

## ДОКАЗАТЕЛЬСТВО РЕАЛИЗАЦИИ ДВУХЭЛЕКТРОННОГО МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ИОНОВ $Ba^{2+}$ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА ( $\omega = 9395 \text{ см}^{-1}$ )

*И.И.Бондарь, В.В.Суран*

*Ужгородский государственный университет  
294000, Ужгород, Украина*

Поступила в редакцию 22 июня 1992 г.

Исследовался механизм образования ионов  $Ba^{2+}$  в процессе ионизации атома  $Ba$  излучением лазера на иттрий-алюминиевом гранате (ЛИАГ). Для выяснения механизма образования ионов  $Ba^{2+}$  пучок атомов  $Ba$  облучался наряду с излучением ЛИАГ также и излучением лазера на красителе (ЛК), которое осуществляло дополнительное возбуждение нейтральных атомов в процессе их ионизации. Обнаружено, что выход ионов  $Ba^{2+}$  в случаях, когда излучение ЛК возбуждает атом  $Ba$  существенно меньше чем в случае, когда атом  $Ba$  не возбуждается. Этот эффект указывает на то, что образование ионов  $Ba^{2+}$  на частоте излучения ЛИАГ происходит в результате реализации двухэлектронного механизма.

Выполненные до настоящего времени исследования процессов образования двухзарядных ионов  $A^{2+}$  при ионизации щелочноземельных атомов лазерным излучением (см., например, <sup>1,2</sup>) показали, что в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра эти ионы образуются, в основном, в результате реализации каскадного механизма, когда образование ионов  $A^{2+}$  происходит в два этапа: в одном импульсе лазерного излучения сначала при ионизации нейтральных атомов  $A$  образуются однозарядные ионы  $A^+$ , а затем при ионизации ионов  $A^+$  уже образуются ионы  $A^{2+}$ . Что же касается инфракрасного диапазона спектра, то исследования <sup>3,4</sup> показывают, что процесс образования ионов  $A^{2+}$  в этом диапазоне нельзя объяснить реализацией каскадного механизма. Предполагается, что в этом диапазоне реализуется двухэлектронный механизм образования ионов  $A^{2+}$ , когда ионы  $A^{2+}$  образуются вследствие одновременного отрыва двух электронов от нейтрального атома. Однако однозначного доказательства реализации этого механизма до настоящего времени не получено. В связи с этим нами и был проведен поиск доказательств реализации в инфракрасном диапазоне спектра двухэлектронного механизма образования ионов  $A^{2+}$ .

В частности, нами исследовался механизм образования двухзарядных ионов при ионизации атомов  $Ba$  излучением лазера на иттрий-алюминиевом гранате (ЛИАГ)  $\omega = 9395 \text{ см}^{-1}$ . Для выяснения механизма образования ионов  $Ba^{2+}$  в этом случае на пучок атомов  $Ba$  одновременно с излучением ЛИАГ направлялось также и излучение перестраиваемого по частоте лазера на красителе (ЛК). Причем области фокусировок излучения ЛИАГ и ЛК совмещались.

Интенсивность излучения ЛИАГ подбиралась таким образом, чтобы процесс ионизации атома  $Ba$  этим излучением был насыщен (в нашем случае она была равной  $F = 3,5 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ ). При этом имело место как образование ионов  $Ba^+$ , так и ионов  $Ba^{2+}$ . Причем, выход ионов  $Ba^{2+}$  был всего в 40 раз меньше выхода ионов  $Ba^+$ .

Что же касается излучения ЛК, то его интенсивность была такой ( $F = 9,4 \cdot 10^{24} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ ), что при ионизации атома  $Ba$  этим излучением происходило лишь образование ионов  $Ba^+$ . Частота излучения ЛК изменялась в области

$\omega = 17860 - 18200 \text{ см}^{-1}$ . В эту область попадает ряд частот, на которых может реализоваться одно- и двухфотонное возбуждение атома Ba<sup>5</sup>. Таким образом добавление излучения ЛК в процессе ионизации атома Ba излучением ЛИАГ приведет к дополнительному возбуждению этого атома.

В эксперименте нами проводилось измерение выхода ионов Ba<sup>+</sup> и Ba<sup>2+</sup> в случаях, когда на атом Ba воздействуют: лишь пучок излучения ЛИАГ; лишь пучок излучения ЛК и оба пучка одновременно. Результаты эксперимента представлены на рис.

Рассмотрим сначала рис.а, где приведены данные, полученные для ионов Ba<sup>2+</sup>. Из этого рисунка видно, что выход ионов Ba<sup>2+</sup> в случае, когда на пучок атомов Ba воздействуют совместно излучение ЛИАГ и излучение ЛК, частота которого соответствует возбуждению атома Ba, меньше, чем в случае, когда на пучок воздействует лишь излучение ЛИАГ. Таким образом, дополнительное возбуждение атома Ba в процессе его ионизации излучением ЛИАГ приводит к уменьшению выхода ионов Ba<sup>2+</sup>. Причем наибольшее уменьшение выхода этих ионов имеет место в случае, когда имеет место однофотонное возбуждение атома Ba в состоянии  $6s6p^1P_1^0$  ( $\omega = 18060 \text{ см}^{-1}$ ).

Рассмотрим теперь результаты полученные нами для ионов Ba<sup>+</sup>. Они приведены на рис.б и в. На рис.б приведены данные, полученные при тех же интенсивностях лазерного излучения, что и данные, приведенные на рис.а. Из этого рисунка видно, что выход ионов Ba<sup>+</sup> в случае, когда на пучок атомов Ba воздействуют совместно излучение ЛИАГ и ЛК, больше, чем в случае, когда на пучок воздействует лишь излучение ЛИАГ.

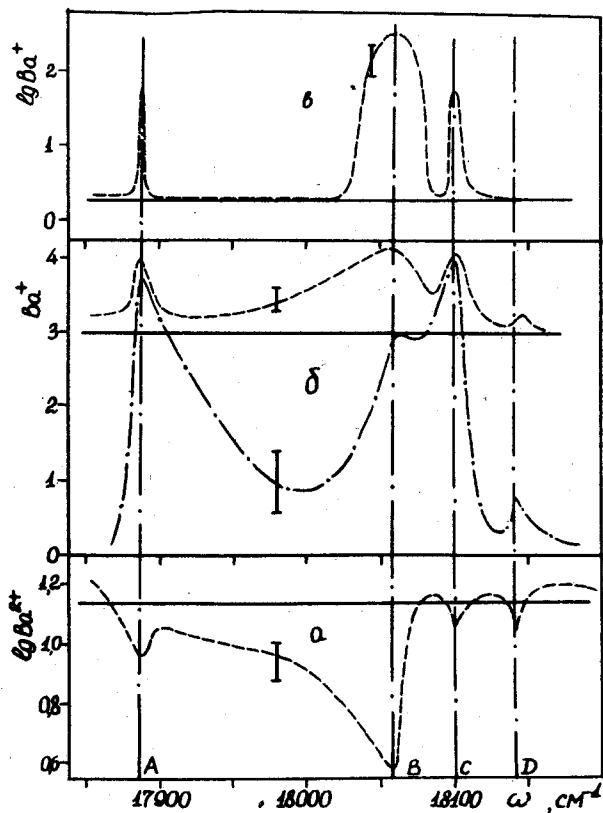
Таким образом, дополнительное возбуждение атома Ba в процессе его ионизации излучением ЛИАГ приводит к увеличению выхода ионов Ba<sup>+</sup>. Причем максимумы в выходе ионов Ba<sup>+</sup> в этом случае совпадают по частоте с минимумами в выходе ионов Ba<sup>2+</sup>.

Увеличение выхода ионов Ba<sup>+</sup> при дополнительном возбуждении атома Ba естественно указывает на то, что вероятность образования ионов Ba<sup>+</sup> при этом возрастает. Вместе с тем, из приведенных на рис.б данных нельзя сделать вывод о степени увеличения вероятности образования ионов Ba<sup>+</sup> на различных частотах. Это связано с тем, что из-за того, что эти данные получены в условиях насыщения процесса ионизации, максимумы в выходе ионов Ba<sup>+</sup> имеют примерно одинаковые амплитуды. В связи с этим нами было проведено измерение выхода ионов Ba<sup>+</sup> при меньших интенсивностях излучения ЛИАГ и ЛК. Эти данные приведены на рис.в. Из них следует, что наибольшее увеличение вероятности образования ионов Ba<sup>+</sup> имеет место в случае, когда излучением ЛК возбуждается состояние  $6s6p^1P_1^0$ , то есть, на той же частоте, на которой имеет место наибольшее уменьшение выхода ионов Ba<sup>2+</sup>.

Таким образом результаты эксперимента показывают, что дополнительное возбуждение атома Ba в процессе его ионизации излучением ЛИАГ приводит к увеличению вероятности образования ионов Ba<sup>+</sup> и к уменьшению выхода ионов Ba<sup>2+</sup>. Причем, чем больший рост вероятности образования ионов Ba<sup>+</sup>, тем большее уменьшение выхода ионов Ba<sup>2+</sup>. Этот эффект нельзя объяснить в модели реализации каскадного механизма образования ионов Ba<sup>2+</sup>. Так, действительно, поскольку в этой модели ионы Ba<sup>+</sup> являются мишенью для образования ионов Ba<sup>2+</sup>, то любое повышение вероятности образования ионов Ba<sup>+</sup> естественно приведет и к увеличению выхода ионов Ba<sup>2+</sup>. По крайней

мере, выход ионов  $Ba^{2+}$  не должен уменьшаться.

Что же касается двухэлектронного механизма, то наблюдаемый нами эффект уменьшения выхода ионов  $Ba^{2+}$  при увеличении вероятности образования ионов  $Ba^+$  хорошо объясняется в модели реализации этого механизма. Так, как отмечалось выше при реализации этого механизма нейтральные атомы  $Ba$  должны быть мишенью для образования как ионов  $Ba^+$ , так и ионов  $Ba^{2+}$ .



Результаты измерений выхода ионов  $Ba^+$  и  $Ba^{2+}$  в зависимости от частоты излучения ЛК: штриховые кривые соответствуют процессу ионизации, когда на атом  $Ba$  воздействуют совместно излучение ЛИАГ и ЛК, штрих-пунктирные кривые – когда на атом воздействует лишь излучение ЛК, а сплошные горизонтальные линии – когда на атом воздействует лишь излучение ЛИАГ. Вертикальными штрих-пунктирными линиями с буквами внизу отмечены частоты излучения ЛК, которые соответствуют переходам в спектре нейтрального атома  $Ba$ :

$$A - 6s^2 1S_0 + 2\hbar\omega \rightarrow 6s7d^3 D_2 \quad /17881 \text{ см}^{-1}/;$$

$$B - 6s^2 1S_0 + \hbar\omega \rightarrow 6s6p^1 P_1^0 \quad /18060 \text{ см}^{-1}/;$$

$$C - 6s^2 1S_0 + 2\hbar\omega \rightarrow 5d6d^3 D_2 \quad /18100 \text{ см}^{-1}/;$$

$$D - 6s6p^1 P_1^0 + \hbar\omega \rightarrow 5d6d^3 D_2 \quad /18140 \text{ см}^{-1}/;$$

Данные, приведенные на рис. а и б, получены при интенсивностях излучения ЛИАГ и ЛК соответственно равных  $F_1 = 3,5 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$  и  $F_2 = 9,4 \cdot 10^{24} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ , а на рис. в – при  $F_2 = 1,5 \cdot 10^{29} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$  и  $F_1 = 2,0 \cdot 10^{24} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ .

Допустим теперь, что в процессе ионизации нейтральных атомов  $Ba$  с реализацией двухэлектронного механизма вносится дополнительное возбуждение атомов, которое повышает вероятность образования ионов  $Ba^+$ . Внесение та-

кого возбуждения в условиях, когда процесс ионизации атома Ва насыщен (а именно в таких условиях получены наши результаты), приведет к тому, что насыщение наступит за более короткое время, чем в случае, когда возбуждение отсутствует. Эффект насыщения процесса ионизации, как известно, состоит в том, что вследствие многофотонной ионизации, нейтральные атомы в области их взаимодействия с лазерным излучением отсутствуют. Таким образом, внесение дополнительного возбуждения атомов Ва в процессе их ионизации приводит к тому, что отсутствие атомов Ва в области взаимодействия наступает раньше, чем при отсутствии возбуждения. Поскольку при реализации двухэлектронного механизма нейтральные атомы Ва являются мишенью для образования ионов  $Ba^{2+}$ , то такое изменение момента наступления отсутствия атомов Ва, естественно, приведет и к уменьшению выхода ионов  $Ba^{2+}$ .

Таким образом, полученные нами результаты указывают на то, что образование ионов  $Ba^{2+}$  при ионизации атомов Ва излучением ЛИАГ происходит в результате реализации двухэлектронного механизма. Отметим, что эти результаты являются первым доказательством реализации двухэлектронного механизма. Однако вопрос, каким образом при реализации этого механизма происходит одновременный отрыв нейтральных атомов двух электронов, все еще остается открытым.

В заключение выражаем искреннюю благодарность Делоне Н.Б. за постоянный интерес к нашим исследованиям и обсуждение полученных нами результатов.

- 
1. I.I.Bondar, N.B.Delone, M.I.Dudich, and V.V.Suran, J. Phys. B **21**, 2763 (1988).
  2. Y.Zhu, R.R.Jones, W.Sandner et al., J. Phys. B **22**, 585 (1989).
  3. Т.Т.Бернат, И.И.Бондарь, В.В.Суран, В сб.: Многофотонные переходы в атомах. Научный совет по спектроскопии АН СССР, 1990, с.152.
  4. Т.Т.Бернат, И.И.Бондарь, В.В.Суран, Опт. и спектр. **70**, 237 (1991).
  5. И.И.Бондарь, В.В.Суран, Квант. электрон. **17**, 1038 (1990).