

СЗУСН
Д-672

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



3791 / 2-74

23/12
P7 - 7999

Е.Д.Донец, А.И.Пикин

ПОЛУЧЕНИЕ ЯДЕР УГЛЕРОДА И АЗОТА
И ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ АРГОНА
И КСЕНОНА В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ
ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P7 - 7999

Е.Д.Донец, А.И.Пикин

ПОЛУЧЕНИЕ ЯДЕР УГЛЕРОДА И АЗОТА
И ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ АРГОНА
И КСЕНОНА В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ
ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Донец Е.Д., Пикин А.И.

P7 - 7999

Получение ядер углерода и азота и высокозарядных ионов аргона и ксенона в электронно-лучевом ионном источнике

В электронно-лучевом источнике многозарядных ионов со сверхпроводящим соленоидом реализовано произведение плотности потока электронов на время их взаимодействия с ионом равное $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ при энергии электронов около 2,5 КэВ. При этом получены пучки ядер углерода (C^{+6}) и азота (N^{+7}), а также ионов аргона с зарядностью +14 (Ar^{+14}) и ионов ксенона с зарядностью +29 (Xe^{+29}).

Получены предварительные экспериментальные данные о сечениях последовательной ионизации положительных ионов указанных элементов.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1974

Donets E.D., Pikin A.I.

P7 - 7999

Production of Carbon and Nitrogen Nuclei of Multicharged Argon and Xenon Ions in the Electron Beam Ion Source

In the electron beam multicharged ion source with a superconductive solenoid the product of electron flux density and electron-ion interaction time about $1.10^{19} \text{ cm}^{-2}$ at the electron energy of 2.5 KeV has been realized.

The beams of carbon (C^{+6}) and nitrogen (N^{+7}) nuclei as well as of argon (Ar^{+14}) and xenon (Xe^{+29}) ions have been produced.

Preliminary experimental data on sequential ionization cross sections of positive ions of the above-mentioned chemical elements have been obtained.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1974

I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка электронно-лучевого источника многозарядных ионов была начата в Объединенном институте ядерных исследований в 1967 году^{/1/}.

Кратко, принцип работы источника состоит в следующем. В пространстве сверхвысокого вакуума создается мощный протяженный электронный пучок возрастающей плотности, удерживаемый магнитным полем фокусирующего соленоида. В начальный момент времени в электронный пучок вводится определенное количество однозарядных ионов рабочего вещества. Под действием сил электрического поля пространственного заряда электронов ионы совершают радиальные колебания с амплитудами, не превышающими значений радиусов точек их возникновения в пучке. В процессе взаимодействия ионов с быстрыми электронами пучка происходит многократная ионизация, пространственный заряд ионов растет. Для того чтобы это не привело к потере ионов за счет увеличения амплитуды их радиальных колебаний, постепенно в процессе ионизации или сразу же, ступенчато после инжекции рабочего вещества, производится увеличение плотности электронного пучка. Во время инжекции рабочего вещества и в процессе ионизации с помощью соответствующих электродов распределение электрического потенциала вдоль пучка поддерживают таким, что оно сохраняет форму потенциальной ямы с барьерами на краях пучка. После достижения ионами рабочего вещества необходимой зарядности аксиальное распределение потенциала изменяется так, что ионы могут покидать

пространство ионизации в аксиальном направлении, - происходит экстракция ионов.

После экстракции ионов плотность тока электронного пучка уменьшается до нуля или до минимальной величины, соответствующей инжекции рабочего вещества в пучок, и цикл повторяется снова.

Первые обнадеживающие результаты по реализации электронно-лучевого источника многозарядных ионов были получены нами в 1968 году ^{/2/}, затем более определенные результаты по наблюдению высокозарядных ионов были опубликованы в 1969 ^{/3,4/} и в 1970 гг. ^{/5,6/}. В 1971 году была начата разработка электронно-лучевого источника ядер некоторых легких элементов для синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ.

Учитывая ограничения, возникающие в этом случае, в связи с установкой источника на высоковольтном терминале, мы сочли целесообразной разработку криогенного варианта такого источника, получившего название "КРИОН" /криогенный ионизатор/. Основные доводы в пользу криогенного варианта следующие: а/ получение практически любой величины магнитного поля и его объема за счет использования сверхпроводящего соленоида без затрат энергии на высоковольтном терминале; б/ использование криогенной откачки для получения сверхвысокого вакуума.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В источнике "КРИОН" как и ранее ^{/2,3,4,5/}, имеются следующие основные элементы: электронная пушка, фокусирующий соленоид, трубка дрейфа, состоящая из нескольких отдельных секций, для создания различных аксиальных распределений потенциала, электронный коллектор, механизм ввода рабочего вещества в электронный пучок, экстрактор и вакуумная система.

В соответствии с проектом "КРИОН" его основные узлы характеризуются следующими параметрами: электронная пушка - микроперванс - до 16, напряжение катод-

анод ≤ 10 кВ, диаметр эмиттирующей поверхности катода - 3 мм, фокусирующий соленоид - длина - 1200 мм, ток в сверхпроводящем кабеле - 100 А, значение индукции магнитного поля - 15000 Гс; вакуумная система - вакуум в области ионизации $\sim 10^{-11}$ тор, время удержания ионов в области ионизации ~ 1 сек, количество ионов за импульс $1,5 \cdot 10^{12}/z$, где Z - зарядность иона; время экстракции ~ 100 мксек; цикличность - 1 цикл в несколько секунд.

Для анализа спектра зарядностей ионов, получающихся в источнике, имеется спектрометр по времени пролета с базой ~ 1 м. На выходе спектрометра, вместо применявшегося ранее ВЭУ ^{/3/} установлены ионный коллектор и быстрый усилитель с коэффициентом усиления до 100. Это изменение обусловлено значительно большим ионным током из источника "КРИОН".

Общий вид источника "КРИОН" со спектрометром по времени пролета показан на рис. 1

III. ЭЛЕКТРОННЫЙ ТОК, ИНЖЕКЦИЯ РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА, ИОНИЗАЦИЯ, ЭКСТРАКЦИЯ ИОНОВ

Электронный пучок в электронно-лучевом ионном источнике, кроме функции ионизации несет также функцию удержания ионов в процессе ионизации.

Для более быстрой и эффективной ионизации необходим электронный пучок с максимально возможной плотностью тока электронов в нем. Для того чтобы обеспечить длительные /порядка одной секунды/ времена удержания ионов в электронном пучке, необходимо не только создать условия сверхвысокого /до 10^{-11} Тор/ вакуума в области ионизации, но и исключить практически полностью бомбардировку стенок трубки дрейфа электронным пучком. Следует отметить также, что с точки зрения ограничения электронного тока виртуальным катодом в области трубки дрейфа выгодно иметь диаметр трубки дрейфа близким к диаметру электронного пучка. И если учесть, что свободный электронный пучок, проходящий аксиально через заземленную металлическую трубку дрейфа, нахо-



Рис. 1. Общий вид электронно-лучевого ионного источника "КРИОН" с анализатором зарядностей по времени пролета.

дится в состоянии неустойчивого равновесия, то из всего сказанного выше следуют чрезвычайно высокие требования к системе, формирующей электронный пучок, к исполнению трубки дрейфа и соосности электронного пучка, трубки дрейфа и фокусирующего магнитного поля.

В настоящее время в источнике "КРИОН" получена максимальная плотность тока электронного пучка, равная 100 А/см^2 , при напряжении 4 кВ , и рабочая плотность тока - 30 А/см^2 при напряжении $\sim 2,2 \text{ кВ}$. В рабочих условиях получены импульсы электронного тока $\sim 1,5 \text{ А}$ при длительности 40 мсек . При соотношении диаметров электронного пучка и трубки дрейфа, равном $3:5$, доля пучка, осаждающегося на трубках дрейфа, не превышает 10^{-6} . Экспериментально установлено, что порча аксиальной симметрии системы, характеризующаяся радиальным отклонением $\sim 0,2 \text{ мм}$ на длине в 1 м , практически исключает возможность получения устойчивого рабочего режима в источнике.

Необходимым условием инжекции рабочего вещества в электронный пучок постоянной плотности является либо возникновение ионов в области пучка, либо изменение заряда ионов при их движении через пространство электронного пучка. Поэтому в источнике "КРИОН" при инжекции поток атомов рабочего вещества пересекается с электронным пучком, при этом возникающие ионы захватываются полем пространственного заряда электронов пучка.

Для обеспечения короткого и регулируемого времени инжекции используется предложенный ранее метод "электронного регулировщика",^{17/} реализованный здесь впервые. Основная идея метода состоит в том, что атомный пучок непрерывен, однако место его пересечения с электронным пучком, как правило, отделено от пространства ионизации электрическим потенциальным барьером, создаваемым распределением потенциала вдоль трубки дрейфа. И лишь на время инжекции, которое может быть сделано сколь угодно малым, потенциальный барьер смещается, подключая место пересечения электронного и атомного пучков к пространству ионизации путем уравнивания их электрических потенциалов. Эксперименталь-

но показано, что инъекция достаточного количества ионов рабочего вещества может быть осуществлена за времена нескольких десятков микросекунд, что затруднительно обеспечить применением любого другого метода инъекции. При этом показано также, что непрерывный поток атомов еще не проходит в пространство ионизации.

Инъекция методом "электронного регулировщика" испытана в источнике "КРИОН" при работе со следующими газами: гелием, этиленом, азотом, неонем, аргонем и ксеноном.

Следующей после инъекции операцией по получению пучка ионов из источника является ионизация и удержание ионов в процессе ионизации.

Фактором, определяющим достижение ионом той или иной зарядности, является произведение плотности потока электронов пучка j на время взаимодействия τ , измеряемое в единицах $/\text{см}^{-2}$. Фактор ионизации, будучи умноженным на эффективное сечение ионизации, дает вероятность ионизации.

Как было указано выше, в источнике "КРИОН" экспериментально получена рабочая плотность тока электронного пучка, равная 30 А/см^2 , т.е. $j = 1,8 \cdot 10^{20} \text{ эл/см}^2/\text{сек}$.

Как считали ранее в теоретических предпосылках создания электронно-лучевого источника^{/1/}, максимальное время электрон-ионного взаимодействия определяется скоростью нейтрализации пространственного заряда электронов пучка ионами, возникающими из остаточного газа. В настоящее время в пространстве ионизации при токе электронов $\sim 1,5 \text{ А}$ получено эффективное значение давления остаточного газа $\sim 2 \cdot 10^{-11} \text{ Тор}$, что обеспечивает максимальное время взаимодействия $\sim 0,5 \text{ сек}$.

Пространство ионизации в источнике "КРИОН" ограничено областью электронного пучка на длине $80 \text{ см}/16$ из 25 секций дрейфовой трубки/. Две оконечные секции дрейфовой трубки, ограничивающие пространство ионизации, в процессе ионизации имеют потенциалы на $500-600 \text{ В}$ выше, чем остальные 14, что обеспечивает удержание ионов в аксиальном направлении в течение неограниченно долгого времени.

В этих условиях время взаимодействия оказывается ограниченным техническими возможностями мощных систем питания электронной пушки^{8,9,10/} и равно 40 мсек . Экспериментально установлено, что, действительно, ионы, введенные в электронный пучок в начале процесса ионизации, эффективно удерживаются там в течение этого времени. Причем уровень фона от остаточного газа за время 40 мсек не превышает 10% . Основными компонентами фона являются водород, углерод и кислород.

Вслед за процессом ионизации идет экстракция ионов из электронного луча в аксиальном направлении, в направлении движения электронов. В отличие от ранее применявшейся схемы извлечения ионов из электронного луча^{/2,3/}, в источнике "КРИОН" вывод ионов происходит при увеличении потенциала секций трубки дрейфа, содержащих внутри пространство ионизации, до уровня потенциала аксиального запирающего, всегда существующего на одной из секций трубки дрейфа, ограничивающей пространство ионизации со стороны выхода из источника. При этом потенциал секции трубки дрейфа, ограничивающей пространство ионизации со стороны электронной пушки, всегда поддерживается еще несколько выше. Преимуществом такого способа вывода ионов является минимальный разброс аксиальных скоростей ионов в процессе вывода. При этом энергия ионов на выходе из источника характеризуется разностью значений потенциалов запирающего и электронного коллектора, которая может достигать нескольких киловольт. С точки зрения характеристики эмиттанта, следует отметить, что эту энергию ионы получают, еще находясь в сильном фокусирующем поле пространственного заряда электронного пучка.

Длительность импульса ионного тока определяется временем увеличения потенциала секций, содержащих пространство ионизации до потенциала запирающего. Это время может регулироваться от 40 до 500 мсек . Принципиально же время вывода определяется тем минимальным разбросом аксиальных скоростей ионов, который желательно иметь на выходе из источника.

IV. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ИОНИЗАЦИЯ ИОНОВ КСЕНОНА, АРГОНА, АЗОТА И УГЛЕРОДА

Экспериментальное изучение процесса последовательной ионизации ионов сводилось к следующему. В начальный момент времени за интервал примерно 100-500 мксек в электронный пучок вводилось определенное количество $/10^{10} \div 10^{11} /$ ионов того или иного рабочего вещества. Затем, по прошествии определенного времени, являющегося временем ионизации, производился вывод ионов из источника и их анализ по времени пролета. Регистрировался вид спектра зарядностей, связанный с определенным временем ионизации, и изменение вида спектра при изменении времени ионизации.

а/Ксенон

На рис. 2 показана зависимость вида спектров зарядностей ионов ксенона от времени ионизации в интервале времени 3-39 мсек. В качестве рабочего газа использовалась естественная смесь изотопов ксенона. В этом случае линии зарядностей выше 13 принципиально не могут быть разрешены. Электронный ток через "КРИОН" в процессе ионизации составлял 1 А при плотности $\sim 30 \text{ А/см}^2$ и энергии $\sim 2,3 \text{ кэВ}$. Этот рисунок со всей определенностью демонстрирует одно из существенных отличий электронно-лучевого ионного источника от всех других типов источников многозарядных ионов, состоящее в том, что в процессе ионизации ионы низших зарядностей практически полностью "выгорают", переходя в ионы более высоких зарядностей, так что в результате на выходе из источника имеется более или менее узкий спектр зарядностей ионов, в частности, для ксенона к концу 39 миллисекунды ионизации "выгорают" все ионы с зарядностями менее +18, максимальная интенсивность приходится на зарядность +24, максимальная зарядность ионов /на уровне 10% от интенсивности в максимуме/ составляет +29.

На некоторых снимках отчетливо видна линия $^1\text{H}^{+1}$ и несколько линий, принадлежащих ионам углерода и кислорода. Подробное исследование показало, что на данном

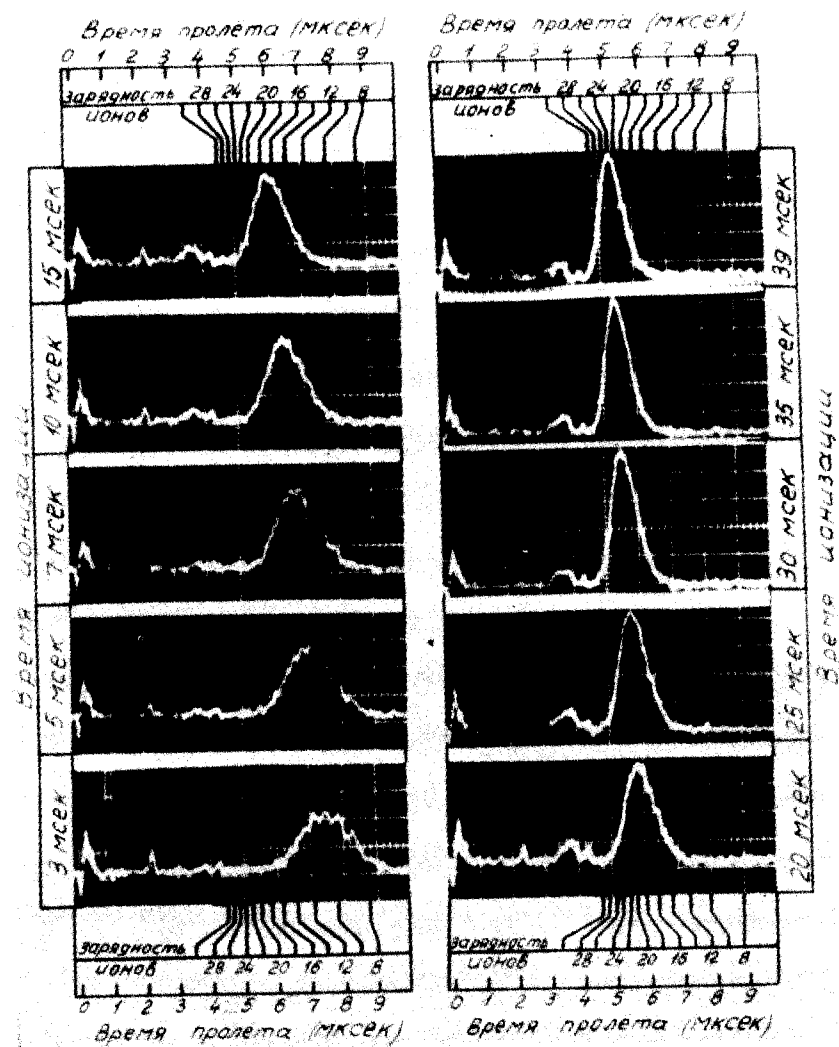


Рис. 2. Зависимость вида спектров зарядностей ионов ксенона от времени ионизации.

уровне фон обусловлен, в основном, поступлением в электронный пучок водорода H_2 и окиси углерода CO .

Однако уровень фона незначителен - около 5% и, таким образом, можно сказать, что экспериментально реализованы чистые условия для исследования сечений последовательной ионизации положительных ионов ксенона электрическим ударом вплоть до L-оболочки.

б/ Аргон

Эксперименты в зависимости от времени ионизации при электронном токе в 1 А и энергии - 2,3 кэВ были выполнены при использовании аргона в качестве рабочего газа. На рис. 3 показан спектр зарядностей, полученный к концу 39 миллисекунды процесса ионизации. Мы видим, что линия низшей зарядности ионов, еще не "выгоревших" к этому времени, - Ag^{+10} , но и она составляет лишь ~5 ÷ 7% от общей интенсивности ионного тока. Максимум интенсивности приходится на Ag^{+12} , отчетливо видна линия Ag^{+14} а линия Ag^{+15} теряется в фоне линий ионов углерода и кислорода. Здесь, в отличие от ксенона, практически весь ионный ток /~80%/ представлен лишь ионами трех зарядностей - Ag^{+11} , Ag^{+12} , Ag^{+13} . Это обусловлено, очевидно, близостью К-оболочки с энергией связи электронов, значительно превосходящей энергию бомбардирующих электронов.

а/ Азот, углерод

Азот и углерод являются теми элементами, ядра которых еще могут быть ускорены на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ при имеющихся энергии инжекции и вакууме в камере основного кольца. Поэтому работы на источнике "КРИОН" имеют первоочередную цель - получение пучков ядер азота и углерода.

На рис. 4 показан спектр ионов азота, полученный к концу 39 миллисекунды ионизации при токе электронов 0,9 А и энергии 2,1 кэВ. Видно, что спектр состоит из 3-х линий: ${}^7N^{+7}$, ${}^7N^{+6}$, ${}^7N^{+5}$, причем линия ядер ${}^7N^{+7}$ проявляется вполне определенно, хотя их доля в общем ионном токе составляет 5%, при количестве ~ $2 \cdot 10^9$ ядер/импульс. При увеличении электронного

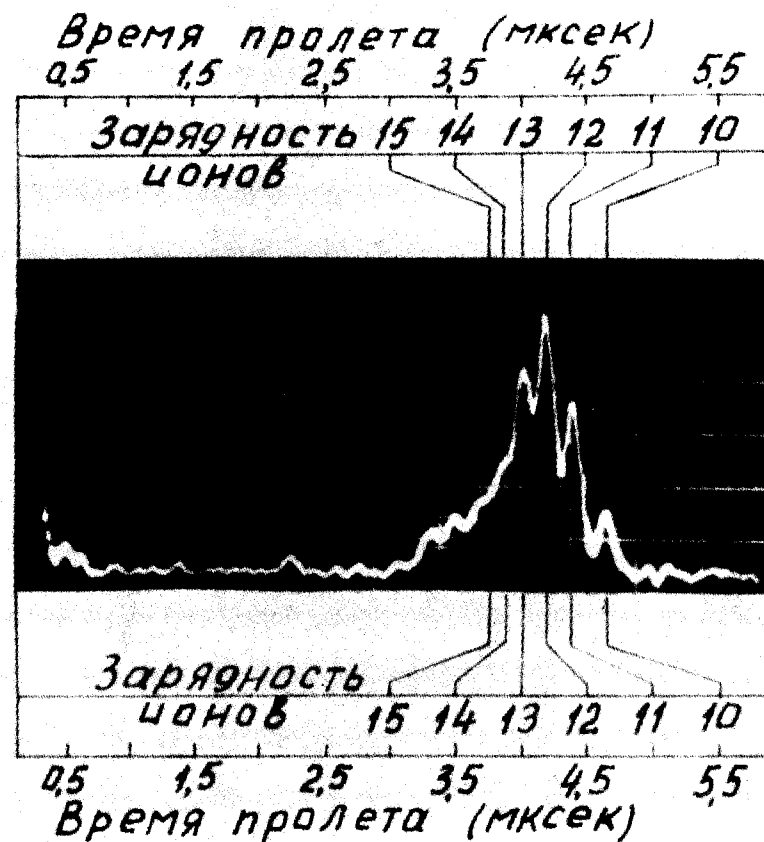


Рис. 3. Вид спектра зарядностей ионов аргона, полученный через 39 мсек ионизации.

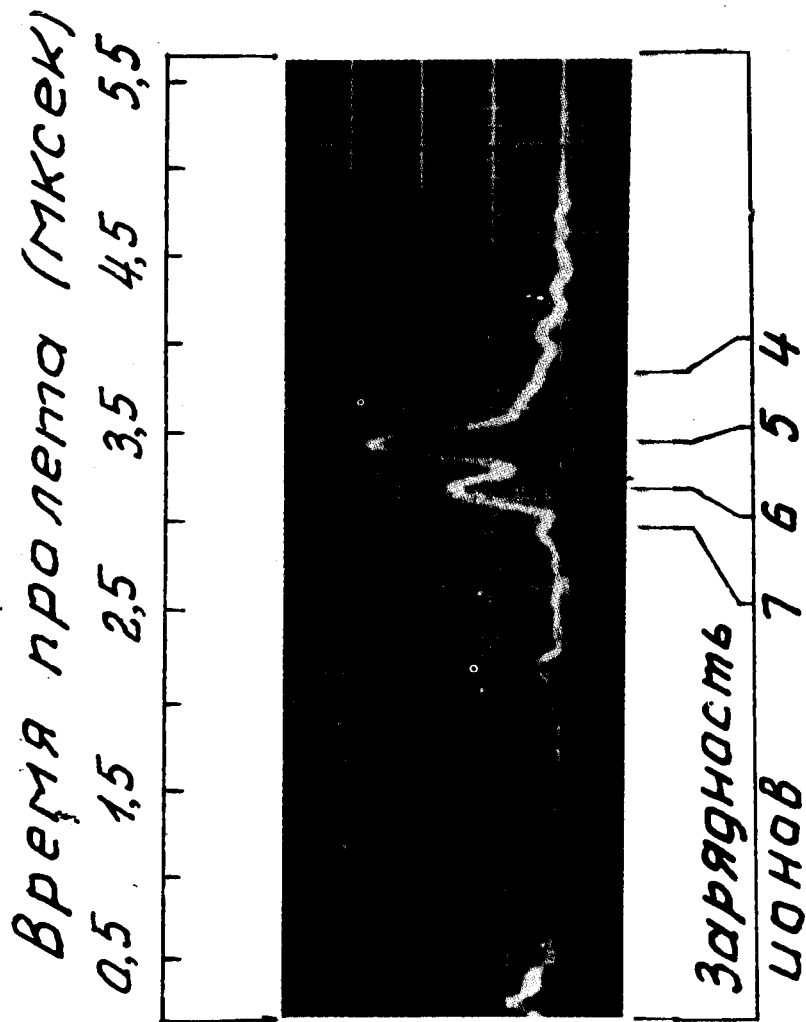


Рис. 4. Вид спектра зарядностей ионов азота, полученный через 39 мсек ионизации.

тока до 1,5 А доля ядер в спектре возрастает до 15%, а количество за импульс - до $\sim 10^{10}$.

Для углерода в качестве рабочего газа был использован этилен C_2H_4 . При этом спектры, аналогичные описанным выше спектрам ионов азота были получены за время ионизации, равное всего лишь 20 мсек.

5. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные результаты по изучению ионизации положительных ионов азота, аргона и ксенона представлены на рис. 5. Здесь на оси абсцисс отложено время ионизации при токе электронного пучка в 1 А, а по оси ординат - зарядность ионов, причем сплошной линией представлена зарядность в максимуме интенсивности ионного тока, а штриховой - максимальная зарядность на уровне не менее 10% от максимальной интенсивности.

Если считать, что основным процессом, приводящим к увеличению зарядности иона, является последовательная ионизация, т.е. при каждом столкновении происходит потеря ионом только одного электрона, то вид зависимостей на рис. 5 определяется зависимостью поперечного сечения последовательной ионизации $\sigma_{i \rightarrow i+1}$ от зарядности иона. В таком случае кривые рис. 5 являются источником информации как о величине сечений последовательной ионизации, так и об их зависимости от зарядности ионов при неизменной энергии бомбардирующих электронов, а именно: тангенс угла наклона сплошной кривой в данной точке пропорционален $\sigma_{i \rightarrow i+1}$, а зависимость тангенса угла наклона этой кривой от зарядности представляет собой зависимость $\sigma_{i \rightarrow i+1} = f(i)$. Конечно, при таком подходе к анализу результатов в значительной мере усредняются индивидуальности различных $i \rightarrow i+1$ - переходов, однако в качестве первого шага такой анализ вполне оправдан.

В частности, если принять сечение последовательной ионизации 10-зарядного иона ксенона за $1 (\sigma_{10 \rightarrow 11} = 1)$, то $\sigma_{15 \rightarrow 16} = 0,51$, $\sigma_{20 \rightarrow 21} = 0,33$; а $\sigma_{24 \rightarrow 25} = 0,27$.

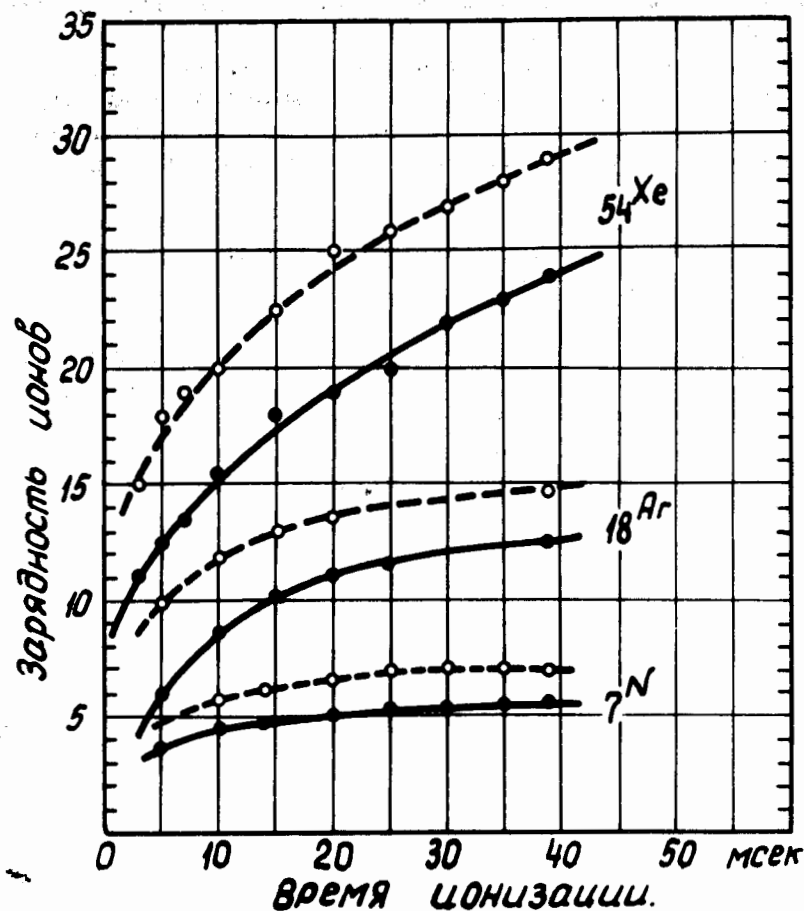


Рис. 5. Зависимость средней (●) и максимальной (○) зарядностей ионов азота, аргона, ксенона от времени ионизации.

Аналогично, для аргона, если $\sigma_{5 \rightarrow 6} = 1$, то $\sigma_{8 \rightarrow 9} = 0,57$, $\sigma_{10 \rightarrow 11} = 0,33$, $\sigma_{12 \rightarrow 13} = 0,12$; а для азота, если $\sigma_{3 \rightarrow 4} = 1$, то $\sigma_{5 \rightarrow 6} = 0,16$.

Очевидно, что зная плотность потока бомбардирующих электронов j , чрезвычайно просто вычислить и абсолютные значения сечений $\sigma_{i \rightarrow i+1}$.

К сожалению, точное значение эффективностей плотности потока электронов j нам пока не известно. Это связано со сложностью структуры электронного пучка столь высокого первеанса.

В предположении прямого электронного тока равномерной плотности для тока в 1 А $j = 1,8 \cdot 10^{20}$ эл/см²сек.

В таком случае нормировочные сечения приобретают следующие значения:

ксенон: $\sigma_{10 \rightarrow 11} = 5,5 \cdot 10^{-18}$ см²; аргон: $\sigma_{5 \rightarrow 6} = 4,5 \cdot 10^{-18}$ см²; азот: $\sigma_{3 \rightarrow 4} = 1,4 \cdot 10^{-18}$ см².

Приведенный выше простейший анализ результатов выполнен нами с единственной целью - указать на новые возможности, которыми обладает экспериментальная установка, подобная источнику "КРИОН", для исследования процессов ионизации положительных ионов в сравнении, например, с методикой, использующей пересекающиеся ион-электронные пучки.

Подробный анализ результатов будет выполнен в отдельной работе.

Кривые рис. 5 могут быть использованы для сравнения источника "КРИОН" с другими типами источников многозарядных ионов, в частности, с наиболее эффективным источником типа Пеннинга. Известно [11], что например, при ионизации ксенона в источнике типа Пеннинга максимум интенсивности ионного тока приходится на $6 \div 8$ зарядности. В источнике "КРИОН" такая средняя зарядность реализуется уже в первые 300-400 мсек ионизации. Это означает, что по фактору ионизации $j \tau$ источник "КРИОН" превосходит в настоящее время источник типа Пеннинга более чем в 100 раз.

На рис. 6 точками представлена зависимость средней и максимальной зарядностей ионов, полученных за время

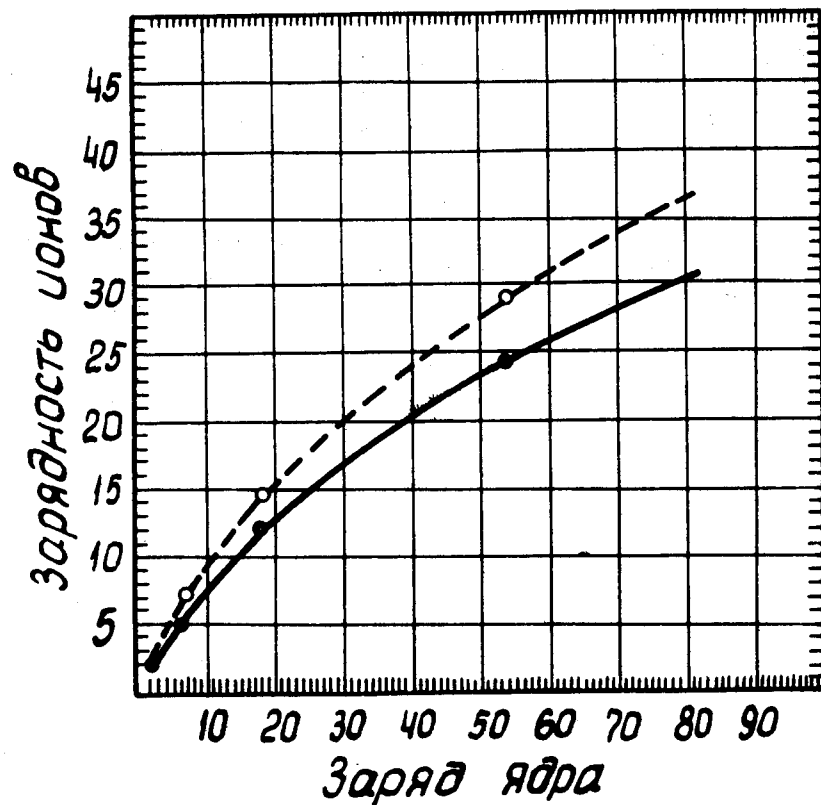


Рис. 6. Зависимость средней (●) и максимальной (○) зарядностей ионов, полученных за 39 мсек ионизации, от заряда ядра элемента.

ионизации 39 мсек, от заряда ядра элемента. Кривые, проведенные через эти точки, имеют плавный характер и могут быть использованы для оценки возможностей, которыми обладает источник "КРИОН" в настоящее время, по ионизации атомов других элементов. Видно, что для криптона, например, средняя зарядность составляет Kr^{+19} , максимальная - Kr^{+22} ; для свинца, соответственно, Pb^{+31} и Pb^{+37} , а для урана - U^{+32} и U^{+39} .

С другой стороны, понятно также, что в настоящее время последним элементом, для которого еще может быть получена заметная доля ядер в спектре зарядностей ионов является неон.

Параметры электронно-лучевого источника многозарядных ионов, достигнутые в настоящее время, конечно, не являются предельными. Для дальнейшего увеличения фактора $j\tau$, по-видимому, имеются еще очень широкие возможности. В частности, принципиально время ионизации τ может быть увеличено в несколько раз, т.к. фон составляет сейчас лишь небольшую часть от ионного тока. Очень перспективным является увеличение плотности потока электронов j , которая, в принципе, может быть увеличена в несколько десятков или даже в несколько тысяч раз.

Практически неограниченно для задач ионизации может быть увеличена энергия бомбардирующих электронов.

Таким образом, задача экспериментального достижения более высоких зарядовых состояний, вплоть до получения пучков ядер ксенона и даже свинца, висмута, не представляется в настоящее время неразрешимой.

В заключение мы выражаем глубокую благодарность члену-корреспонденту АН СССР А.М.Балдину, кандидату физико-математических наук И.Н.Семенюшкину, доктору технических наук Л.П.Зиновьеву, поддерживавшим и организовавшим работы по созданию и исследованию электронно-лучевого ионного источника в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Разработка криогенно-магнитной системы источника велась под руководством профессора А.Г.Зельдовича и при участии Ю.А.Шишова, которым мы также приносим нашу благодарность.

Мы искренне признательны нашим ближайшим коллегам: В.И.Илющенко за плодотворные дискуссии по различным аспектам затронутых проблем и за работы по созданию мощных электронных схем и систем регистрации и управления, В.П.Овсянникову за разработку электронной пушки и В.Г.Дудникову за разработку систем питания катода электронной пушки.

Мы признательны всем сотрудникам ЛВЭ ОИЯИ, чей труд способствовал успешному выполнению этой работы.

Литература

1. Е.Д.Донец. Авторское свидетельство 248860. Бюллетень "Открытия, изобретения...", 24, 1969.
2. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. Сообщение ОИЯИ, P7-4124, Дубна, 1968.
3. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. Сообщение ОИЯИ, P7-4469, Дубна, 1969.
4. E.D. Donets, V.I. Ilushchenko, V.A. Alpert. Premiere Conf. Int. sur sources d'ions, Saclay, I.N.S.T.N., 1969.
5. В.А.Альперт, Е.Д.Воробьев, Е.Д.Донец, В.И.Илющенко. Труды второго Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1, 119, Москва, 1972.
6. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт, Е.Д.Воробьев, А.И.Пикин. Материалы Международной конференции по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-5769, Дубна, 1971.
7. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. Авторское свидетельство 375708, Бюллетень "Открытия, изобретения..." 16, 1973.
8. В.И.Илющенко, Ю.К.Карягин, В.Л.Степанюк. Сообщение ОИЯИ, 13-7772, Дубна, 1974.
9. В.И.Илющенко, Н.Н.Пляшкевич, В.Л.Степанюк. Сообщение ОИЯИ, 13-6675, Дубна, 1972.
10. В.И.Илющенко, Р.Б.Кадыров, В.Л.Степанюк. Сообщение ОИЯИ, 13-7771, Дубна, 1974.
11. А.С.Пасюк, Ю.П.Третьяков, С.К.Горбачев. АЭ, 24, 21 /1968/.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 июня 1974 года.