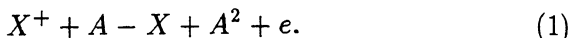


02;04  
©1995

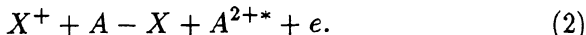
## ПЕРЕЗАРЯДКА С ИОНИЗАЦИЕЙ И ВОЗБУЖДЕНИЕМ АТОМОВ La ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ С ИОНАМИ He<sup>+</sup>

*Б.Г.Краков, С.Н.Морозов*

Двукратная ионизация атомов при столкновениях с однократными ионами He и Ne наблюдалась и рассчитывалась в ряде работ [1]. Частным случаем этого процесса является перезарядка с ионизацией [2], которая описывается уравнением



Поскольку процесс (1) не требует затрат кинетической энергии сталкивающихся частиц, то он наблюдается даже при тепловых скоростях [1]. Дефект энергии между энергией нейтрализации иона  $x^+$  и первыми двумя потенциалами ионизации атома  $A$  составляет кинетическую энергию электрона. Если подобрать элементы  $X$  и  $A$  таким образом, чтобы дефект энергии составил несколько эВ, то становится возможным существование другого канала реакции (1) — образование двухзарядного иона  $A^{2+}$  в возбужденном состоянии



Процесс (2) по аналогии с (1) можно назвать перезарядкой с ионизацией и возбуждением (ПЗИВ). Для двухзарядных ионов он наблюдался в работе [3]. Условия реакции (2) накладывают более жесткие ограничения на выбор мишени  $A$  по сравнению с процессом (1). Тем не менее набор элементов достаточно широк. Это элементы третьей группы — Y, La, остальные редкоземельные атомы и ряд других. Мы рассмотрели реакцию (2) для пары He<sup>+</sup>+La. Это связано с тем, что ион La<sup>2+</sup> имеет один электрон сверх заполненной оболочки. Соответствующие спектры легко поддаются идентификации и теоретическому анализу.

Энергетический баланс реакции (2) имеет вид (всюду, где не указано особо, используются атомные единицы)

$$J_X^{(1)} - \frac{\alpha_A}{2 \cdot R^4} = J_A^{(1)} + J_A^{(2)} - \frac{\alpha_X}{R^4} + E_i + E_e(R), \quad (3)$$

где  $\alpha_A$  и  $\alpha_X$  — поляризуемости атомов  $A$  и  $X$ ;  $J_K^{(n)}$  — соответствующие потенциалы ионизации;  $E_i$  — энергия возбуждения  $i$  — уровня в ионе  $A^{2+}$ ;  $E_e(R)$  — энергия вылетевшего электрона;  $R$  — межъядерное расстояние. Энергетически реакция (2) возможна при  $R > R_0$ , где  $R_0$  определяется из (3) при  $E_e(R_0) = 0$ , причем  $R_0$  зависит от энергии возбуждения  $E_i$ . Для атома  $\text{La}$  дефект энергии реакции (2)  $\Delta E = J_X^{(1)} - J_A^{(1)} - J_A^{(2)}$  равен 7.91 эВ. Ион  $\text{La}^{2+}$  имеет группу уровней  $-5D_{5/2}, 6S_{1/2}, 6P_{1/2,3/2}$  с энергиями возбуждения  $E_i = 0.2 - 5.6$  эВ, которые могут заполняться за счет реакции (2). Для пары  $\text{He}^+ - \text{La}$  ПЗИВ реализуется для межъядерных расстояний  $R \geq R_0 = 6.0a_0$ .

Реакция ПЗИВ связана с изменением состояний трех электронов за счет парных электронных корреляций. В работе [4] был развит метод расчета сечения реакций такого типа. Согласно [4] возбуждение валентного электрона происходит за счет двух механизмов. Один из них связан с встряской электрона вследствие изменения эффективного заряда ядра атома, потерявшего два электрона в результате перезарядки с ионизацией. В другом случае возбуждение происходит при рассеянии на валентном электроном ионизованного электрона. Вклад того или иного механизма в сечение зависит от квантовых чисел начального и конечного состояния валентного электрона. Для монополярных переходов преобладает встрясочный механизм, для переходов с изменением момента — механизм электронного удара. Согласно [4] сечение  $\sigma$  реакции ПЗИВ имеет вид

$$\sigma = \mu\sigma_0, \quad (5)$$

где  $\mu$  — коэффициент, зависящий от квантовых чисел начального и конечного состояний;  $\sigma_0$  — сечение обычной перезарядки с ионизацией. Основным состоянием иона  $\text{La}^{2+}$  является состояние  $5D_{3/2}$ . Для всех допустимых по энергии возбужденных состояний  $\text{La}^{2+}$  коэффициент  $\mu$  составляет величину порядка  $10^{-2}$ . В работе [5] измерялось сечение перезарядки с ионизацией ряда элементов второй и третьей групп на ионе  $\text{He}^+$ . Сечение слабо зависит от атомного номера элемента и дефекта энергии и изменяется в интервале  $(1.5 - 3.0) \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>. Тогда оценка сечения  $\sigma$  реакции ПЗИВ для пары  $\text{He}^+ + \text{La}$ , согласно (5), дает величину порядка  $10^{-17}$  см<sup>2</sup>.

Для обнаружения процесса ПЗИВ нами проведен эксперимент по наблюдению спектров свечения разряда в парах лантана в присутствии гелия и, для сравнения, в присут-

Относительные интенсивности переходов в спектрах LaI-LaIII (нормировка интенсивностей по линии LaI-272.558 нм)

N	Ион	$\lambda$ , нм	$E_i$ , эВ	Интенсивность, отн. ед.		
				[ <sup>6</sup> ]	He <sup>+</sup> -La	Kr <sup>+</sup> -La
1	LaII	218.787	5.66	23	10.5	1.5
2	LaIII	221.611	5.59	4	60	1.5
3	LaIII	229.777	5.59	97	450	15
4	LaIII	237.938	5.21	88	360	12
5	LaII	261.034	5.66	46	30	30
6	LaII	267.291	6.94	6	24	6
7	LaII	269.547	7.05	7	15	6
8	LaI	272.558	4.68	6	6	6

ствии криптона. Разряд поджигался в кварцевой трубке между двумя лантановыми электродами при давлении инертных газов 3–5 Тор. Во время разряда газовый состав возобновлялся путем постоянной прокачки. Ток разряда поддерживался на уровне 50 мА при напряжении 300 В. Расстояние между электродами составляло около 7 мм. Спектр излучения в ультрафиолетовой области 200–450 нм регистрировался с помощью кварцевого монохроматора и фотоумножителя ЕМ1 6256 В. Наиболее яркое свечение наблюдалось из области “анодного пятна” на положительном электроде, где происходило интенсивное испарение атомов лантана. Размер “анодного пятна” составлял  $< 0.1 \text{ мм}^2$ .

В таблице приведены некоторые характеристики наиболее сильных линий ионов La в области 200–300 нм в спектрах анодного пятна в присутствии гелия и криптона. Выбор криптона обусловлен тем, что энергии его нейтрализации недостаточно для реализации реакции (2). Поэтому реакция ПЗИВ для пары Kr<sup>+</sup>-La требует затрат кинетической энергии сталкивающихся частиц. Это позволяет сравнить сечения, соответствующие разным механизмам ионизации и возбуждения.

Как видно из таблицы, при разряде в гелии происходит существенное (на 1–1.5 порядка) увеличение интенсивности линий LaIII по сравнению с разрядом в криптоне, а также по сравнению с разрядом в парах лантана [<sup>6</sup>]. При этом для ионов LaII интенсивности, для обеих пар, одного порядка. Это указывает на разные механизмы формирования возбужденных состояний ионов LaIII и является свидетельством реализации реакции ПЗИВ в разряде лантана с гелием.

## Список литературы

- [1] Парилис Э.С., Кишиневский Л.М., Матвеев В.И., Краков Б.Г. Оже-процессы при атомных столкновениях. Ташкент: Фан, 1969. 238 с.
- [2] Kulander K.C., Dahler J.S. // Phys. В. 1975. V. 8. N 3. P. 460-468; 1975. V. 8. N 16. P. 2679-2696.
- [3] Niehaus A., Ruf M. // J. Phys. В. 1976. V. 9. N 8. P. 1401-1418.
- [4] Далидчик Ф.И. // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. В. 3. С. 908-919.
- [5] Жуков В.В., Латуш К.А., Сэм М.Ф. // Изв. вузов. Сер. физ. 1977. В. 7. С. 137-138.
- [6] Зайдель А.Н. и др. Таблицы спектральных линий. М.: Наука, 1977. 410 с.

Институт электроники  
АН РУ  
Ташкент

Поступило в Редакцию  
13 августа 1994 г.  
В окончательной редакции  
11 января 1995 г.