

В. М. ДУКЕЛЬСКИЙ и Э. Я. ЗАНДБЕРГ

ПЕРЕЗАРЯДКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ Na^- , K^- , O^- , OH^- и O_2^- С МОЛЕКУЛАМИ КИСЛОРОДА

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 1 XI 1951)

При прохождении положительных ионов через разреженные газы наблюдается так называемая «перезарядка», т. е. переход электрона от атома или молекулы газа к положительному иону. Аналогичное явление может иметь место и для отрицательных ионов; в этом случае должен происходить переход избыточного электрона отрицательного иона к атому или молекуле газа. Очевидно, что такая перезарядка для отрицательных ионов возможна только с атомами или молекулами, обладающими сродством к электрону.

Перезарядка отрицательных ионов до сих пор не была обнаружена, так как наблюдение ее связано с известными трудностями. Основная трудность заключается в том, что при столкновениях с атомами отрицательные ионы могут не только перезарядаться, но и разрушаться⁽¹⁾. Первый процесс должен приводить к появлению медленных отрицательных ионов, второй вызывает появление свободных (медленных) электронов. Для обнаружения перезарядки необходимо отделить ионы перезарядки от электронов разрушения.

Мы наблюдали перезарядку ионов Na^- , K^- , O^- , OH^- и O_2^- при прохождении их через камеру, наполненную кислородом при низком давлении. Нами был использован с некоторыми изменениями прибор, описанный в статье⁽¹⁾. Отрицательные ионы получались из газоразрядного источника⁽²⁾. Пучок ионов выделялся с помощью магнитного масс-монохроматора и попадал в измерительную камеру, наполненную газом (рис. 1, а). Для разделения друг от друга медленных ионов и электронов, образующихся в камере, мы осуществили отклонение этих медленных заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях. Электрическое поле создавалось между полуцилиндрическими электродами 1, 2, 3 и 4, 5, 6; магнитное поле — с помощью соленоида, надетого на стеклянную оболочку камеры. Измерительный электрод 2 был разрезан на три части — «лепестка» равной ширины (рис. 1, б). В отсутствие магнитного поля электрическое поле должно приводить и ионы перезарядки и электроны, образующиеся в камере по пути пучка отрицательных ионов, главным образом на средний лепесток С. Если же наложить также магнитное поле, параллельное оси камеры, то заряженные частицы должны отклоняться в направлении, перпендикулярном и к электрическому и к магнитному полю, и попадать уже не на средний, а на боковой, например левый лепесток Л. При заданном электрическом поле напряженность магнитного поля, при котором электроны будут отскакивать на лепесток Л, будет еще совершенно недостаточной для отклонения ионов, которые будут продолжать попадать на лепесток С. Таким образом должно произойти отделение ионов от электронов, и притом без заметных потерь.

Предварительно мы убедились в том, что магнитным полем можно полностью отклонить электроны на лепесток *Л*. Для этого мы произвели опыты с пучками ионов Na^+ и K^- с энергией 720 эв в камере, наполненной аргоном (атомы аргона не обладают электронным средством). При электрическом поле между электродами 5 и 2, равном ~ 3 в/см в средней части камеры, рассеянного магнитного поля электромагнита масс-

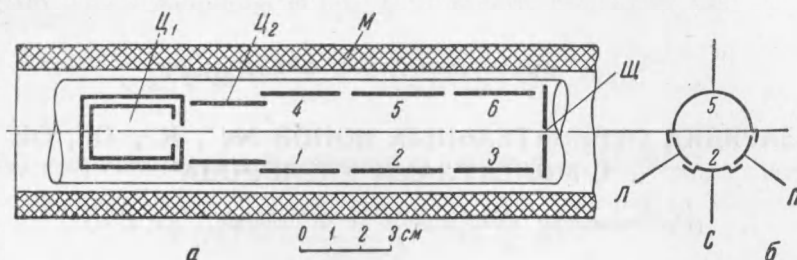


Рис. 1. *а*. Щ — входная щель; 2 — измерительный электрод; 1 и 3 — охранные электроды; 4, 5 и 6 — потенциальные электроды ($V = -8$ в); \mathcal{C}_1 — приемник для первичного пучка; \mathcal{C}_2 — цилиндр для защиты измерительного объема от электронов вторичной эмиссии из приемника \mathcal{C}_1 ($V = -6$ в); *М* — соленоид. *б* — измерительные электроды (лепестки) *Л*, *С*, *П*

монохроматора было уже достаточно для того, чтобы электроны, возникавшие в камере в результате разрушения отрицательных ионов, не достигали лепестка *С* и полностью попадали на лепесток *Л*. При

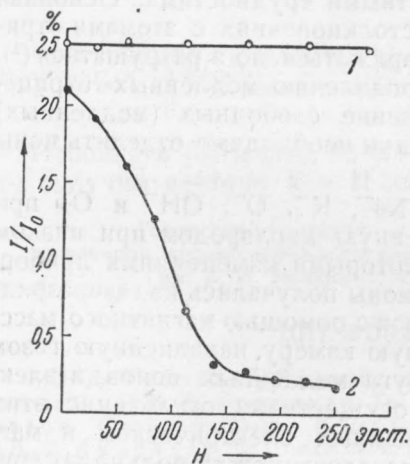


Рис. 2. Ионы K^- ; кислород ($4,5 \cdot 10^{-5}$ тор). 1 — отношение тока I на лепесток *С* к току I_0 первичного пучка ионов, 2 — то же для лепестка *Л*

включении и постепенном увеличении поля соленоида электронный ток на лепесток *Л* уменьшался и, например, для ионов K^- при напряженности поля 190 эрст. падал до 4% своей первоначальной величины; такое падение следует объяснить переносом электронов вдоль камеры. Никакого тока на электроды от ионов первичного пучка, рассеянных в газе (аргоне), не наблюдалось. Можно было ожидать, что и в случае кислорода рассеяние первичного пучка не должно сказываться на результатах измерений.

Затем был произведен такой же опыт с пучком ионов K^- с энергией 720 эв в камере, наполненной кислородом (давление $4,5 \cdot 10^{-5}$ тор). Наблюдалась совершенно иная картина. В отсутствие магнитного поля соленоида и на лепесток *Л* и на лепесток *С*

шел отрицательный ток. При включении магнитного поля соленоида ток на лепесток *Л* падал, как и в случае аргона, а ток на лепесток *С* оставался без изменения (см. рис. 2). Не меняющийся с магнитным полем ток на лепесток *С* (кривая 1) следует, очевидно, приписать ионам, образовавшимся в камере в результате перезарядки ионов K^- с молекулами кислорода, а ток на лепесток *Л* (кривая 2), как и в опытах с аргоном, отнести за счет электронов разрушения. Вольт-амперные характеристики тока на лепесток *С* обнаруживали насыщенные уже при разности потенциалов 2—3 в.

Аналогичные результаты были получены с пучком ионов Na^+ . В этом случае была измерена зависимость тока на лепесток *С* от дав-

ления кислорода в камере. В промежутке давлений от $1 \cdot 10^{-5}$ до $8 \cdot 10^{-5}$ тор эта зависимость оказалась линейной; этот результат доказывал, что процесс перезарядки происходил при однократных столкновениях ионов с молекулами газа.

Особый интерес представляет перезарядка в случае, когда ионы взаимодействуют с атомами или молекулами того же газа (так называемая резонансная перезарядка). Для отрицательных ионов резонансная перезарядка атомных ионов трудно осуществима. Нам удалось наблюдать перезарядку ионов O_2^- в кислороде. Для получения пучка ионов O_2^- был использован газоразрядный источник с парами воды в качестве рабочего вещества. В спектре отрицательных ионов, получающихся из такого источника, содержатся сильные «линии» O^- , OH^- и H^- , несколько менее интенсивная линия O_2^- и слабые линии H_2O^- и H_3O^- .

С пучком ионов O_2^- (энергия 720 эв, сила тока в пучке $(1 \div 2) \cdot 10^{-11}$ а) в камере, наполненной аргоном, наблюдались только электроны от разрушения ионов; в кислороде происходили как разрушение, так и перезарядка (см. рис. 3). Были также произведены наблюдения перезарядки и разрушения для ионов O^- и OH^- в кислороде.

Сводка определения эффективных сечений q перезарядки и разрушения для исследованных нами ионов дана в табл. 1 (во всех исследованных нами случаях наряду с перезарядкой наблюдалось разрушение отрицательных ионов). Наибольшие сечения перезарядки получились для ионов Na^- , K^- и O_2^- (порядка 10^{-15} см²). Сечение перезарядки ионов O^- и OH^- оказалось на порядок величины меньшим ($\sim 10^{-16}$ см²).

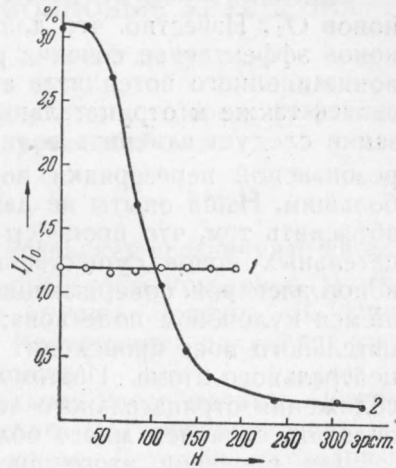


Рис. 3. Ионы O_2^- ; кислород ($6,6 \cdot 10^{-5}$ тор). 1 — ток на лепесток С (ионы), 2 — ток на лепесток Л (электроны)

Таблица 1

Ион	q перезарядки в см ²	q разрушения в см ²	ΔW в эв
Na^-	$5 \cdot 10^{-15}$	$4 \cdot 10^{-15}$	-0,5 ⁽⁴⁾
K^-	$6 \cdot 10^{-15}$	$4 \cdot 10^{-15}$	-0,5 ⁽⁴⁾
O^-	$5 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-15}$	+1,5 ⁽⁵⁾
Cl^-	$< 3 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-15}$	+3,0
OH^-	$6 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-15}$	+1,4 ⁽⁶⁾
O_2^-	$2 \cdot 10^{-15}$	$4 \cdot 10^{-15}$	0

Полученные значения q перезарядки можно сопоставить с разностью ΔW энергии электронного сродства иона и молекулы газа, в которой происходила перезарядка. Электронное сродство молекулы кислорода точно неизвестно; в работе⁽³⁾ дается значение, равное 0,7 эв. Вычисленные с помощью этого значения величины ΔW приведены в последнем столбце табл. 1. Сопоставление величины q перезарядки и ΔW показывает, что перезарядка происходит с большим сечением при малых

ΔW . Однако наибольшее сечение мы получили не для резонансного случая O_2^- в O_2 , а для ионов Na^- и K^- ($\Delta W \approx -0,5$ эв). Можно предполагать, что этот факт связан с большими размерами ионов Na^- и K^- . Для ионов O^- и OH^- величина $\Delta W \approx 1,5$ эв и сечение перезарядки на порядок величины меньше, чем для ионов Na^- и K^- . Следует также упомянуть о том, что мы произвели опыт для наблюдения перезарядки ионов Cl^- в кислороде. Ток от ионов перезарядки оказался очень малым ($q \approx 10^{-17}$ см²); для ионов Cl^- величина $\Delta W = +3,0$ эв, т. е. значительно больше, чем для других исследованных нами ионов.

Отдельно следует рассмотреть случай резонансной перезарядки ионов O_2^- . Известно, что для резонансной перезарядки положительных ионов эффективное сечение растет обратно пропорционально квадрату ионизационного потенциала атома (?). Если бы эта зависимость относилась также к отрицательным ионам (для которых потенциал ионизации следует заменить величиной электронного сродства), то сечение резонансной перезарядки ионов O_2^- должно было бы оказаться очень большим. Наши опыты не дали таких больших значений. Это следует объяснить тем, что процессы перезарядки для положительных и отрицательных ионов существенно различны. В случае положительных ионов электрон, совершающий переход, находится в далеко простирающемся кулоновом поле иона; переход же избыточного электрона отрицательного иона происходит в быстро спадающем с расстоянием поле нейтрального атома. Поэтому такой переход требует очень тесного сближения отрицательного иона с атомами и, следовательно, не может обладать сечением много большим, чем атомные размеры.

Для проверки этого представления мы произвели определение эффективного сечения перезарядки положительных ионов O_2^+ в O_2 в условиях, вполне подобных тем, в которых производились измерения с ионами O_2^- . Для ионов O_2^+ (энергия 720 эв) мы получили q перезарядки $= 5 \cdot 10^{-15}$ см², т. е. величину даже большую, чем для ионов O_2^- , хотя потенциал ионизации молекулы кислорода (12,3 эв) во много раз превышает ее электронное сродство.

Ленинградский физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступило
12 X 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. М. Дукельский и Э. Я. Зандберг, ЖЭТФ, **21**, № 12 (1951).
² В. М. Дукельский, Э. Я. Зандберг и Н. И. Ионов, ЖЭТФ, **20**, 877 (1950).
³ M. G. Evans and N. Uri, Trans. Farad. Soc., **45**, 224 (1949). ⁴ В. М. Дукельский, Сборн., посвящ. 70-летию акад. А. Ф. Иоффе, 1950, стр. 138. ⁵ H. O. Nagstrum, Phys. Rev., **82**, 767 (1951). ⁶ J. Goubeau и W. Klemm, Zs. phys. Chem., B, **36**, 362 (1937). ⁷ Л. А. Сена, Столкновения электронов и ионов с атомами газа, 1948, стр. 156.