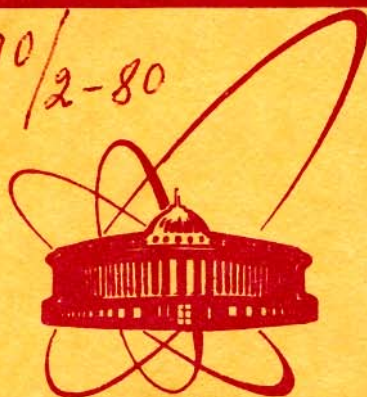


490/2-80



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

4/2-80

P7 - 12905

Е.Д.Донец, В.П.Овсянников, В.Г.Дудников

ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ Xe^{48+}

В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ИОНИЗАТОРЕ "КРИОН-2"

1979

P7 - 12905

Е.Д.Донец, В.П.Овсянников, В.Г.Дудников

ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ Xe^{48+}

В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ИОНИЗАТОРЕ "КРИОН-2"

Донец Е.Д., Овсянников В.П., Дудников В.Г. P7 - 12905

Получение ионов Xe^{48+} в электронно-лучевом
ионизаторе "КРИОН-2"

В криогенном электронно-лучевом ионизаторе "КРИОН-2" достигнут фактор ионизации /произведение плотности потока электронов на время взаимодействия с ионами/ $\sim 2,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ при энергии электронов ~ 18 кэВ. В этих условиях выполнены эксперименты по ионизации природной смеси изотопов ксенона. При этом впервые в ионном источнике ионизирована L-оболочка ксенона и получен пучок ионов Xe^{48+} .

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Donets E.D., Ovsyannikov V.P., Dudnikov V.G. P7 - 12905

Production of Xe^{48+} ions in the "KRION-2"
Electron Beam Ionizer

An ionization factor of $2.5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$, the product of the beam electron density and the time of electron-ion interaction, has been achieved in the "KRION-2" cryogenic electron beam ionizer at an electron energy of 18 keV. A series of experiments on the ionization of natural mixture of xenon isotopes have been carried out in these conditions. The L-shell of xenon first has been ionized and Xe^{48+} ions have been 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 1979

1. ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевой ионизатор "КРИОН-2" ^{1/} предназначен для стендовых экспериментов по исследованию возможностей применения плотных электронных пучков с целью глубокой ионизации атомов. Ранее сообщалось ^{2-4/} о получении в этом ионизаторе пучков ядер углерода, азота, кислорода, неона и аргона, а также ионов Kr^{+34} и He^{+44} . При этом достигался фактор ионизации до 10^{21} см^{-2} и энергия ионизирующих электронов $E_e \leq 8,5 \text{ кэВ}$.

Для продвижения в область более высокозарядных ионов необходимо, наряду с увеличением фактора ионизации, существенно увеличить энергию электронов E_e . Так, для ионизации L-оболочки ксенона требуемая оптимальная энергия электронов составляет ~ 20 кэВ.

Ниже кратко описаны экспериментальная установка, способ увеличения энергии электронного пучка и эксперименты по ионизации ксенона, приведшие к получению пучка углеродоподобного ксенона (Xe^{48+}). Дан качественный анализ результатов этих экспериментов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка "КРИОН-2", как и ранее ^{1/}, состояла из следующих основных элементов: электронной пушки с катодом, имеющим диаметр эмиттирующей поверхности 0,8 мм, структуры секций трубки дрейфа с диаметром 3 мм и общей длиной 1200 мм, фокусирующего соленоида длиной 1200 мм со значением индукции в регулярной области ($B_{\text{макс.}}$) = 2,25 Тл, выходной ионно-электронной оптики, системы подачи рабочего газа в электронный пучок, анализатора зарядностей ионов по времени пролета с базой 3,3 м и криогенной вакуумной системы.

Электронная пушка /ЭП/ была расположена в области спадающего естественным образом магнитного поля соленоида при значении индукции (B_K), равной $1/6$ от $B_{\text{макс.}}$. Это обеспечива-

ло шестикратную магнитную компрессию электронного пучка по площади.

На рис. 1 изображена блок-схема электрического питания электронной и ионно-оптической систем ионизатора "КРИОН-2".

Модулятор электронного пучка /МЭП-3/^{15/ с управлением электронным пучком при помощи вариации потенциала анода ЭП имел внутренние источники питания, обеспечивающие потенциал катода ЭП в интервале отрицательных значений $0 \div 8$ кВ и импульсы электронного тока в интервале времени $0,01 \div 2,1$ с.}

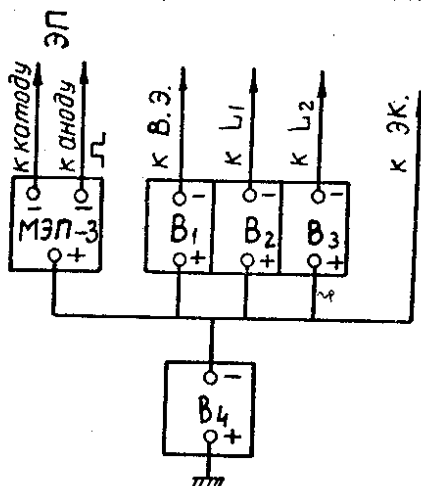


Рис. 1. Схема электрического питания электронно-ионно-оптической системы ионизатора "КРИОН-2".

Вместе с выпрямителями, питающими вытягивающий электрод (V_1) и линзы L_1 и L_2 выходной оптики (V_2) и (V_3), модулятор МЭП-3 располагался на изолированной платформе, присоединенной к отрицательному полюсу выпрямителя V_4 , положительный полюс которого был заземлен. К этой же платформе через измерительное сопротивление 10 Ом присоединялся электронный коллектор ионизатора.

Электрическая мощность для питания источников, расположенных на платформе, подавалась через разделительный трансформатор, а управляющие сигналы - через линию оптико-электронной связи.

Электрическое питание секций трубки дрейфа и вариация их потенциалов для управления движением ионов, как и ранее, осуществлялись от электронного коммутатора ^{16/}, корпус которого находился на земляном потенциале, так что средний потенциал трубок дрейфа был -1 кВ.

Рассмотренная выше система обеспечивала энергию электронного пучка E_e в области трубок дрейфа ~ 9 кэВ, при нулевом значении напряжения на платформе. Дальнейшее повышение E_e производилось с помощью понижения потенциала платформы,

и энергия пучка могла достигать 20 кэВ. Так как электронный коллектор "КРИОН-2" также был соединен с платформой, то увеличение энергии электронного пучка не приводило в этом случае ни к увеличению потребления энергии пучком, ни к возрастанию мощности, рассеиваемой на коллекторе.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты по ионизации ксенона ставились с целью получения пучков ионов с зарядностями выше, чем $44+$. Как следует из таблиц Т.Карлсона и др. ^{17/}, энергия связи электронов (I_e) в L-оболочке 44-кратно ионизованного атома ксенона достигает ~ 8 кэВ. Известно также ^{18/}, что эффективное удаление связанного электрона в процессе электрон-ионного взаимодействия происходит в случае, если бомбардирующий электрон обладает энергией $\sim 2,5 I_e$.

Поэтому эксперименты производились при энергиях электронного пучка 18-20 кэВ.

В качестве рабочего газа использовалась естественная смесь изотопов ксенона, так что среднее значение массового числа при анализе спектров зарядностей по времени пролета было 131,3.

Калибровка время-пролетного анализатора была осуществлена по ионам кислорода от 0^{1+} до 0^{8+} .

Типичный режим работы ионизатора при работе с ксеноном был следующим: включение электронного пучка, ток ~ 120 мА /что соответствует плотности тока в пучке ~ 150 А/см² /, ввод $\sim 10^8$ ионов ксенона в пучок за время ~ 1 мс, удержание ионов в пучке и их ионизация в течение определенного времени t_i /до 2,2 с/, вывод ионов из пучка за время ~ 50 мкс, анализ зарядового состава ионов по времени пролета. Спектры зарядностей ионов, соответствующие различным периодам времени удержания ионов в электронном пучке, регистрировались на экране осциллографа и фотографировались.

На рис. 2 представлена картина эволюции спектра зарядностей ионов ксенона в интервале времени ионизации от 2 мс до 2,1 с.

Мы видим, что линии соседних зарядностей ионов ксенона достаточно хорошо разрешены лишь на первом снимке, при времени ионизации ~ 2 мс. В дальнейшем разрешение оказывается недостаточным, и в конце концов линии всех зарядностей, присутствующих в данном ионном сгустке, сливаются в один пик. Причинами недостаточно хорошего разрешения являются, во-первых, использование природной смеси изотопов, а во-вторых, свойства динамики ионного пакета в самом анализаторе. В та-

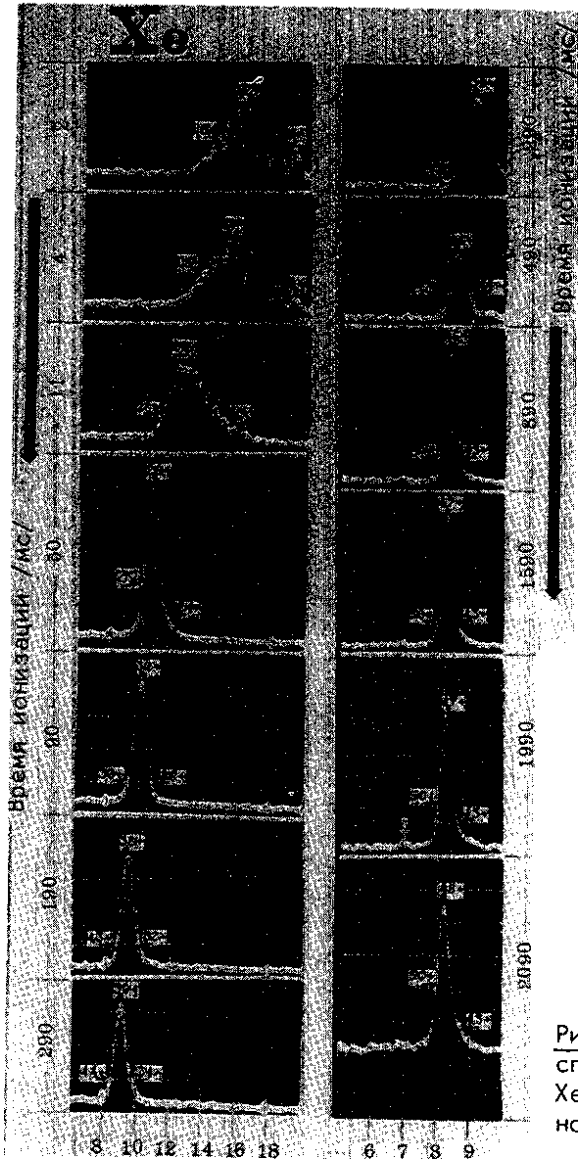


Рис.2. Картина эволюции спектра зарядностей ионов Хе при энергии электронного пучка 18 кэВ.

Время пролета /мкс/ Время пролета /мкс/

ких условиях для правильной идентификации зарядностей, присутствующих в ионном пакете, мы использовали: 1/ предварительную калибровку анализатора по ионам кислорода, 2/ положение на оси времени пролета хорошо разрешающихся линий относительно низких зарядностей Хе до Хе¹⁵⁺, 3/ положение

низкоинтенсивного, но достаточно ясно выраженного пика ядер фоновых газов с $A/Z = 2$ /см. пик, указанный стрелкой на снимке $\tau_1 = 1990$ мс/.

На снимках идентифицированы зарядности ионов Хе в максимуме интенсивности, а также в двух точках слева и справа от максимума, что качественно дает число зарядностей в спектре. Поправки на расширение линий за счет наличия нескольких изотопов Хе в природной смеси и аппаратурную ширину линии для одной зарядности дают уменьшение числа зарядностей в спектре на 1 ± 2 .

Снимок при времени ионизации 2090 мс показывает, что в этом случае максимум интенсивности в ионном сгустке приходится на ионы Хе $^{48+}$, т.е. на углеродоподобный ксенон. Анализ представленного здесь пика показывает, что соответствующий сгусток состоит в основном из ионов зарядностей $48+$, $47+$ и $49+$, а также $50+$ и $46+$. Количество ионов ксенона измерялось с помощью ионного коллектора, снабженного охраняемым цилиндром с отрицательным, относительно коллектора, потенциалом. При этом наблюдаются некоторые занижения ионного сигнала за счет вторичной ионной эмиссии с поверхности коллектора. Это явление требует разработки специальных устройств для регистрации столь высокозарядных ионов, какими являются ионы типа Хе $^{48+}$. В настоящее время мы можем лишь оценить, по-видимому, с некоторым занижением, количество ионного заряда в сгустке при времени ионизации 2090 мс, как 10^9 эл.зарядов/имп. Это означает, что Хе $^{48+}$ получено $\sim 10^7$ ионов/имп. и \sim по $5 \cdot 10^6$ ионов Хе $^{49+}$ и Хе $^{47+}$.

Фоновые газы представлены в спектрах весьма слабо смесью зарядностей, имеющих $A/Z = 2$ при количестве, не превышающем 5% ионного заряда рабочего газа, что соответствует эффективному значению давления остаточного газа в объеме ионизации менее 10^{-12} Торр.

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленная на рис. 2 картина эволюции спектра зарядностей может быть использована для качественной оценки эффективных поперечных сечений ионизации положительных ионов ксенона электронным ударом при $E_e = 18$ кэВ. Недостаточно хорошее разрешение по зарядности не позволяет найти точную модель ионизации и найти отдельно сечения одно- и много-электронной ионизации. Однако в предположении справедливости модели последовательной ионизации из экспериментальной картины возможно извлечь эффективные значения сечений в этой модели.

На рис. 3 показана зависимость значения зарядности ионов ксенона /в максимуме интенсивности/ от времени ионизации τ_i . Если считать условием увеличения зарядности иона на единицу соотношение $\sigma_{i \rightarrow i+1} j \tau = 1$ /где j - число электронов пучка, пронизывающее в секунду 1 см^2 ионной мишени, τ - время электрон-ионного взаимодействия/, означающее единичную вероятность столкновения электрона с ионом при эффективном поперечном сечении $\sigma_{i \rightarrow i+1}$, то из графика рис. 3 легко получить зависимость $\sigma_{i \rightarrow i+1}$ от Z , где Z - зарядность иона. На рис. 4 кривой В представлена эта зависимость. Конечно, при таком

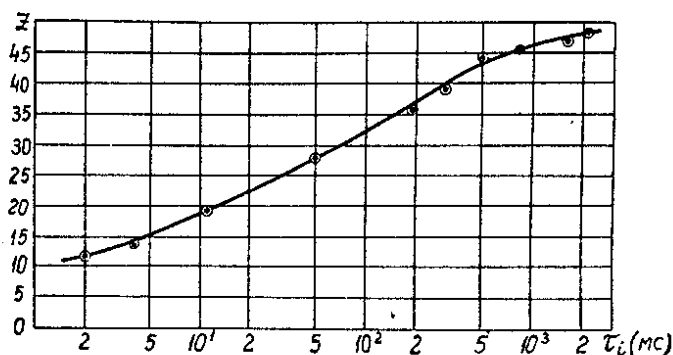


Рис. 3. Зависимость средней зарядности ионов ксенона от времени ионизации при $E_e = 18$ кэВ.

подходе в значительной мере теряются нерегулярности, связанные с наличием оболочек. Кроме того, как указывалось выше, полученные значения эффективных сечений ионизации несут в себе неточности, связанные с неполнотой модели ионизации.

Тем не менее, значения $\sigma_{i \rightarrow i+1}$ для столь большого числа высокозарядных ионов ксенона при энергии $E_e = 18$ кэВ получены экспериментально и могут представлять определенную ценность в первую очередь для дальнейшего развития работ по ионизации.

Любопытно сравнить картину эволюции спектра зарядностей ионов ксенона при $E_e = 18$ кэВ с аналогичной картиной из работы /4/, полученной нами при энергии электронов 8,5 кэВ. В обоих случаях использовалась одна и та же плотность тока электронного пучка.

Обращает на себя внимание, что при относительно низких зарядностях при $E_e = 18$ кэВ спектры эволюционируют ~ в 2 раза медленнее, в то время как при подходе к $Z \approx 44$ темп изменения

зарядности от времени ионизации становится при этой энергии выше, чем при $E_e = 8,5$ кэВ.

Естественное объяснение этих явлений состоит в том, что для относительно низких зарядностей там, где отношение $E_e/I_e \gg 1$, эффективное сечение ионизации убывает, примерно, как E_e , а для высоких зарядностей при $E_e = 18$ кэВ включаются в процесс ионизации 8 электронов L-оболочки, заметно увеличивая сечения ионизации. Эти качественные соображения подтверждаются кривой А /рис. 4/, полученной из экспериментальной эволюции спектра зарядностей ионов ксенона при $E_e = 8,5$ кэВ ^{14/}.

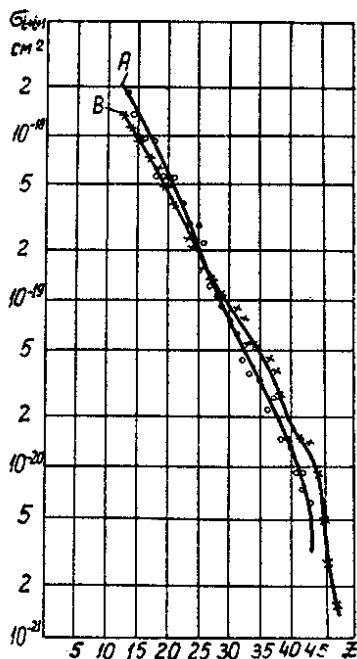


Рис. 4. Зависимости величин эффективных поперечных сечений ионизации положительных ионов ксенона от зарядности ионов, полученные в предположении справедливости модели последовательной ионизации А — $E_e = 8,5$ кэВ; В — $E_e = 18$ кэВ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные эксперименты показали, что в ионизаторе "КРИОН-2" возможности электронно-лучевого метода ионизации по-прежнему не исчерпаны. Увеличение энергии ионизации и времени ион-электронного взаимодействия приводит к соответствующему увеличению зарядности ионов, показывая, что процесс все еще идет в одном направлении. Процессы, обратные ионизации, подавлены. Это позволяет надеяться на получение

еще более высокозарядных ионов, в частности, гелиеподобного ксенона (Xe^{+52}).

В заключение авторы выражают глубокую благодарность члену-корреспонденту АН СССР А.М.Балдину за интерес к работе и всестороннюю поддержку развиваемого нами направления исследований, кандидату физико-математических наук И.Н.Семенову и доктору технических наук Л.П.Зиновьеву за полезные обсуждения и содействие, оказанное нам при выполнении работы.

Мы благодарны также нашим коллегам и помощникам В.П.Вадеву, В.В.Сальникову, А.П.Суслову и И.К.Джакупову за большой практический вклад в подготовку и выполнение экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-9799, Дубна, 1976.
2. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-10438, Дубна, 1977.
3. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-10780, Дубна, 1977.
4. Блинников Н.Н. и др. ОИЯИ, 9-12409, Дубна, 1979.
5. Вадеев В.П. и др. ОИЯИ, Р7-10823, Дубна, 1977.
6. Dudnikov V.G. Nucl. Instr. & Meth., 1978, 157, No.2.
7. Carlson T.A. et al. Atomic Data, 1970, v.2, No.1.
8. Janes G.S. et al. Phys.Rev., 1966, 145, p.925.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 ноября 1979 года.