

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗУ5Н

Д-672

2523 / 2-77

Е.Д.Донец, В.П.Овсянников

У/7-77

P7 - 10438

ПОЛУЧЕНИЕ

ЯДЕР АЗОТА, КИСЛОРОДА, НЕОНА И АРГОНА  
В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ  
"КРИОН-2"

**1977**

P7 - 10438

Е.Д.Донец, В.П.Овсянников

ПОЛУЧЕНИЕ  
ЯДЕР АЗОТА, КИСЛОРОДА, НЕОНА И АРГОНА  
В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ  
"КРИОН-2"

ИЗДАТЕЛЬСТВО АТОМЭНЕРГЕТИКИ  
МОСКВА 1987

Донец Г. Д., Овсянников В. П.

P7 - 10438

Получение ядер азота, кислорода, неона и аргона  
в электронно-лучевом ионном источнике "КРИОН-2"

В криогенном электронно-лучевом ионном источнике "КРИОН-2" достигнут фактор ионизации (произведение плотности потока электронов на время взаимодействия с ионом)  $\sim 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$  при энергии электронов 6,5 кэВ. В таких условиях выполнен ряд экспериментов по исследованию эволюций спектров зарядностей ионов азота, кислорода, неона, аргона и ксенона в зависимости от фактора ионизации. При этом впервые в ионном источнике получены ядра аргона и ионы  $\text{Xe}^{+37}$ .

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Donets E. D., Ovsyannikov V. P.

P7 - 10438

Production of Nitrogen, Oxygen, Neon and Argon  
Nuclei in the Cryogenic Electron Beam Ion Source

The ionization factor,  $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ , the product of the beam electron density and the time of interaction with ion, has been achieved in the cryogenic electron beam ion source "KRION-2" at an electron energy of 6.5 keV. A series of experiments on the measurement of the charge state spectrum evolution of N, O, Ne, Ar and Xe ions versus the ionization factor have been carried out in these conditions. Argon nuclei and  $\text{Xe}^{+37}$  ions were first obtained in the ion source.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевой ионный источник "КРИОН-2"<sup>/1/</sup> предназначен для стендовых экспериментов по исследованию применения плотных электронных пучков /выше  $100 \text{ А/см}^2$ / для целей ионизации. Ранее сообщалось<sup>/1/</sup> о получении в этом источнике ядер азота и неона. При этом был достигнут фактор ионизации  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-2}$  при энергии ионизирующих электронов  $\sim 5 \text{ кэВ}$ . Впоследствии была продолжена работа по достижению больших значений фактора ионизации, в основном за счет увеличения времени взаимодействия электронного пучка с ионами. При этом экспериментальная установка и некоторые электронные схемы были модернизированы и удалось достигнуть значения фактора ионизации  $\sim 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  при энергии электронов около  $7 \text{ кэВ}$ . В таких условиях был выполнен ряд экспериментов по исследованию эволюций спектра зарядностей ионов азота, кислорода, неона и аргона в зависимости от фактора ионизации и энергии электронов. Были возобновлены также эксперименты по ионизации ксенона.

Ниже дано краткое описание экспериментальной установки и последних экспериментов, выполненных на источнике "КРИОН-2". Проведен первичный анализ результатов этих экспериментов.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка "КРИОН-2" и режимы ее работы в основном те же, что и в /1/. Наиболее значительные их изменения описаны ниже.

## 1. Электронно-оптическая система

Для формирования плотного электронного пучка в источнике "КРИОН-2" применена система магнитной компрессии магнитоограниченного потока<sup>/1/</sup>, как обладающая наибольшей жесткостью. Такая система предоставляет необходимую в начальный период исследований возможность варьировать параметры электронного пучка без существенного изменения конструкции электронной пушки.

Как и прежде, в экспериментах использовалась электронная пушка с пирсовской геометрией электродов. Диаметр катода - 0,8 мм, расстояние катод-анод - 0,8 мм. Сформированный электронной пушкой поток движется в нарастающем от 0,3 до 2,25 Тл магнитном поле, создаваемом сверхпроводящим фокусирующим соленоидом<sup>/2/</sup>.

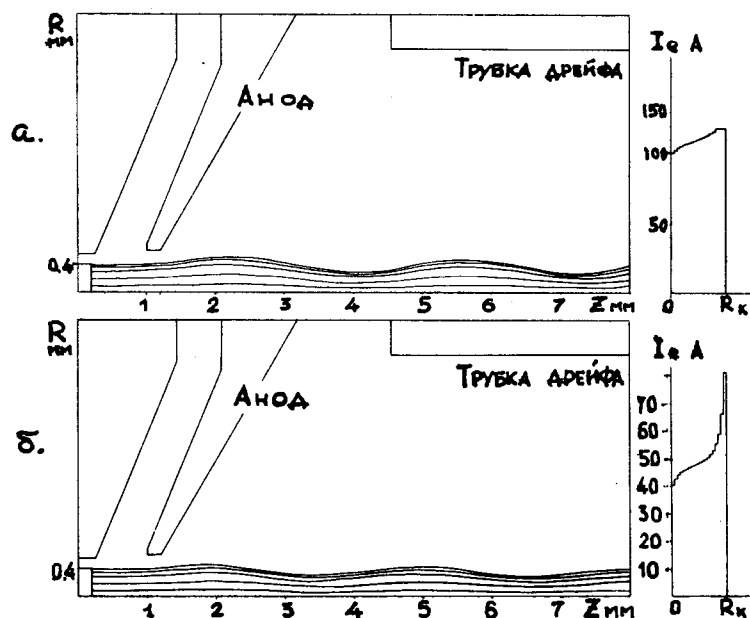


Рис. 1. Расчетные траектории и профиль электронного пучка в электронной пушке "КРИОН-2".  $a/i_{ЭМ} = 120 \text{ А/см}^2$ ;  $I_e = 574 \text{ мА}$ ;  $U_k = -5 \text{ кВ}$ ;  $U_A = 0$ ;  $б/i_{ЭМ} = 120 \text{ А/см}$ ;  $I_e = 278 \text{ мА}$ ;  $U_A = -3 \text{ кВ}$ ;  $U_k = -5 \text{ кВ}$ .

На рис. 1 представлены результаты анализа по программе КСИ-БЭСМ-6<sup>/3/</sup> принятой системы формирования. Траектории рассчитаны на участке ~ 8 мм. Расчетный первеанс электронной пушки -  $1,69 \text{ мкА/В}^{3/2}$ . Комплексный расчет от катода до коллектора ЭОС типа "КРИОН-2", отличающейся большим отношением длины электронного пучка к его диаметру  $\sim 4 \cdot 10^3$ , требует больших затрат машинного времени, поэтому значительный интерес вызывает другой алгоритм расчета<sup>/4/</sup>.

Выходная оптика источника изменена по сравнению с первоначальным вариантом<sup>/1/</sup>. Увеличена длина магнитного экрана для устранения нарастания магнитного поля в области вытягивающего электрода. В целях изучения влияния обратного потока электронов на устойчивость электронного пучка и процессы ионизации введено плавное перемещение вытягивающего электрода вдоль оси пучка. Управление положением вытягивающего электрода может производиться извне вакуумного кожуха. Контроль за распределением электронного пучка на поверхности коллектора осуществляется с помощью молибденовых зондов, введенных во внутреннюю полость коллектора. В сечении, перпендикулярном оси источника, устанавливалось три симметрично расположенных зонда. Общее число зондов - 18. Для идентификации положения электронного пучка и обратного потока электронов в последней секции трубки дрейфа перед коллектором располагались две танталовые диафрагмы толщиной 0,1 мм с внутренним диаметром 2 мм. В дальнейшем каждая диафрагма была заменена на три симметричных изолированных секции. Такая система позволила в определенных пределах эффективно определять положение электронного пучка и связать место шиммирования магнитного поля в области электронной пушки с перемещением электронного пучка на выходе из источника.

## 2. Устройство управления аксиальным движением ионов

Как известно, импульсный режим работы электронно-лучевого ионного источника предполагает управление

аксиальным движением ионов с помощью трех различных распределений потенциалов на секционированной трубке дрейфа<sup>/5/</sup>. Для того, чтобы обеспечить, с одной стороны, большую продолжительность удержания ионов в области электронного пучка и с другой - более качественное формирование различных распределений потенциалов на трубке и их большее разнообразие, был разработан так называемый электронный коммутатор напряжений<sup>/6/</sup>, примененный здесь впервые. С помощью этого устройства удалось создавать устойчивые в течение 500 мс распределения потенциалов, соответствующие удержанию ионов в электронном пучке.

### 3. Анализатор зарядностей ионов по времени пролета

Для увеличения разрешения в спектре зарядностей ионов в экспериментах был применен масс-спектрометр по времени пролета длиной 3,3 м, который представляет собой сочлененные использовавшиеся ранее<sup>/5,1/</sup> 1- и 2-метровые спектрометры. На выходе спектрометра установлено устройство, позволяющее заменять материал ионного коллектора без нарушения вакуума. Последнее изменение введено для планируемых экспериментов по взаимодействию ионов высокой зарядности с поверхностью твердого тела.

## III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основное число экспериментов было посвящено двум задачам: а/ получению электронного пучка, проходящего осесимметрично в трубке дрейфа, выходящего на оси структуры из области магнитного поля и б/ получению эволюций спектров зарядностей ионов азота, кислорода, неона и аргона вплоть до таких значений фактора ионизации  $j_{г_i}$ , когда доля ядер в спектре зарядностей становится значительной.

### 1. Электронный пучок

Для изучения условий наиболее эффективной ионизации параметры электронного пучка изменялись в значительных пределах: ток - от 20 до 170 мА, напряжение - от 2 до 6,5 кВ. Это достигалось вариацией напряжения электронной пушки, дрейфовой структуры и температуры катода. Первостепенными условиями электронного пучка, при которых создавались наилучшие условия ионизации, заключались в пределах  $0,3 \div 0,8$  мкА/В<sup>3/2</sup>. Как и в первых экспериментах, наилучшее токопрохождение достигалось шиммированием магнитного поля в области электронной пушки. Это позволило снизить токооседание на диафрагму, регистрирующую прямой электронный пучок /первая диафрагма/ с 2 мА до  $30 \div 50$  мкА при токе 100 мА. В этом случае регистрируется электронный поток, перехватываемый второй диафрагмой и последней секцией трубки дрейфа. Величины этих токооседаний примерно равны токооседанию на первую диафрагму и зависят от величины вытягивающего напряжения. На остальных секциях дрейфовой структуры какое-либо измеримое токооседание отсутствует.

Изменением места шиммирования фокусирующего соленоида электронный пучок перемещается в трубке дрейфа, что фиксируется большим или меньшим токооседанием на диафрагмы. Наблюдается определенное соответствие между местом шиммирования и положением электронного пучка. Таким способом получен отпечаток электронного пучка на первой диафрагме. По размерам пораженного участка диаметр пучка в этой области равен ~ 0,5 мм, что хорошо совпадает с оценками, сделанными по известной величине магнитного поля, и является определенным подтверждением того, что в области ионизации диаметр электронного пучка составляет ~ 0,3 мм.

### 2. Измерение эффективного провисания потенциала в электронном пучке - $U_{пр}$

Провисание потенциала, обусловленное объемным зарядом электронного пучка, используется в ионном источнике для радиального удержания ионов в области их

взаимодействия с электронами. Аксиальное удержание осуществляется с помощью запирающих потенциалов на ограничивающих пространство ионизации секциях трубки дрейфа. Измерение было выполнено путем сравнения  $U_{пр}$  с потенциалом аксиального удержания ионов. Практически была измерена зависимость полного ионного заряда в объеме ионизации от величины потенциала аксиального удержания ионов.

Полный ионный заряд в пространстве ионизации  $Q_+$  нарастает от нуля до  $|Q_+| \approx |Q_-|$  / где  $Q_-$  - пространственный заряд электронов пучка/, если потенциал аксиального удержания изменяется от 0 до некоторой величины  $U_H$ . При дальнейшем увеличении потенциала аксиального удержания ионный заряд практически не изменяется. Мы объясняем это явление насыщения тем, что происходит компенсация пространственного заряда электронов зарядом ионов и ионы уходят в радиальном направлении. Таким образом, значение потенциала аксиального удержания, при котором прекращается рост накопленного ионного заряда, можно считать равным эффективному провисанию потенциала в электронном пучке. Например, для электронного тока  $I_e = 100$  мА при энергии  $U_e = 5$  кэВ получено значение  $U_{пр} \approx 90$  В, что хорошо соответствует расчетной величине в случае аксиально-симметричного прохождения электронного пучка при диаметре трубки дрейфа 3 мм.

### 3. Изучение эволюций спектров зарядностей ионов

Перед началом процесса ионизации в электронный пучок методом "электронного регулировщика" вводилось определенное количество низкозарядных ионов рабочего вещества. Затем, через некоторое время  $\tau_i$ , производился вывод ионов из объема ионизации и ввод в анализатор по времени пролета. Спектры зарядностей регистрировались фотографированием с экрана осциллографа. Эволюция спектров зарядностей получалась при увеличении  $\tau_i$ . На рис. 2-6 приведены эволюции спектров зарядностей N, O, Ne и Ar в зависимости от количества электричества электронов, прошедших через ион-

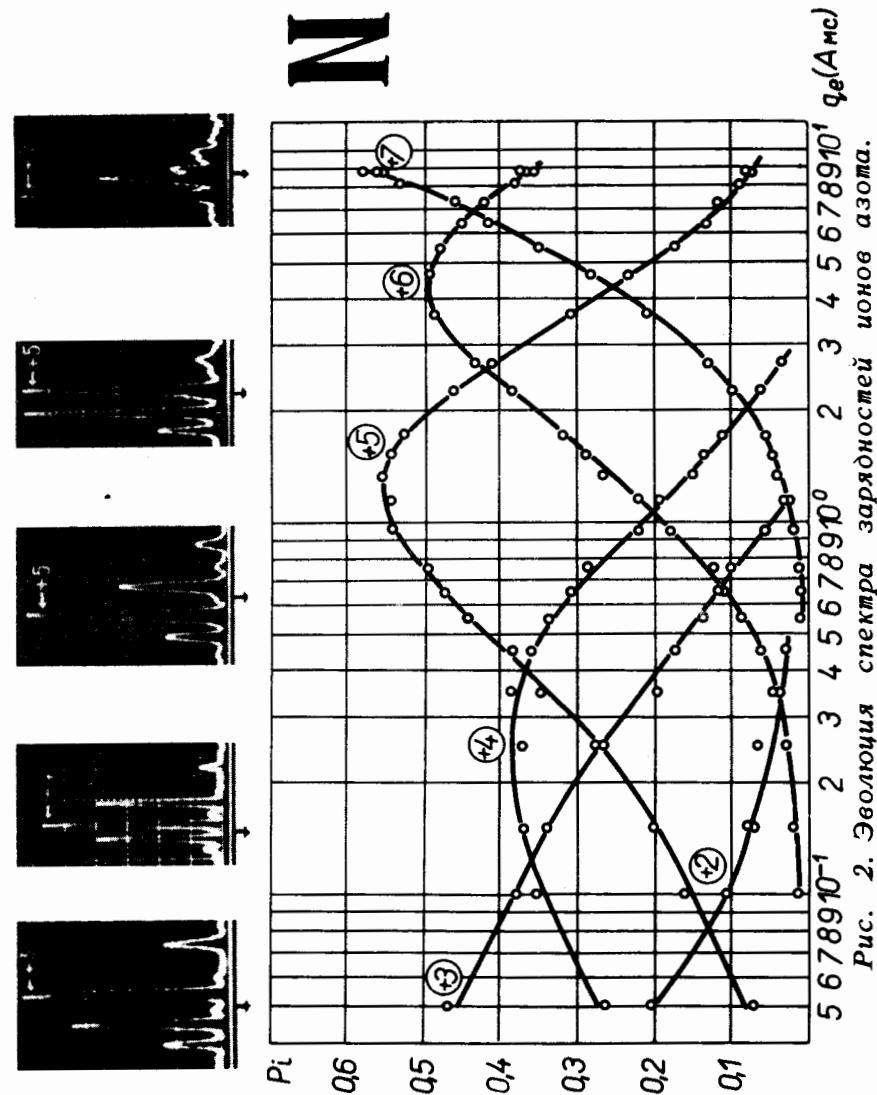


Рис. 2. Эволюция спектра зарядностей ионов азота.

ную мишень  $q_e$ , в единицах А·мс. Это объясняется тем, что при больших, в несколько десятков или даже сотен миллисекунд, временах ионизации электронный ток  $I_e$  уменьшается по сложному закону. Кроме того, диаметр электронного пучка все-таки точно не измерен. При принятом значении коэффициента магнитной компрессии можно установить соответствие между величинами  $q_e$  и  $j\tau_i$ : 1 А мс соответствует  $7,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ .

По оси ординат на рис. 2-6 отложены величины  $P_i$  - количества ионов данной зарядности в спектре в долях единицы. В верхних частях рис. 2,3,4,6 даны иллюстрации первичного экспериментального материала - фотографии спектров зарядностей, стрелками указаны соответствующие им позиции на осях абсцисс. На фотографиях идентифицированы зарядности линий максимальных амплитуд. Следует учесть, что увеличение зарядности линий происходит справа налево.

а/ Азот. Эволюция спектра зарядностей ионов азота представлена на рис. 2. Она получена при  $E_e = 5,6 \text{ кэВ}$ ,  $I_e = 100 \text{ мА}$  и  $0,5 \leq \tau_i \leq 96 \text{ мс}$ . Видно, что при значении  $j\tau_i = 6,9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  доля ядер азота в спектре превышает 55%. Дальнейшее увеличение  $j\tau_i$  в этом случае практически нецелесообразно.

б/ Кислород. Эволюция спектра зарядностей ионов кислорода /рис. 3/ получена при  $E_e = 5,8 \text{ кэВ}$ ,  $I_e = 125 \text{ мА}$  и  $0,2 \leq \tau_i \leq 96 \text{ мс}$ . Кислород как рабочее вещество электронно-лучевого ионного источника использован впервые. Никаких сложностей, связанных с работой катода электронной пушки, в этом случае замечено не было.

в/ Неон. Эволюция спектра зарядностей ионов неона представлена на рис. 4 при  $E_e = 5,4 \text{ кэВ}$ ,  $I_e = 110 \text{ мА}$ ,  $0,25 \leq \tau_i \leq 93 \text{ мс}$ . Кроме того, на рис. 5 показаны эволюции спектра зарядностей ионов неона для различных значений электронного тока при одной и той же энергии  $E_e = 5,4 \text{ кэВ}$ . Открытыми кружками обозначены экспериментальные точки для  $I_e = 112 \text{ мА}$  и  $0,2 \leq \tau_i \leq 63 \text{ мс}$ , а зачерненными кружками - для  $I_e = 90 \text{ мА}$  и  $0,2 \leq \tau_i \leq 63 \text{ мс}$ . Видно, что эволюция спектра практически не зависит от величины используемого электронного тока. Этот экспериментальный результат является

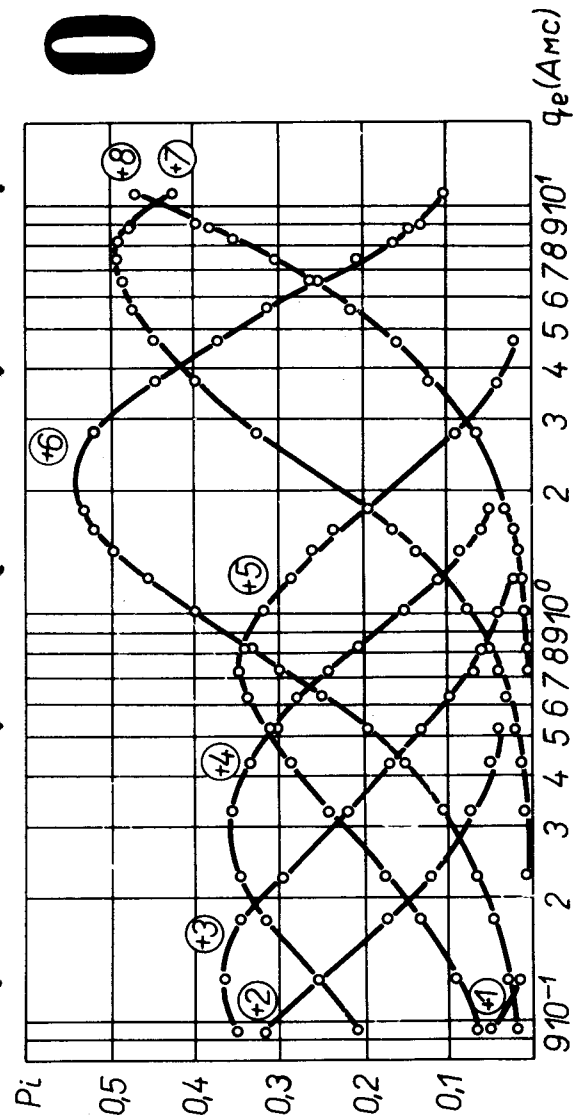
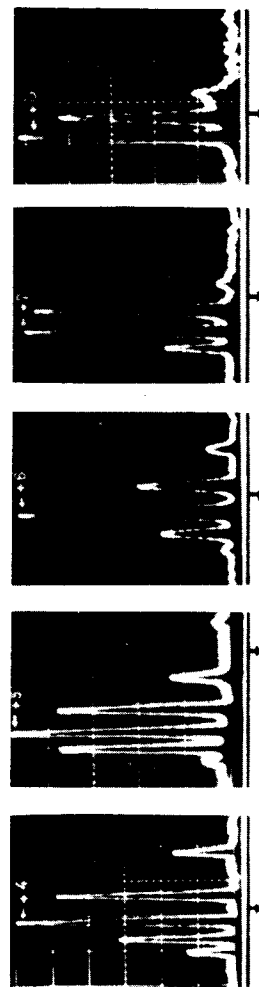


Рис. 3. Эволюция спектра зарядностей ионов кислорода.

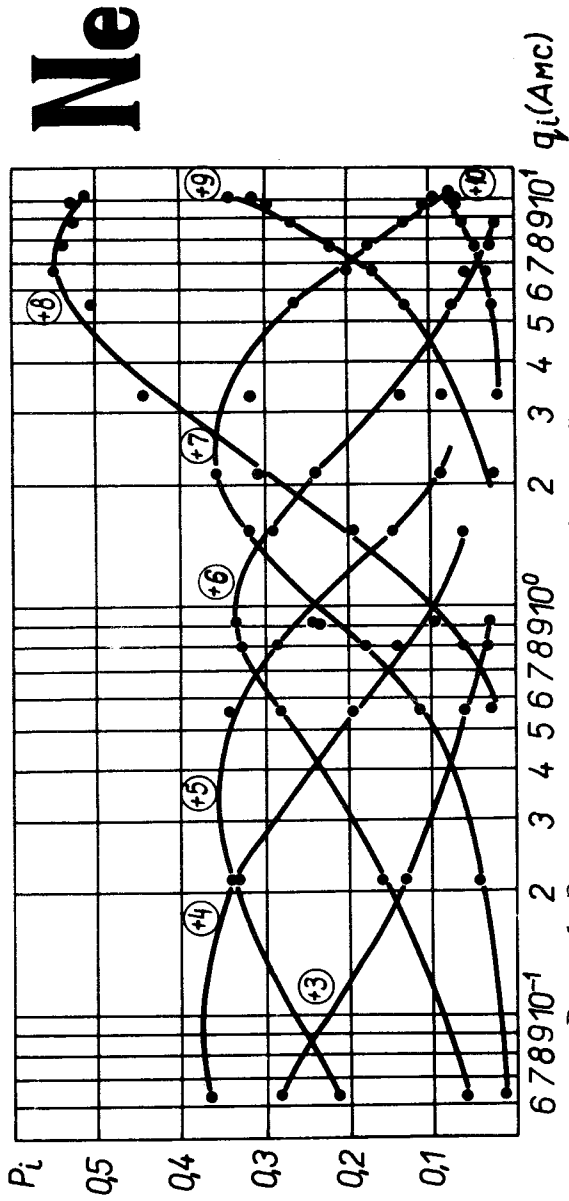
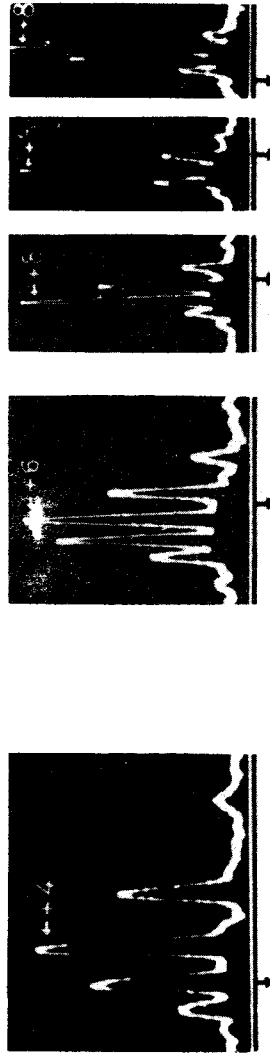


Рис. 4. Эволюция спектра зарядностей ионов неона.

веским доводом в пользу правомерности использования эволюций спектров зарядностей для измерения эффективных сечений ионизации ионов электронным ударом в электронно-лучевом ионном источнике.

г/ Аргон. Эволюция спектра зарядностей ионов аргона /рис. 6/ получена при  $E_e = 4,8 \text{ кэВ}$ ,  $I_e \approx 80 \text{ мА}$ ,  $0,1 \leq \tau_i \leq 300 \text{ мс}$ . Первичный качественный анализ эволюции показывает, в частности, что  $\text{Ar}^{+8}$  получается, по-видимому, не только из  $\text{Ar}^{+7}$ , но также и ионов меньших зарядностей, что впервые наблюдалось ранее<sup>/7/</sup>. Заметна также некоторая выделенность кривых  $\text{Ar}^{+14}$  и  $\text{Ar}^{+15}$ , объяснением которой может быть неплавное уменьшение эффективного сечения ионизации при переходе  $\text{Ar}^{+14}$ ,  $\text{Ar}^{+15}$ . Нарастание количества ионов  $\text{Ar}^{+16}$  до 70% при  $j\tau_i \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  легко объясняется скачкообразным уменьшением сечения образования ионов  $\text{Ar}^{+17}$  из  $\text{Ar}^{+16}$ , особенно если заметить, что энергия связи электрона в ионе  $\text{Ar}^{+16}$  - около 4 кэВ. На рис. 7 представлен спектр ионов аргона, полученный при  $j\tau_i = 2,4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ ,  $\tau_i = 400 \text{ мс}$  и  $E_e \approx 6,8 \text{ кэВ}$ . Здесь уверенно регистрируются ионы  $\text{Ar}^{+17}$  и некоторая доля ядер аргона ( $\text{Ar}^{+18}$ ), которая возрастает до  $\sim 4\%$  при  $\tau_i = 500 \text{ мс}$ . Уровень фона, представляющего собой ядра легких элементов, показывает, что давление остаточного газа в объеме ионизации не превышает  $10^{-12} \text{ Тор}$ .

д/ Ксенон. Предварительные эксперименты по ионизации ксенона выполнены при  $E_e = 3,8 \text{ кэВ}$ ,  $I_e \approx 60 \text{ мА}$  и  $0,5 \leq \tau_i \leq 420 \text{ мс}$ . При этом наблюдались ионы  $\text{Xe}^{+37}$ , причем максимум интенсивности приходился на ионы  $\text{Xe}^{+33}$ . Детальное исследование ионизации ксенона может быть выполнено при использовании ксенона, обогащенного одним из изотопов, например,  $^{129}\text{Xe}$ . Такие эксперименты находятся в стадии подготовки.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные эксперименты показали, что исследование ионизации положительных ионов электронным ударом и получение весьма высокозарядных ионов обеспе-



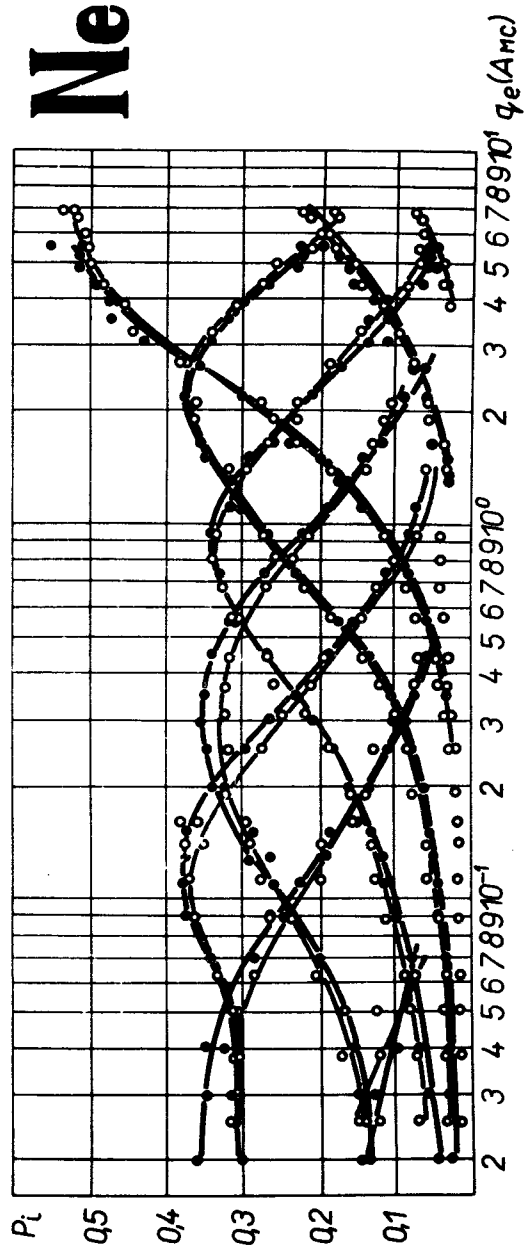


Рис. 5. Сравнение эволюций спектра зарядностей ионов неона для различных значений электронного тока и его плотности.

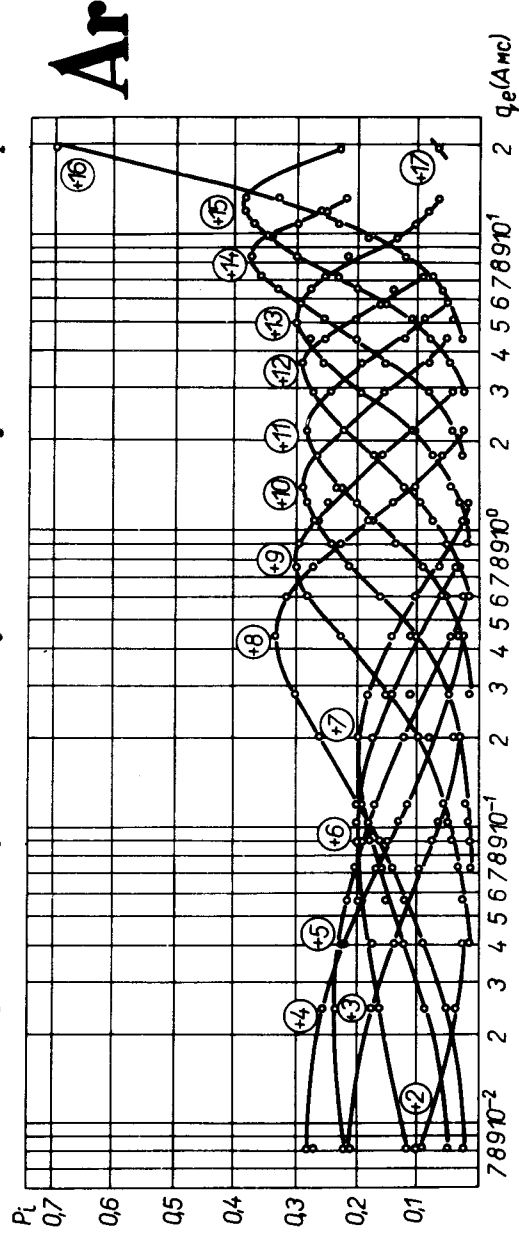
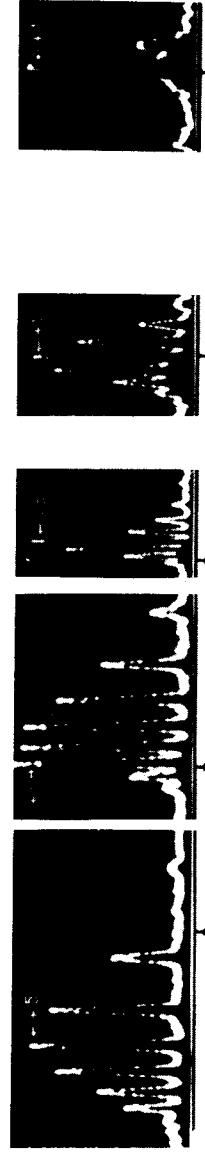


Рис. 6. Эволюция спектра зарядностей ионов аргона.

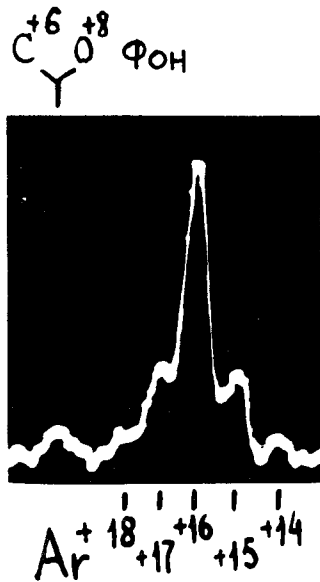


Рис. 7. Спектр зарядностей ионов аргона, полученный при  $j_{r_i} = 2,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  и  $E_e = 6,8 \text{ кэВ}$ .

чивается использованием конструкции и способа работы устройств типа "КРИОН-1" и "КРИОН-2". При этом уже сейчас эффективно используются плотности электронного пучка до  $150 \text{ А/см}^2$  и времена ионизации до 0,5 с. При этом до настоящего времени не получено однозначных доказательств того, что оба эти параметра не могут быть существенно увеличены.

На рис. 8 показаны расчетные кривые для Ne, Ar, Kr, Xe и U, показывающие, какие факторы ионизации  $j_{r_i}$  и энергии электронов  $E_e$  необходимы для достижения соответствующей зарядности ионов. Кривые получены при условии  $E_e \approx 2U_i$ , где  $U_i$  - потенциал ионизации иона той зарядности, которая должна быть достигнута.

Сравнение экспериментальных данных с расчетными кривыми указывает на близость расчетных и экспериментальных результатов. Из рисунка, в частности, следует, что эффективное получение ядер аргона  $\sim 50\%$  в спектре /, а также ионов  $\text{Kr}^{+34}$  и  $\text{Xe}^{+44}$  возможно при увеличении  $j_{r_i}$  примерно в 5 раз по сравнению с уже достигнутым. Такое увеличение в источнике "КРИОН-2" может быть обеспечено.

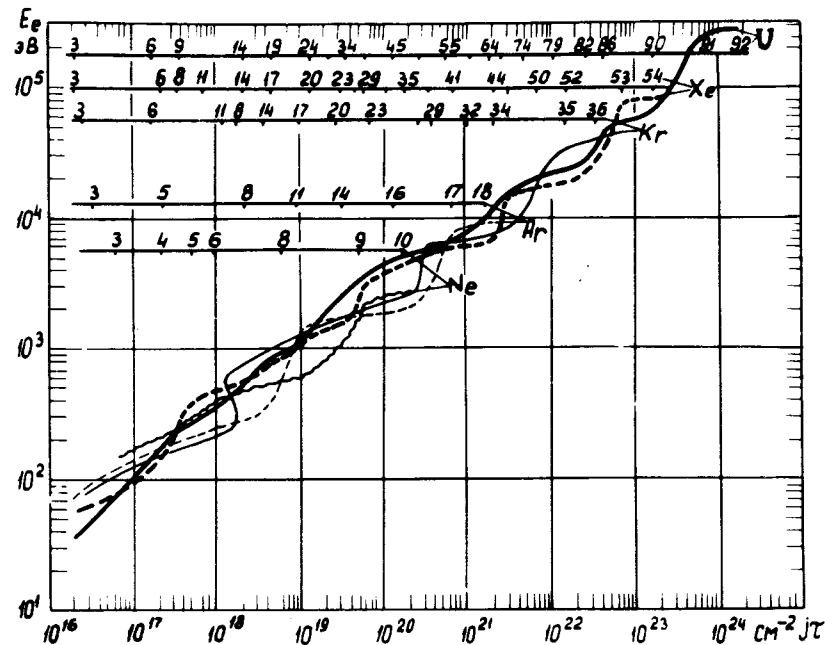


Рис. 8. Расчетные данные для неона, аргона, криптона, ксенона и урана: энергия ионизации  $E_e$ , фактор ионизации  $j_{r_i}$ , необходимые для получения ионов соответствующих зарядностей.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Б.В.Руденко, Г.Л.Мазному, И.Н.Силину, А.П.Сапожникову за помощь в осуществлении расчетов по программе КСИ БЭСМ на ЭВМ, В.Г.Дудникову за разработку электронного коммутатора, Н.Н.Девятко за помощь в обработке экспериментальных данных и В.В.Сальникову за подготовку источника к экспериментам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-9799, Дубна, 1976.
2. Овсянников В.П. ОИЯИ, 13-9597, Дубна, 1976.

3. Блейвас И.М., Голубцов Б.И., Ильин В.П., Попова Г.С., Свешников В.М. Комплекс программ для расчета на БЭСМ-6 широкого класса задач статистической электроники. Сб. "Методы расчета электронно-оптических систем", ч. 1, Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1973.
4. Гинзбург В.Е., Петров Д.П. Известия ВУЗов, Радиофизика, 1974, 17, с. 1416.
5. Донец Е.Д., Пикин А.И. ЖТФ, 1975, 45, с.2373.
6. Дудников В.Г. ОИЯИ, Р7-10134, Дубна, 1977.
7. Донец Е.Д., Пикин А.И. ЖЭТФ, 1976, 70, с. 2025.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 февраля 1977 года.