

4166 / 2-77

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



174-77

P7 - 10780

Д-672

Е.Д.Донец, В.П.Овсянников

ИОНИЗАЦИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ АЗОТА,
КИСЛОРОДА, НЕОНА И АРГОНА
ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

1977

P7 - 10780

Е.Д.Донец, В.П.Овсянников

ИОНИЗАЦИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ АЗОТА,
КИСЛОРОДА, НЕОНА И АРГОНА
ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

*Направлено на X Международную конференцию по физике
электронных и атомных столкновений, Париж, 1977.*

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Донец Е.Д., Овсянников В.П.

P7 - 10780

Ионизация положительных ионов азота, кислорода, неона и аргона электронным ударом

При использовании электронно-лучевого ионного источника "Крион-2" получены экспериментально картины эволюции спектров зарядностей следующих ионов азота, кислорода и аргона в следующих областях энергии ионизирующих электронов $N^{+2} \div N^{+7}$, $0,6 \leq E_e \leq 5,5$ кэВ; $O^{+2} \div O^{+8}$, $1,8 \leq E_e \leq 5,1$ кэВ; $Ar^{+2} \div Ar^{+18}$, $2,0 \leq E_e \leq 6,8$ кэВ и неона $Ne^{+2} \div Ne^{+10}$ при $E_e = 2,5$ кэВ.

Экспериментальные данные обработаны на ЭВМ с использованием модели последовательной ионизации. Показано, что эта модель удовлетворительно описывает основной процесс ионизации для всех случаев, за исключением случая электронов M-оболочки Ar, где требуется учёт многоэлектронной ионизации.

Получены энергетические зависимости сечений одноэлектронной ионизации указанных ионов и произведено сравнение с теорией.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергия ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Donets E.D., Ovsyannikov V.P.

P7 - 10780

Ionization of the Positive Ions of N, O, Ne, and Ar by Electron Impact

Using the electron beam ion source "Krion-2" the evolutions of the N, O and Ar ion charge state distributions have been measured for the following ions in the following regions of an electron energy E_e : $N^{+2} \div N^{+7}$ $0,6 \leq E_e \leq 5,5$ KeV; $O^{+2} \div O^{+8}$ $1,8 \leq E_e \leq 5,1$ KeV; $Ar^{+2} \div Ar^{+18}$ $2,0 \leq E_e \leq 6,8$ KeV and also for $Ne^{+2} \div Ne^{+10}$ ions under $E_e = 2,5$ KeV. The experimental evolution functions were handled by means of computer in the single electron ionization approximation. It was found that this approximation reflects adequately the main ionization process for K- and L-shells of the elements under investigation. The process of Ar M-shell ionization is more complicated and there is the necessity to use the multi-electron ionization approximation.

The cross section functions of the N, O and Ar positive ions have been determined. The experimental cross section functions are compared with the theoretical ones.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

I. ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени основным методом измерения эффективных поперечных сечений ионизации положительных ионов электронным ударом был метод пересекающихся ион-электронных пучков^{/1/}. В последнее десятилетие успешно развиваются другие методы, основанные на использовании электростатических ловушек, для увеличения эффективного времени взаимодействия электронов с ионной мишенью^{/2-4/}. В этом случае появляется возможность исследовать процессы со значительно меньшими поперечными сечениями и использовать более высокозарядные ионы в качестве мишеней.

В ОИЯИ развивается методика ионизации положительных ионов электронным ударом при удержании ионов пространственным зарядом протяженного плотного электронного пучка^{/5,6/}. Созданные на основе этого принципа электронно-лучевые ионные источники "КРИОН-1" и "КРИОН-2" производят ионы весьма высоких зарядностей. Импульсный характер работы источников позволяет измерять сечения ионизации ионов электронным ударом. В частности, ранее сообщалось об исследовании ионизации ионов C, N^{/7/} и Ar^{/8/} на источнике "КРИОН-1" при фиксированных энергиях электронов. Ниже дано краткое изложение таких исследований, выполненных на источнике "КРИОН-2"^{/9/}.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1а представлена схема внутренней части источника "КРИОН-2" и масс-спектрометра по времени пролета. Электронная 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. На входе в масс-спектрометр имеется дополнительный подвижный ионный коллектор 8.

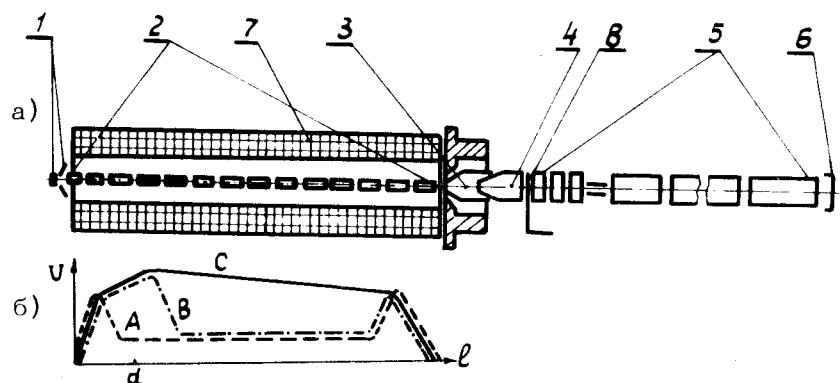


Рис. 1. а) схема внутренней части источника "КРИОН-2" и масс-спектрометра по времени пролета. б) схема распределения потенциалов вдоль оси электронного пучка. Точка d - место прохождения электронного пучка через область газа исследуемого элемента.

Рабочий цикл ионного источника следующий: 1) включение электронного пучка; 2) ввод низзарядных ионов исследуемого элемента в электронный пучок (0,5-1 мс); 3) удержание ионов в пучке и их ионизация (0,1-500 мс); 4) извлечение ионов из электронного пучка в продольном направлении (10-50 мкс); 5) анализ спектра зарядностей ионов по времени пролета; 6) выключение электронного пучка. Управление процессом ввода ионов, их удержанием

и движением в аксиальном направлении осуществляется при помощи трех различных распределений электрического потенциала вдоль оси электронного пучка, которые задаются внешними источниками питания, соединенными с секциями трубки дрейфа (рис. 1б). Распределение А соответствует вводу; электростатическая ловушка создается практически на всей длине электронного пучка, включая место его прохождения через область газа рабочего элемента. Распределение В соответствует ионизации: место ввода ионов отсечено потенциальным барьером от электростатической ловушки, содержащей ионы исследуемого элемента. Распределение С соответствует экстракции ионов: все ионы из ловушки покидают ее в направлении выхода из источника и попадают в систему анализа.

Основные параметры источника "КРИОН-2" следующие.

Энергия ионизирующих электронов	$0,5 \leq E_e \leq 7,0$ кэВ.
Диаметр электронного пучка	$\sim 0,3$ мм.
Плотность электронного пучка	$j_e \leq 200$ А/см ² .
Время взаимодействия ионов с электронным пучком	$0,1 < \tau < 500$ мс.
Линейный размер пространства ионизации	$L \sim 100$ см.
Магнитное поле фокусирующего соленоида	$B = 2,25$ Тл.
Давление остаточного газа в области ионизации	$P \leq 10^{-12}$ Тор.
Максимальное значение произведения плотности потока электронов пучка j на время ион-электронного взаимодействия τ равно	$\sim 3 \cdot 10^{20}$ см ⁻² .
Пролетная база масс-спектрометра	~ 330 см.

В источнике ионов для получения сверхнизких давлений и однородного магнитного поля с высоким значением индукции используется криогенная техника.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Первичная информация

Первичным экспериментальным материалом являлись осциллограммы спектров зарядностей ионов данного элемента, полученные через различные промежутки времени после начала процесса ионизации. Спектры зарядностей регистрировались фотографированием с экрана осциллографа. На основе первичного материала делалось построение картины эволюции спектра зарядностей в зависимости от количества электричества электронов, прошедших через ионную мишень (q_e).

На рис. 2-4 приведены примеры эволюций спектров зарядностей ионов N, O и Ar, полученные при соответствующих энергиях электронов. Количество электричества электронов (q_e) измерялось в единицах А·мс. 1 А·мс соответствует прохождению $7,6 \cdot 10^{18}$ электронов через 1 см^2 ионной мишени. По оси ординат на рис. 2-4 отложены величины P_i - количества ионов данной зарядности в спектре (в долях единицы). В верхних частях рис. 2-4 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.

Эволюции спектров зарядностей были получены экспериментально при нескольких значениях энергии ионизирующих электронов в следующих областях энергий: N - $0,6 \leq E_e \leq 5,5 \text{ кэВ}$; O - $1,8 \leq E_e \leq 5,1 \text{ кэВ}$; Ar - $2,0 \leq E_e \leq 6,8 \text{ кэВ}$; Ne - $E_e = 2,5 \text{ кэВ}$.

2. Модели процесса ионизации и нахождение эффективных поперечных сечений

Естественно считать, что эволюция спектра зарядностей ионной мишени, находящейся в электронном пучке, непосредственно связана с участвующими в процессе

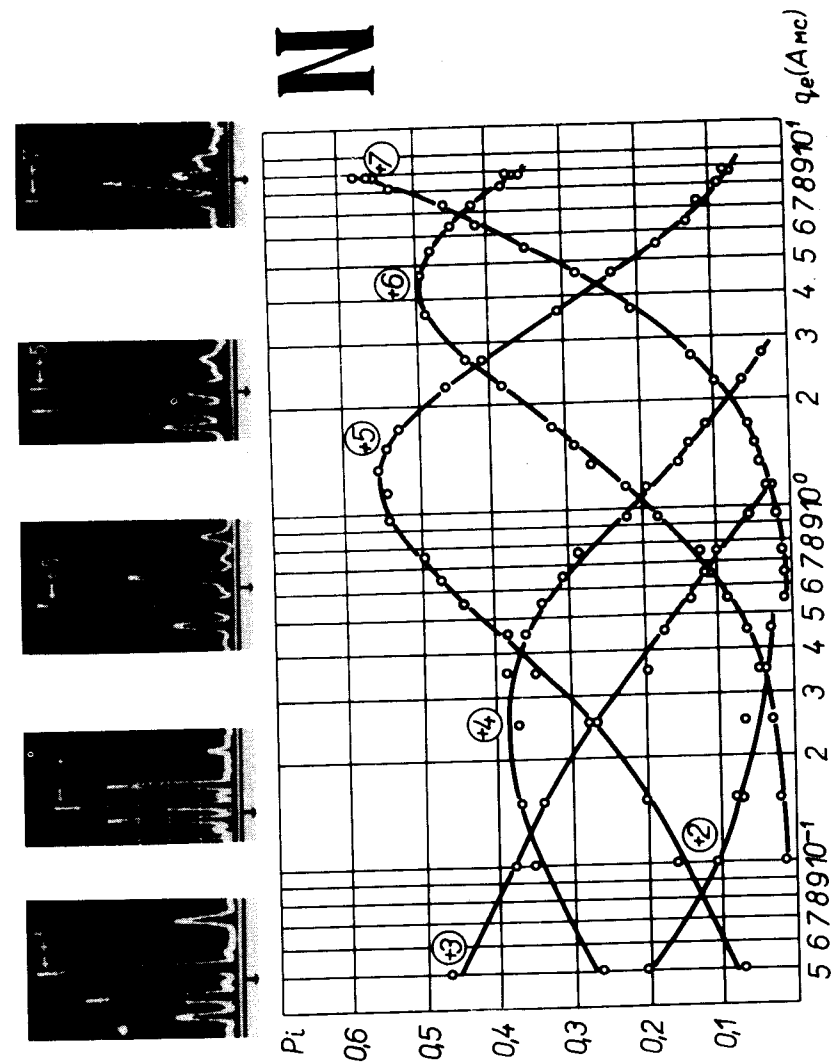


Рис. 2. Эволюция спектра зарядностей ионов азота при $E_e = 5,6 \text{ кэВ}$.

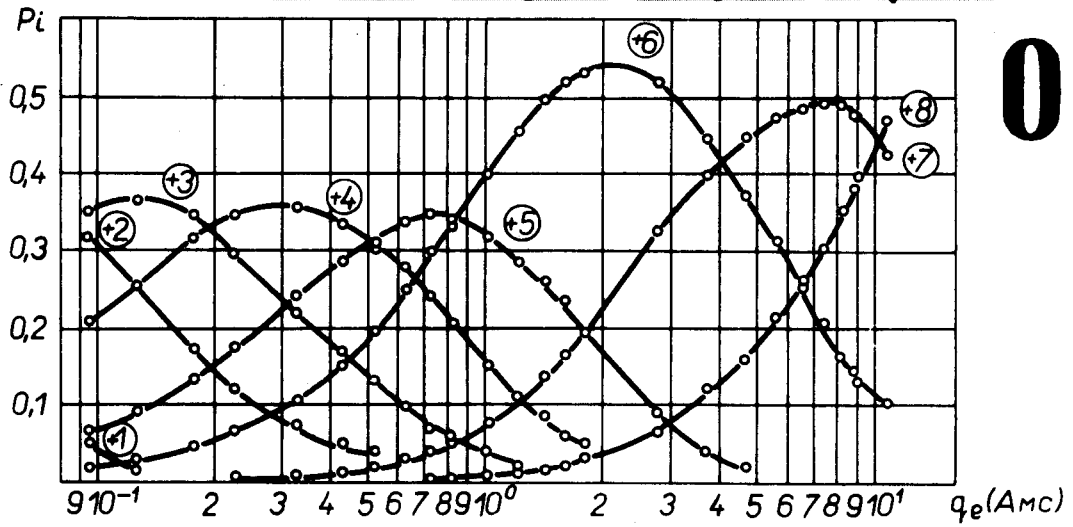
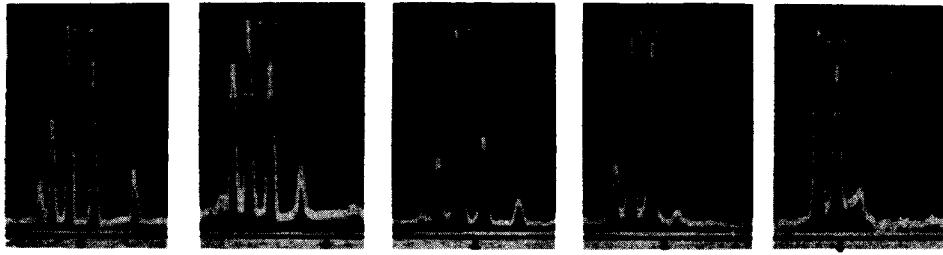


Рис. 3. Эволюция спектра зарядностей ионов кислорода при $E_e = 5,1$ кэВ.

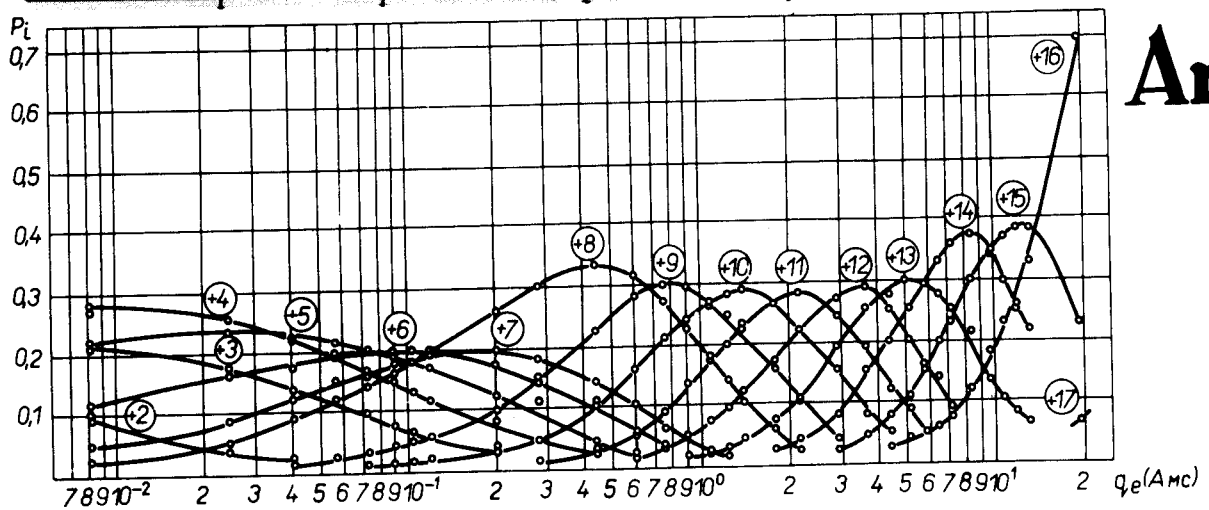
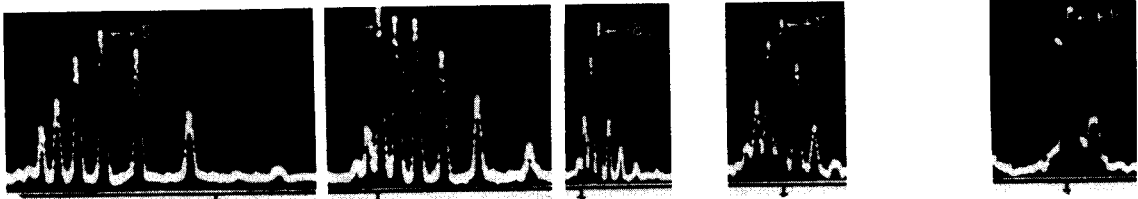
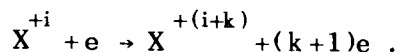


Рис. 4. Эволюция спектра зарядностей ионов аргона при $E_e = 4,8$ кэВ.

механизмами ионизации и величинами их поперечных сечений.

Если не интересоваться деталями механизма ионизации, то, пользуясь общепринятыми обозначениями, процесс увеличения на величину k зарядности иона X^{+i} записывается следующим образом:



Картина эволюции спектра зарядностей, полученная при заданном значении E_e , содержит информацию об эффективных поперечных сечениях увеличения на число k зарядностей всех участвующих в данной эволюции ионов ($\sigma_{i \rightarrow i+k}$).

Поскольку экспериментально измеряются функции $P_i = f(jr)$, то задача обработки сводится к нахождению такого набора $\sigma_{i \rightarrow i+k}$, который дает согласие восстановленной эволюции и полученной экспериментально с наименьшим отклонением по всем точкам.

В простейшем случае последовательной ионизации ($k=1$ и $X^{+i} + e \rightarrow X^{+(i+1)} + 2e$), когда на каждой ступени удаляется лишь один электрон, кинетическое уравнение, описывающее процесс, имеет простейший вид:

$$\frac{dP_i}{d(jr)} = P_{i-1} \sigma_{i-1 \rightarrow i} - P_i \sigma_{i \rightarrow i+1} .$$

На основе известной программы решения нелинейных систем уравнений^{/10/} была разработана подпрограмма нахождения сечений по модели последовательной (одноэлектронной) ионизации. Оказалось, что экспериментальные картины эволюций спектров зарядностей для всех ионов азота, кислорода, и неона, а также ионов аргона, от Ar^{+8} до Ar^{+17} , хорошо совпадают с восстановленными при использовании простейшей модели одноэлектронной ионизации. На рис. 5-7 для N, O и Ar соответственно показаны сплошными кривыми восстановленные картины эволюций спектров зарядностей, полученные при соответствующих наборах эффективных сечений $\sigma_{i \rightarrow i+1}$ в модели одноэлектронной ионизации. Наблюдается хоро-

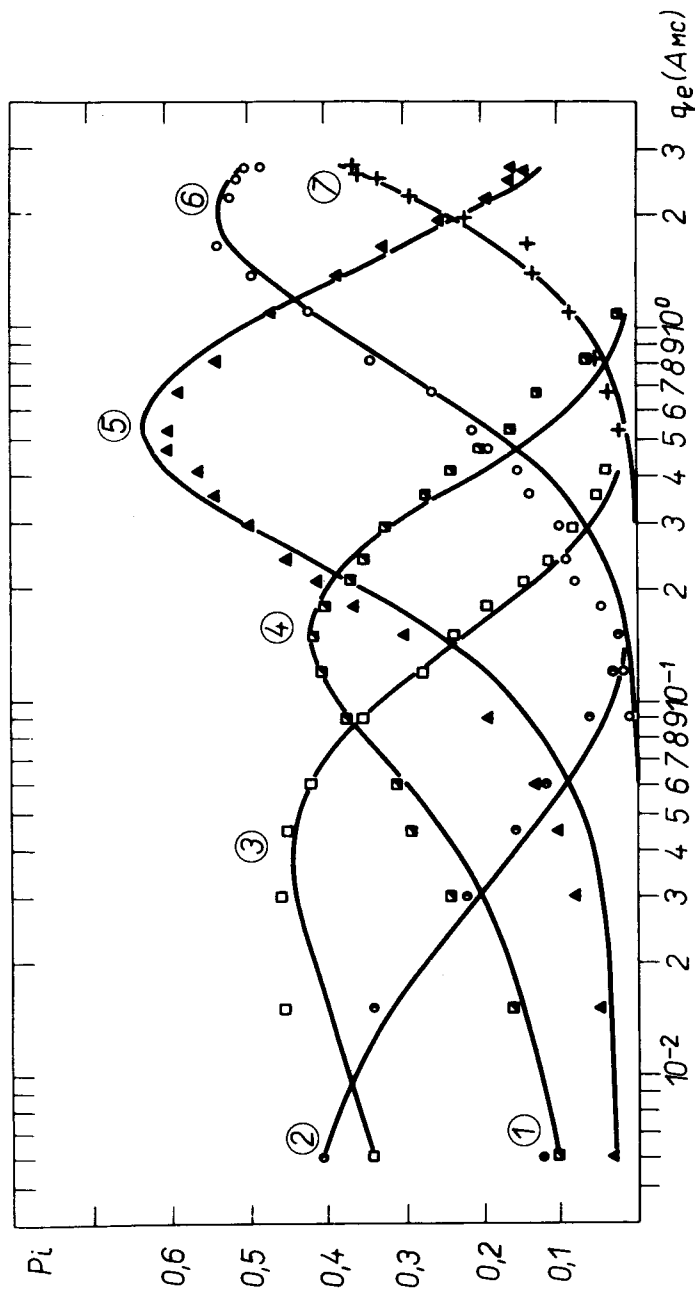


Рис. 5. Пример воспроизведения экспериментальной картины эволюции спектра зарядностей ионов азота при соответствующем наборе значений $\sigma_{i \rightarrow i+1}$.

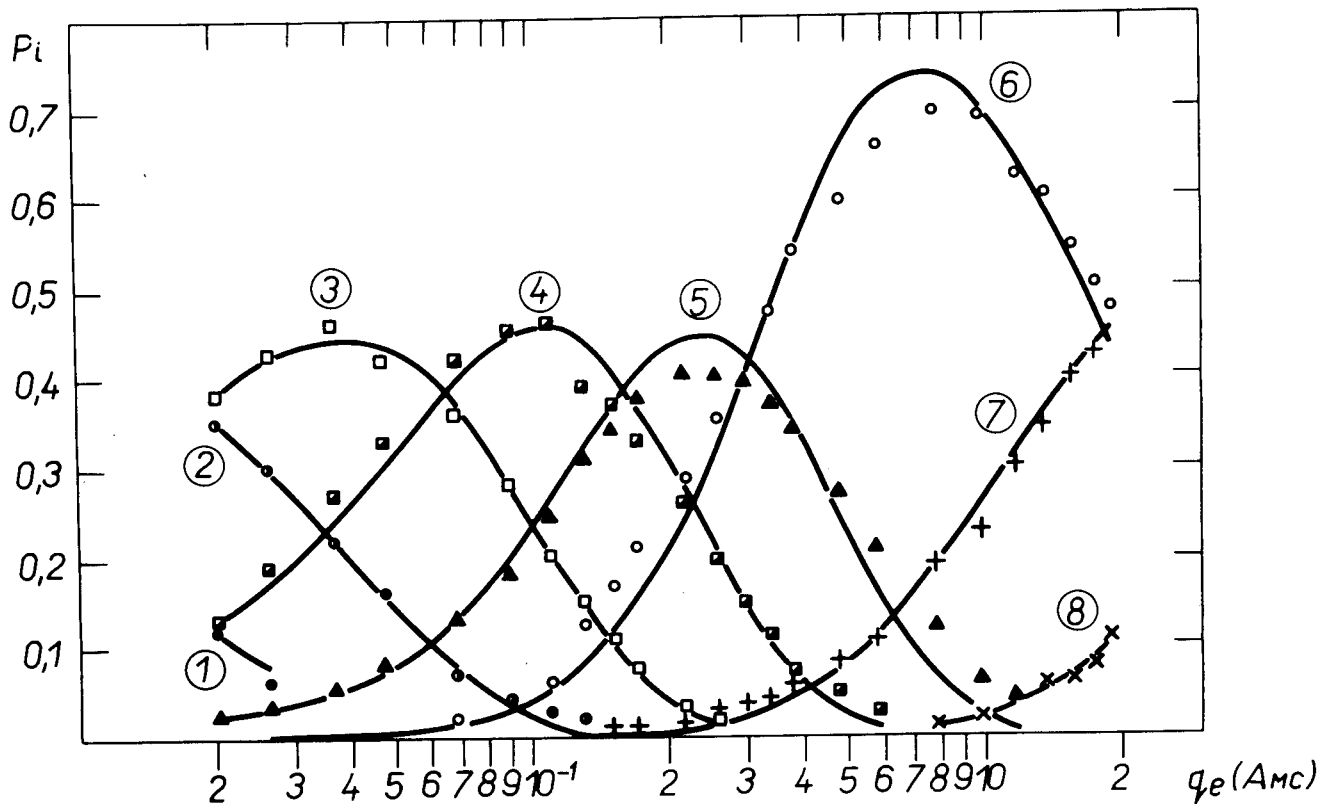


Рис. 6. Пример воспроизведения экспериментальной картины эволюции спектра зарядностей ионов кислорода при соответствующем наборе значений $\sigma_{i \rightarrow i+1}$.

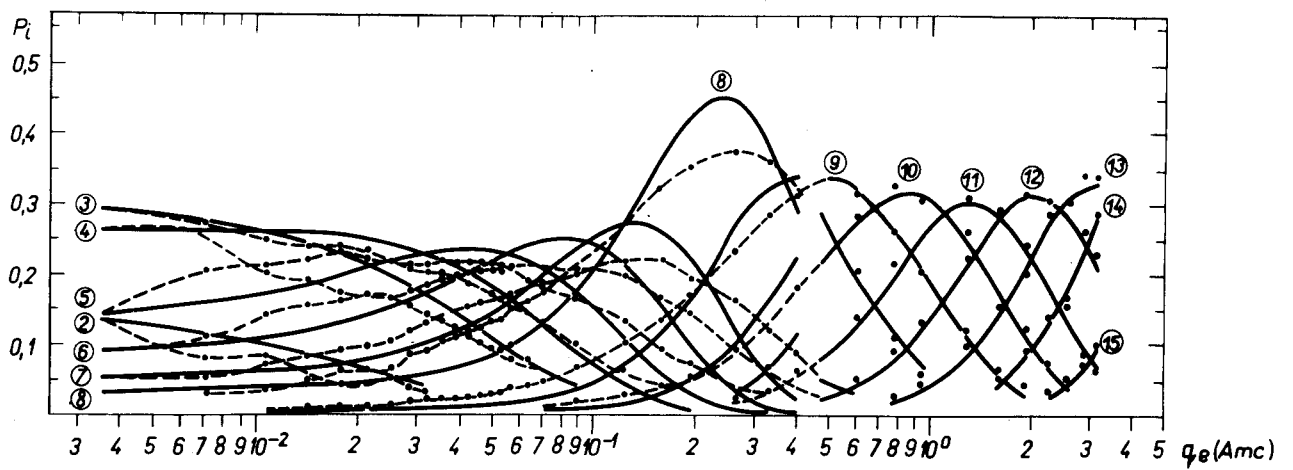


Рис. 7. Пример воспроизведения экспериментальной картины эволюции спектра зарядностей ионов аргона при соответствующем наборе значений $\sigma_{i \rightarrow i+1}$.

шее воспроизведение экспериментальных данных (экспериментальные точки практически ложатся на кривые $P_{i \text{восст.}} = f(jr)$) во всех случаях, кроме случая ионизации M-оболочки аргона. Это означает, что модель одноэлектронной ионизации адекватно отражает основной процесс увеличения зарядности ионов N, O, Ne и Ar в L- и K-оболочках. Неудовлетворительное согласие рассчитанных и экспериментальных картин эволюций для ионов $Ar^{+2} \div Ar^{+7}$ указывает на необходимость усложнения предполагаемой модели ионизации за счёт увеличения k, что подтверждает выводы, сделанные в работе /8/. Программа обработки экспериментальных данных по такой модели в настоящее время разрабатывается. Она может быть применена для нахождения $\sigma_{i \rightarrow i+k}$ при любом наборе энергетически разрешенных чисел k.

3. Энергетические зависимости $\sigma_{i \rightarrow i+1} = f(E_e)$

На рис. 8-10 представлены энергетические зависимости $\sigma_{i \rightarrow i+1} = f(E_e)$ для ионов азота, кислорода и аргона соответственно. Сплошные кривые проведены через экспериментальные точки. Справа у каждой кривой указана зарядность иона-мишени.

Указанные ошибки определения экспериментальных точек представляют собой вероятные отклонения величин соответствующих $\sigma_{i \rightarrow i+1}$ при наименьшем среднем отклонении восстановленных кривых $P_{i \text{восст.}} = f(jr)$ от всего массива экспериментальных точек на экспериментальных кривых $P_{i \text{эксп.}} = f(jr)$. В программу расчётов $\sigma_{i \rightarrow i+1}$ были введены ошибки, определяющие неточность измерения P_i при данном jr , связанную с обработкой первичного экспериментального материала. Другие вероятные источники ошибок, в частности, неплотно сцепление ионной мишени с электронным пучком или различные эффективности сцепления ионов различных зарядностей с электронным пучком, могут быть исследованы, и их влияние на экспериментальные результаты в будущем учтено, если таковое будет обнаружено.

Штриховыми линиями представлены расчётные зависимости $\sigma_{i \rightarrow i+1} = f(E_e)$ для соответствующих элементов, взятые из работы А.Салопа /11/, полученные на основе

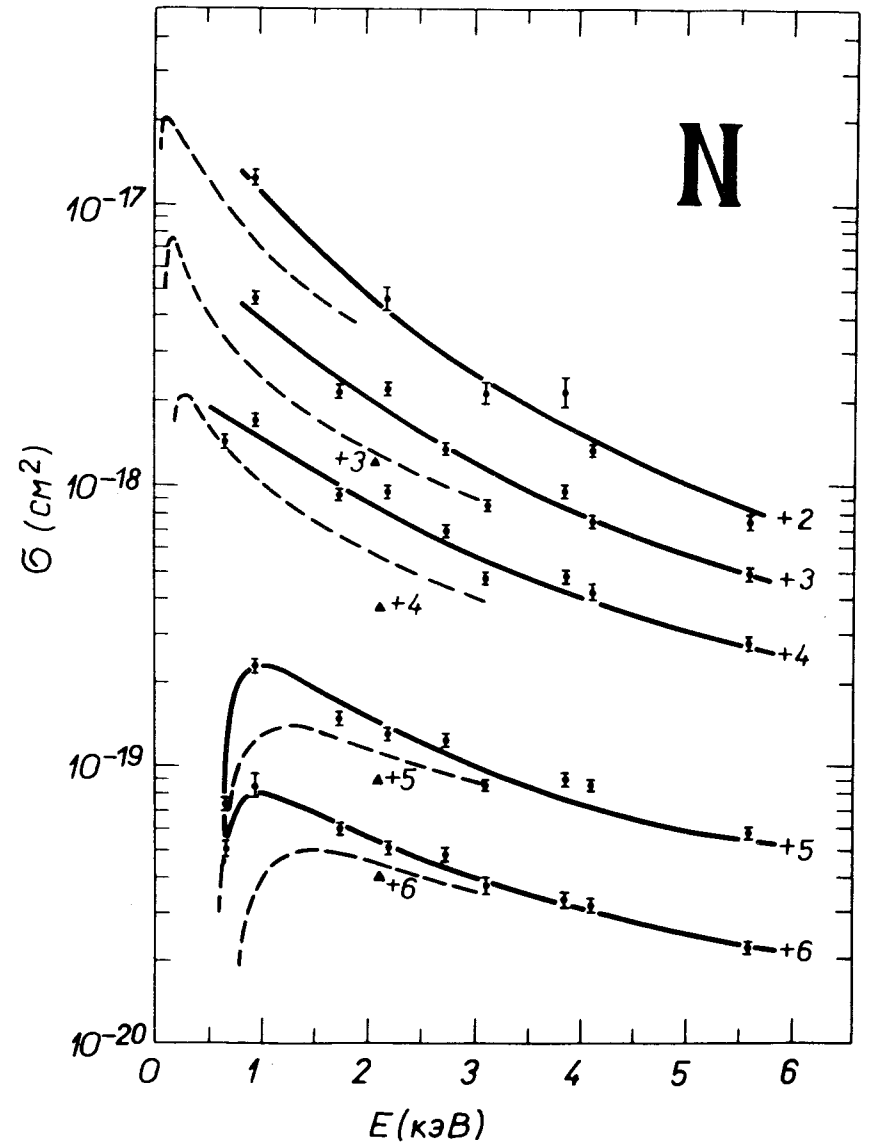


Рис. 8. Энергетические зависимости сечений одноэлектронной ионизации ионов азота.

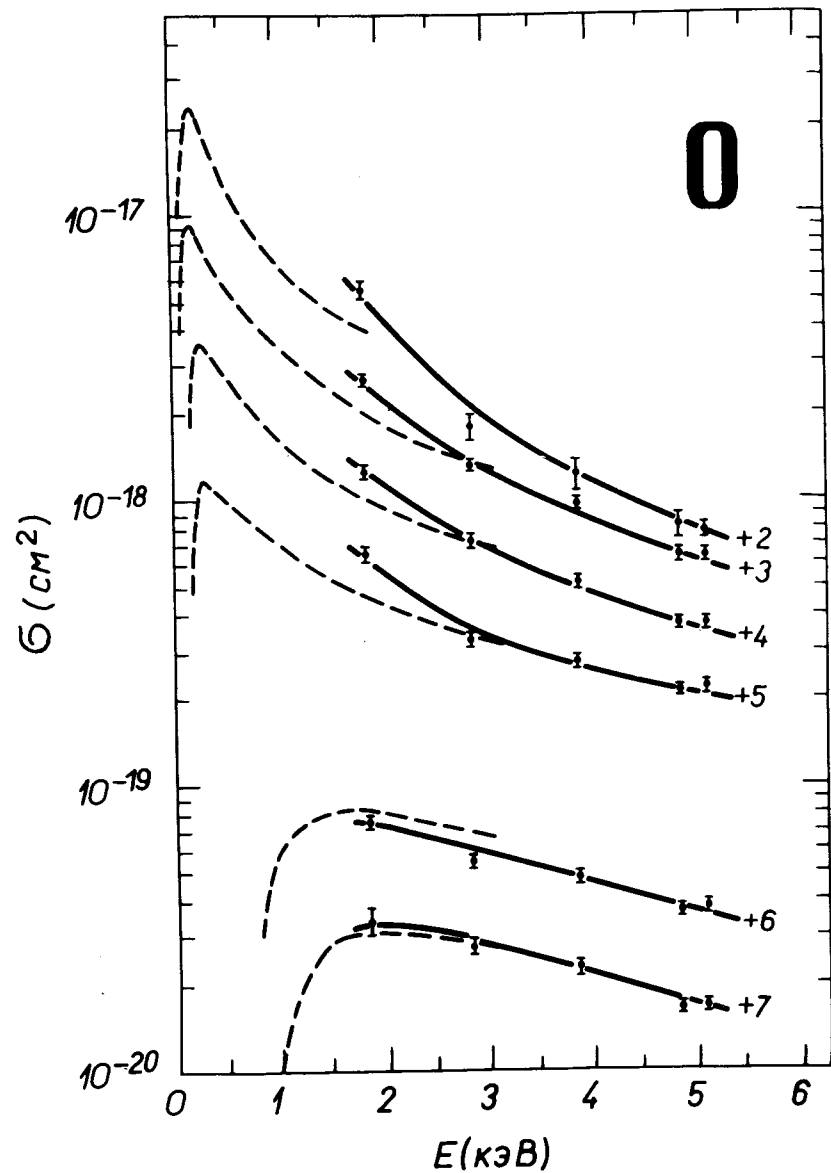


Рис.9. Энергетические зависимости сечений одноэлектронной ионизации ионов кислорода.

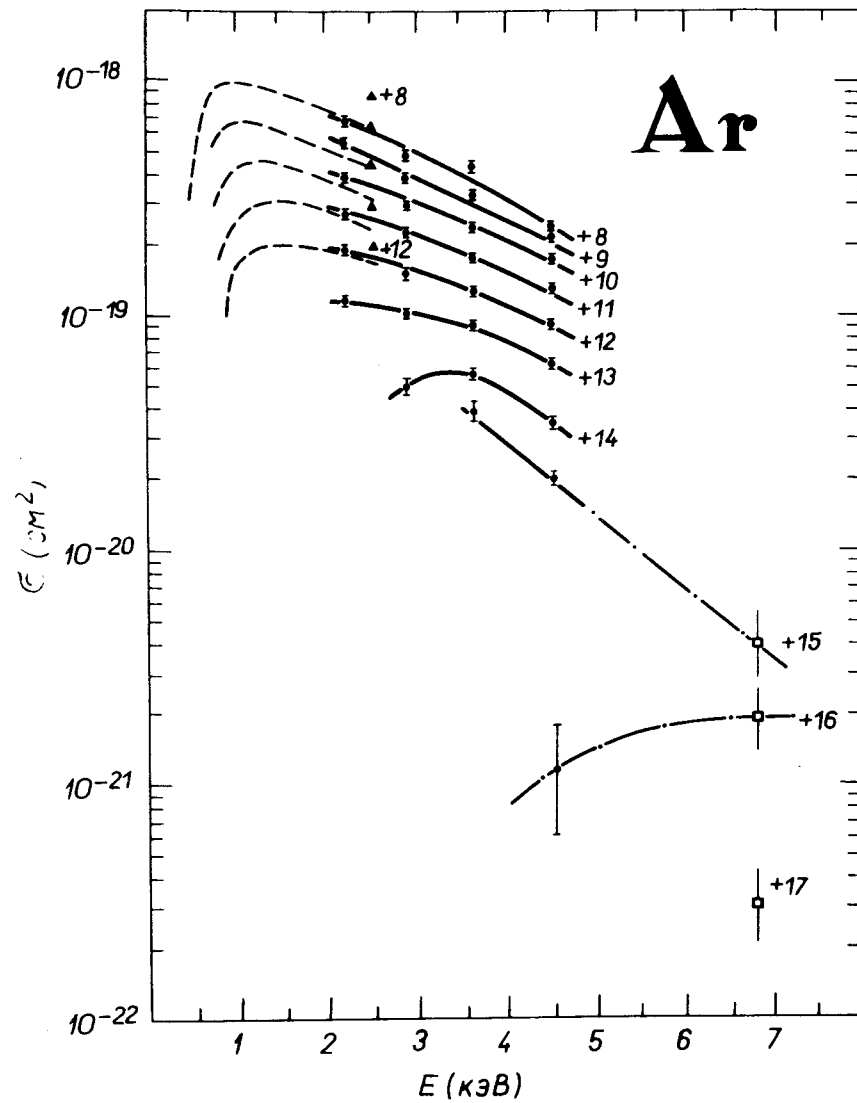


Рис.10. Энергетические зависимости сечений одноэлектронной ионизации ионов аргона.

полуклассической теории двухэлектронных столкновений (ВЕА-теории). Во всех случаях наблюдается неплохое согласие экспериментальных и теоретических кривых в тех областях E_e , которые являются общими для теории и эксперимента. Следует отметить, однако, что при относительно низких энергиях электронов ($E_e < 3$ кэВ) экспериментальные кривые систематически идут выше теоретических. Это не относится к сечениям для кислорода $\sigma_{6 \rightarrow 7}$ и $\sigma_{7 \rightarrow 8}$ и сечениям для аргона с $\sigma_{8 \rightarrow 9}$ до $\sigma_{12 \rightarrow 13}$, где совпадение теории и эксперимента лежит в пределах экспериментальных ошибок.

Экспериментальные данные для аргона при $E_e = 6,8$ кэВ получены на основе однократного измерения спектра зарядностей (см. рис. 11) и представляют собой весьма сильно заниженные значения $\sigma_{15 \rightarrow 16}$, $\sigma_{16 \rightarrow 17}$ и $\sigma_{17 \rightarrow 18}$.

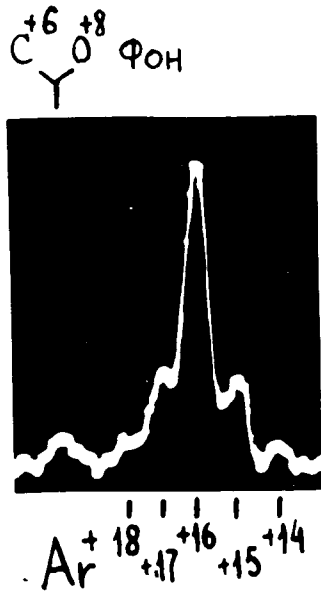


Рис. 11. Спектр зарядностей ионов аргона, полученный при $E_e = 6,8$ кэВ.

В связи с этим линии ошибок на рис. 10 для этих ионов не закрыты.

Для ионов неона в настоящее время измерены следующие величины: $\sigma_{2 \rightarrow 3} = 590$,

$$\sigma_{3 \rightarrow 4} = 260, \sigma_{4 \rightarrow 5} = 120, \sigma_{5 \rightarrow 6} = 45.$$

$$\sigma_{6 \rightarrow 7} = 22, \sigma_{7 \rightarrow 8} = 10, \sigma_{8 \rightarrow 9} \sim 2,$$

$$\sigma_{9 \rightarrow 10} \sim 1.$$

в единицах 10^{-20} см^2 для энергии 2,5 кэВ.

На рис. 8 и 10 треугольниками показаны результаты выполненных ранее измерений сечений ионизации для соответствующих ионов азота/7/ и аргона/8/ при фиксиро-

ванных энергиях электронов. Совпадение ранее полученных величин сечений с новыми всюду хорошее за исключением $\sigma_{3 \rightarrow 4}$ и $\sigma_{4 \rightarrow 5}$ для азота, где разница выходит за пределы двойной ошибки.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы рассматривают изложенные выше результаты как очередной этап на пути исследований ионизации положительных ионов электронным ударом, начатых в Объединенном институте ядерных исследований с использованием методики, основанной на применении электронно-лучевых ионизаторов, а также на пути совершенствования самой методики. В настоящее время можно себе представить следующие основные направления развития исследований.

1. Расширение диапазона энергий ионизирующих электронов как в область низких (до десятков эВ), так и в область высоких (до сотен кэВ) энергий.

2. Изучение ионизации ионов более тяжелых элементов, в частности Кг и Хе. В настоящее время получены экспериментально на источнике "КРИОН-2" ионы до Xe^{+37} . Область зарядностей ионов мишеней в ближайшее время может быть распространена до Xe^{+43} , а в дальнейшем, по крайней мере, до Xe^{+51} .

3. Разработка методики обработки эволюций спектра зарядностей при любом возможном наборе значений числа одновременно удаляемых электронов - k, что даст возможность систематически исследовать различного рода оже-каскады.

4. Исследование возможного влияния метастабильных состояний ионов-мишеней на эволюцию спектра зарядностей путем изменения среднего времени между ионизационными столкновениями при изменении в широких пределах плотности электронного пучка.

Кроме того, особый интерес представляют исследования процессов деионизации высокозарядных ионов, в частности, ядер при столкновениях, например, с молекулами или атомами водорода/12/.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Б.Ш.Бочеву за определяющий вклад в разработку для ЭВМ программы нахождения величин $\sigma_{i \rightarrow i+1}$ путем анализа экспериментально полученных картин эволюций спектров зарядностей ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хастед Дж. Физика атомных столкновений. Мир, Москва, 1965.
2. Baker F.A., Hasted J.B. Phil.Trans.Roy. Soc., 1966, 261, 33.
3. Redhead P.A., Gopalaraman G.P. Can.J.Phys., 1971, 49, 585.
4. Donets E.D., Ilushchenko V.I., Alpert V.A. Premiere Conference Internationale sur les Sources d'Ions I.N.S.T.N.Saclay-France, 1969.
5. Донец Е.Д., Пикин А.И. ЖТФ, 1975, 45, 2373.
6. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-9799, Дубна, 1976.
7. Донец Е.Д., Илющенко В.И. ОИЯИ, Р7-8310, Дубна, 1974.
8. Донец Е.Д., Пикин А.И. ЖЭТФ, 1976, 70, 2026.
9. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-10438, Дубна, 1977.
10. Александров Л. ОИЯИ, Р5-7259, Дубна, 1973.
11. Salop A. Phys.Rev. 1976, A14, 2095.
12. Salop A. IEEE Transaction on Nucl.Sci., 1976, Ns-23 N2, 975.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 июня 1977 года.