этого поля оказались достаточно удовлетворительными и позволили провести электронный пучок через всю структуру практически без потерь. Был обнаружен, однако, нецентральный выход электронного пучка из последней секции трубки дрейфа и вход его в область электронного коллектора. Эту неаксиальность удалось исправить путем введения внешнего шиммирования рассеянного магнитного поля соленоида в районе электронной пушки.

Токооседание было обнаружено лишь на аноде пушки,

Таблица 1

Ток мА	Напряжение кВ	Первеанс мк А/В	Длительность им- пульса мс	Поле на катоде Тл	Бриллюэ- новское поле для ($j_{эм} U$) Тл	Индук- ция со- леноида Тл	Средняя плот- ность А/см ²
180	4,5	0,6	100	0,3	0,107	2,25	225
300	5,5	0,74	40	0,3	0,132	2,25	450
400	5,5	0,98	40	0,3	0,152	2,25	600
500	4	1,98	6	0,37	0,184	2,50	670

который специально для этих измерений заземлялся через сопротивление в несколько килоом. Величина токооседания на анод достигла десятков микроампер и зависела от напряжения на вытягивающем электроде, что свидетельствует о наличии отраженного электронного пучка в пространстве дрейфа.

Измерение размеров электронного пучка в области регулярного магнитного поля не производилось из-за чрезвычайной сложности методики таких измерений. Приблизительное соответствие реальной и расчетной плотностей было установлено при измерении эволюции зарядовых спектров ионов азота.

2. *Ионизация.* Изучение процессов ионизации в источнике "Крион-2" производилось теми же методами, что и ранее ^{/6/}. Для ввода рабочего вещества в электронный пучок применялся метод "электронного регулятора". Управление аксиальным движением ионов осуществлялось при помощи вариаций во времени распределений потенциалов на секциях трубки дрейфа. Для этого применялись резисторный делитель и генератор запирающих импульсов ^{/17/}. В качестве рабочих газов использовались этилен, азот, неон и аргон.

Было обнаружено, что если в ионную ловушку не вводилось рабочее вещество, то за время ионизации до 100 мс в ней не накапливалось какое-либо измеримое количество ионов остаточного газа. Это означает, что фоновое давление в объеме ионизации не превышало 10^{-12} Тор. С другой стороны, при вводе рабочего газа в ловушку на входе источника появлялись ионы только этого газа.

Поведение ионов рабочего газа, введенных в электронный пучок, характеризовалось некоторой скоростью потерь в процессе ионизации. В этом отношении следует перечислить следующие основные качественные результаты: а/ скорость потерь тем выше, чем больше электронный ток I_e при данном напряжении пучка; б/ при постоянных значениях тока и напряжения скорость потерь уменьшалась с увеличением времени тренировки катода электронной пушки и с понижением потенциала анода; в/ скорость потерь зависела от распределения потенциа-

лов на секциях трубок дрейфа, расположенных непосредственно за анодной диафрагмой электронной пушки в области нарастающего магнитного поля; г/ потери приводили к тому, что в конце процесса ионизации через ~100 мс после ввода рабочего вещества уровень компенсации ионами пространственного заряда электронов составлял ~20±25%.

Эволюция зарядовых спектров ионов, в основном, соответствовала расчетным значениям плотности электронного тока в пучке, найденном из $j_{эм}$ и соотношений V_k/V . Обнаружено, однако, что чем бы ни было вызвано возрастание скорости потерь, эффективное значение фактора ионизации j_r тем меньше, чем выше скорость потерь при постоянных I_e , U и времени ионизации. Наблюдались случаи, когда эффективные значения j_r различались в 2 раза при минимальной и максимальной скоростях потерь ионов.

Несмотря на наличие потерь в источнике "Крион-2", удалось уже сейчас реализовать максимальное значение фактора ионизации $j_r = 10^{20}$ см⁻². Это позволило успешно осуществить эксперименты по ионизации К-оболочки неона. На рис. 4а показан пример спектра ионов естественной смеси изотопов неона, полученный при соответствующих параметрах источника. Видно, что доля ионного тока, представляющая ядра неона (Ne^{+10}), составляет ~20% от полного его значения при количестве ~ 10^8 ядер/импульс. Для иллюстрации на рис. 4б приведен также пример спектра ионов азота для существенно меньшего значения j_r .

При ионизации аргона уверенно наблюдалась линия Ar^{+16} .

V. ВЫВОДЫ

Начальный этап исследований на ионном источнике "Крион-2" показал, что в электронно-лучевом ионном источнике может быть реализован фактор ионизации $j_r > 10^{20}$ см⁻² для энергий электронов 5 - 10 кэВ и $j_e = 100 \div 200$ А/см².

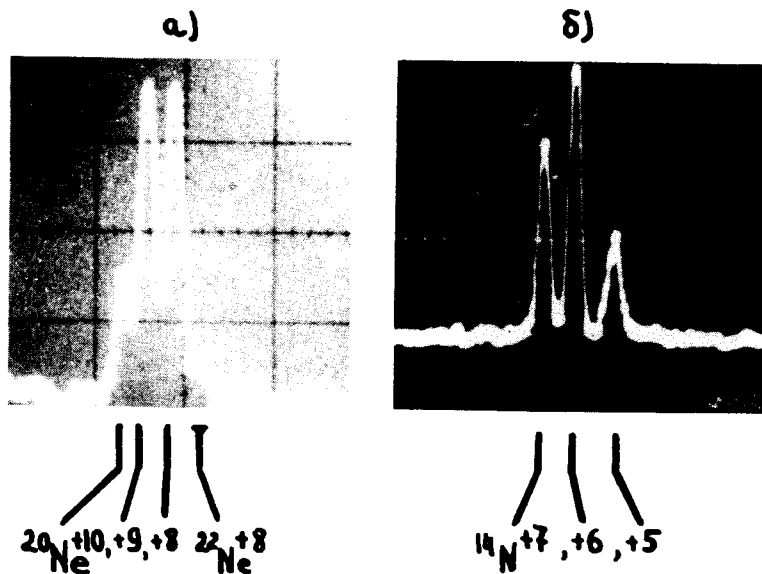


Рис. 4. Примеры спектров зарядностей ионов: а/ неона при $I_e = 165$ мА; $U = 6$ кВ; $j_e = 200$ А/см²; $\tau_i = 90$ мс. б/ азота при $I_e = 110$ мА; $U = 4$ кВ; $j_e = 130$ А/см²; $\tau_i = 60$ мс.

Наблюдающиеся при этом потери ионов в настоящее время, по-видимому, определяются несовершенством системы формирования электронного пучка, проявляющейся, в основном, при согласовании электрического и нарастающего магнитного полей. Возможно также возникновение ионно-электронных неустойчивостей из-за плохих вакуумных условий вблизи катода в слабом магнитном поле.

Основные технические характеристики источника "Крион-2" в настоящее время обеспечивают возможность ионизации К-оболочки аргона.

В заключение авторы выражают благодарность А.И.Пикину за разработку 2-метрового масс-спектрометра по времени пролета и полезные обсуждения, В.Г.Дудникову за разработку блока питания катода

электронной пушки и быстрого предусилителя спектрометра и В.В.Сальникову - за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Литература

1. Proc. of the Int. Conf. Mult. Char. Heavy Ion Sourc. and Acc. Syst. Trans. Nucl. Science, NS19, 2 /1972/.
2. Proc. of the Sec. Int. Conf. on Ion Sourc. 1972, Vienna, Austria.
3. Е.Д.Донец. Авторское свидетельство №248860. Бюллетень ОИПОТЗ №24, 1969.
4. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-4124, Дубна, 1968.
5. E.D. Donets, V.I. Ilushchenko, V.A. Alpert. Premiere Conf. Int. sur Sources d'Ions, Saclay, INSTN, 1969.
6. Е.Д.Донец, А.И.Пикин. ЖТФ, XLV, 2373, 1975.
7. J. Arianer et al. Nucl. Instr. and Meth., 124, 157 /1975/.
8. Ю.А.Быковский, Н.Н.Дегтяренко, В.Ф.Елесин, Ю.П.Козырев, С.М.Сильнов. ЖТФ, XL, 2578, 1970.
9. A. Perez et al. Proc. of the Sec. Int. Conf. on Ion Sources, p. 597 /1972/ Vienna, Austria.
10. M. Bajard et al. Proc. of the Sec. Int. Conf. on Ion Sources, p. 609 /1972/ Vienna, Austria.
11. P. Apard et al. Proc. of the Sec. Int. Conf. on Ion Sources, p. 632 /1972/ Vienna, Austria.
12. P. Briand et al. Proc. of the 12th Int. Conf. Phen. Ion Gases, 1, Eindhoven /1975/, p. 102.
13. В.П.Овсянников. ОИЯИ, Р8-9597, Дубна, 1976.
14. L. Kikushima, C.C. Johnson. Proc. of the IEEE 52, No. 1 /1964/.
15. И.В.Алямовский. "Электронные пучки и электронные пушки", "Сов. радио", М., 1966.
16. М.В.Незлин. УФН, 102, вып. 1, 1970.
17. В.И.Илющенко, Ю.К.Карягин, В.Л.Степанюк. ОИЯИ, 13-7772, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 мая 1976 года.