Доклады Академии наук СССР
1955. Том 103, № 3

ФИЗИКА

М. И. КОРСУНСКИЙ, Л. И. ПИВОВАР, А. М. МАРКУС и Х. Л. ЛЕВИАНТ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СЕЧЕНИЙ ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОНОВ ИОНАМИ АТОМАРНОГО АЗОТА В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 485—1180 КЭВ *

(Представлено академиком Л. А. Арцимовичем 25 V 1955)

Изучение процессов потери и захвата электронов при прохождении ионных пучков через вещество представляет большой интерес, особенно с точки зрения развития теории атомных столкновений. Эффективные сечения потери электронов зависят от энергии, и можно ожидать, что при больших энергиях они могут достигать заметной величины.

В настоящей работе изучались процессы потери электронов ионами атомарного азота при прохождении однозарядных ионов N_{14} через газовую мишень из технического азота в интервале энергий от 485 до 1180 кэв.

Процесс потери и захвата электрона ионами более тяжелыми, чем ион гелия, изучен мало. Имеется лишь одна работа ([1]), посвященная лишь определению поперечников потери и захвата для различных ионов в области энергий 5—60 кэв, определение же эффективных сечений потери электронов в указанной выше области энергий производится впервые.

Для получения высокого напряжения нами был разработан и построен электростатический генератор с ускоряющей трубкой. Генератор и трубка располагались в стальной оболочке с сжатым газом. Ионы N_{14}^{+} эмитировались ионным источником с холодным катодом. На выходе ускоряющей трубки интенсивность пучка ионов N_{14}^{+} достигала 8—10 μа. Пучок ионов исследуемой энергии проходил через газовую камеру, представлявшую собой цилиндрическую трубку длиной 200 мм и диаметром 6 мм, через середину которой вводился газ. Для направления пучка в газовую камеру между ускоряющей трубкой и газовой камерой был установлен специально разработанный нами двойной магнитный корректор-монохроматор, который выделял из всего состава пучка ионы с заданным значением энергии и заданным значением e/m и позволял смещать выделенный пучок ионов параллельно самому себе и направлять его под углом.

Прошедший газовую камеру пучок ионов направлялся в масс-анализатор, представлявший собой магнитный анализатор с поворотом ионного пучка на 60° и эффективным радиусом кривизны $\rho = 78{,}6$ см. Анализатор обладал фокусирующими свойствами, и в фокусе его помещалось входное отверстие ионной ловушки. Ионные токи, проходящие в ловушку масс-анализатора, измерялись при помощи электрометрической схемы с набором калиброванных сопротивлений. Соотношения между сопротивлениями проверялись в начале и в конце каждой серии измерений. Соответствующей конструкцией ионной ловушки

* Работа была выполнена в 1951 г.

с приложением задерживающего потенциала устранялось влияние вторичной электронной эмиссии на результаты измерений. Схема расположения элементов установки дана на рис. 1.

Анализ состава пучка ионов, прошедшего через газовую камеру, показал, что он состоит как из однозарядных атомарных ионов азота N_{14}^{+}, которые выделялись корректором-монохроматором, так и многозарядных атомарных ионов азота N_{14}^{2+}, N_{14}^{3+}, N_{14}^{4+}, . . . , N_{14}^{6+}, образовавшихся при прохождении ионов первичного пучка через газовую камеру.

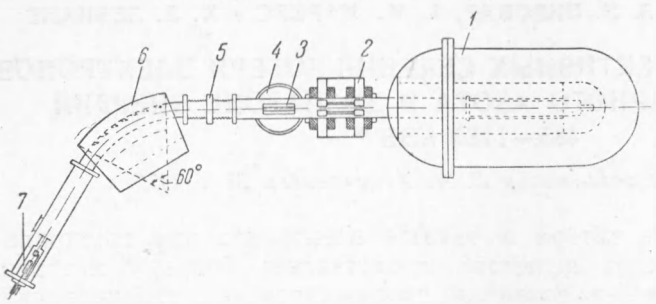


Рис. 1. Блок-схема установки. *1* — электростатический генератор; *2* — двойной корректор-монохроматор; *3* — камера столкновений; *4* — диффузионный насос; *5* — сдвоенный сильфон; *6* — магнитный анализатор; *7* — ионная ловушка

По величине магнитного поля анализатора определялось отношение e/m и отсюда устанавливалась величина заряда иона. В наших опытах измерялось число ионов различной зарядности, приходящих в приемник масс-анализатора, в зависимости от давления в газовой камере. Интервал давления в центре газовой камере изменялся от 10^{-4} до $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

Для определения эффективных сечений потери электронов графически строились зависимости

$$\frac{1}{k}\frac{I^{k+}}{I^{+}} = \frac{N^{k+}}{N^{+}} = f(nl) \qquad (1)$$

для всего исследованного интервала давлений, где N^{k+}/N^{+} — отношение числа ионов с зарядом k к числу однозарядных ионов, а nf — число молекул на участке пути пучка ионов от монохроматора до масс-анализатора.

Характерные кривые для различных k при $V = \text{const}$ приведены на рис. 2. Из приведенных кривых видно, что при малых давлениях в газовой камере изменение отношения N^{k+}/N^{+} с давлением имеет линейный характер. При больших давлениях рост замедляется, и затем наступает равновесное состояние.

Из аналогичных графиков, построенных для различных ускоряющих напряжений, вычислялись эффективные сечения потери $k-1$ электронов по формуле

$$\sigma_{1k} = \left[\frac{d\,(N^{k+}/N^{+})}{d\,(nl)}\right]_{nl\to\infty}, \qquad (2)$$

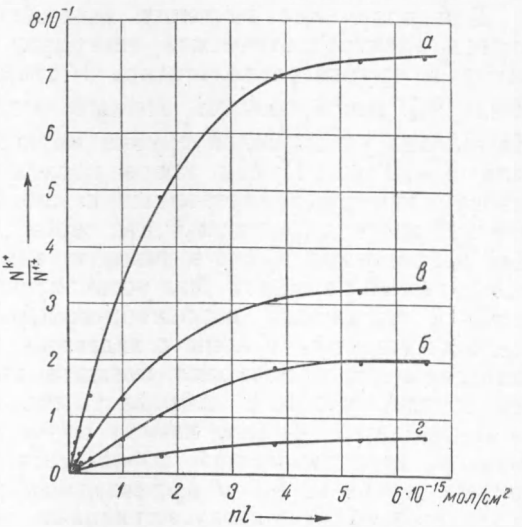


Рис. 2. Кривые зависимости N^{k+}/N^{1+} от nl. *а* — N^{2+}/N^{1+}; *б* — N^{3+}/N^{1+}; *в* — $N^{4+}/N^{1+} \cdot 50$; *г* — $N^{5+}/N^{1+} \cdot 10^{3}$. $V = 100$ кв

где σ_{1k} — эффективное сечение потери однозарядным ионом $k-1$ электронов. При определении эффективного значения σ_{1k} учитывалось обра-

зование многозарядных ионов на всем пути в вакуумной камере до масс-анализатора.

При расчете эффективных сечений не принималось во внимание рассеяние ионов в газе и отражение ионов от стенок камеры масс-анализатора. Оценка влияния рассеяния на результаты измерений показывает, что это влияние в условиях нашего опыта не может быть заметным; это согласуется с ходом экспериментальных кривых $N^{k+}/N^{+} = f(nl)$. Отражение ионов от стенок камеры масс-анализатора играет существенную роль при измерении токов многозарядных ионов, так как при этом большое число ионов более низкой зарядности попадает на стенку камеры масс-анализатора, и после отражения часть из них направляется в приемник, создавая таким образом фон. Применением пилообразной алюминиевой вставки, установленной в масс-анализаторе, и соответствующим подбором геометрии приемника удалось практически устранить этот фон.

Таблица 1

Энергия первичн. пучка ионов в кэв	Эффективн. сечения потери электронов в см²			
	$\sigma_{12} \cdot 10^{16}$	$\sigma_{13} \cdot 10^{17}$	$\sigma_{14} \cdot 10^{19}$	$\sigma_{15} \cdot 10^{21}$
485	2,7	2,9	7,2	—
635	3	4,5	15	6
800	4	5,6	29	24
985	4	8,8	57	160
1180	3,6	12	90	400

Учет несистематических ошибок показывает, что при измерении эффективных сечений они не превышали $\pm 30\%$.

Таблица 2

Энергия в кэв	N^{+},%	N^{2+},%	N^{3+},%	N^{4+} %	N^{5+},%	Z_{eff}
485	65,7	31,1	3,15	0,06	—	1,376
635	57,1	36,4	6,25	0,16	0,0013	1,49
800	51,2	38,6	10,0	0,36	0,005	1,6
985	42,3	44,8	12,7	0,68	0,02	1,73

Полученные нами значения эффективных сечений потери электронов атомарными ионами азота при различных энергиях первичного пучка приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что для однозарядных атомарных ионов азота наблюдаются потери нескольких электронов одновременно. Нами наблюдались также переходы N_{14}^{+} непосредственно в N_{14}^{6+} при энергиях 985 и 1180 кэв. Однако интенсивность пучка шестизарядных ионов азота была весьма малой. Эффективные сечения потери электронов в рассматриваемом интервале энергий, начиная с процессов $N_{14}^{+} \rightarrow N_{14}^{3+}$, быстро растут с энергией, причем возрастание идет тем быстрее, чем большее число электронов теряется в однократном процессе. Интересно отметить, что эффективное сечение σ_{12} в рассматриваемой области энергий меняется мало.

При достаточно больших *nl* в составе пучка ионов уже не происходит изменений при увеличении давления в газовой камере. Наступает равновесное состояние.

Из участков кривых N^{k+}/N^{+}, соответствующих равновесному составу, было определено процентное содержание частиц различной зарядности по отношению к общему числу заряженных частиц в пучке для каждого значения энергии первичного пучка. Полученные данные приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, процентное содержание компонент пучка более высокой зарядности очень быстро возрастает с ростом энергии.

На основании данных табл. 2 производилась оценка эффективных зарядов для соответствующих энергий первичного пучка ионов в предположении отсутствия нейтральных атомов азота. Соответству-

ющие значения Z_{eff} приведены в последнем столбце таблицы. Предположение об отсутствии N_{14}^0 сделано на основании данных работы Стаера, Барнетта и Эванса ([2]), показавших, что относительное число нейтральных атомов азота в равновесном составе пучка ионов быстро падает с ростом энергии в интервале 20—220 кэв. Экстраполяция соответствующей кривой в область исследованных нами энергий показывает, что число переходов $N_{14}^{k+} \rightarrow N_{14}^0$ очень мало. Полученные значения Z_{eff} составляют 0,53—0,6 от соответствующего эффективного заряда, рассчитанного по формуле Бора ([3]). То, что величина измеренного эффективного заряда оказывается меньше, чем это следует из оценки Бора, подтверждается также другими исследованиями равновесных составов, проведенными для энергий атомарного пучка ионов азота с энергией 15 и 29 Мэв ([4,5]).

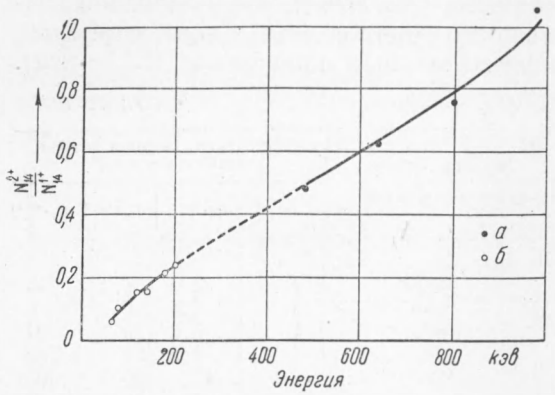


Рис. 3. Зависимость N^{2+}/N^{1+} от энергии. *а* — экспериментальные данные, полученные в настоящей работе; *б* — данные работы ([2])

В заключение сопоставим полученные данные для зависимости от энергии отношения N^{2+}/N^{1+} в равновесном составе с соответствующими данными, полученными Стаером, Барнеттом и Эвансом ([2]) в интервале энергий 50—200 кэв. Построенные кривые приведены на рис. 3. Как видно из рисунка, все экспериментальные точки укладываются на одну монотонную кривую.

Харьковский физико-технический
научно-исследовательский институт
Академии наук УССР

Поступило
19 V 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Н. В. Федоренко, ЖТФ, 24, 769 (1954). [2] P. M. Stier, C. F. Barnett' G. E. Evans, Phys. Rev., 96, 973 (1954). [3] Н. Бор, Прохождение атомных частиц через вещество, 1950. [4] K. Stephens, D. Walker, Phil. Mag., 45, 543 (1954). [5] H. Reynolds, A. Zucker, Phys. Rev., 95, 1353 (1954).