

## РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ЭЛЕКТРОНОВ С АТОМАМИ ИТТЕРБИЯ

С. М. Казаков и О. В. Христофоров

Исследование процессов, протекающих при взаимодействии электронов с атомами Yb, представляет значительный интерес не только с теоретической точки зрения, но и в связи с практическими потребностями, вызванными созданием лазеров на парах иттербия [1, 2]. Но на сегодняшний день имеется, по-видимому, единственная работа [3], в которой в режиме пересекающихся электронного и атомного пучков измерены в абсолютной мере сечения возбуждения наиболее интенсивных спектральных линий YbI и YbII. Что касается влияния процессов образования и распада короткоживущих состояний отрицательных ионов Yb<sup>-</sup> на столкновительные явления, то подобные сведения в литературе полностью отсутствуют. Поэтому мы с целью получения такой информации исследовали спектры энергетических потерь и измерили энергетические зависимости дифференциальных сечений (ДС) упругого и неупругого рассеяния электронов на атомах иттербия.

Электронный спектрометр со 127-градусным электростатическим энергоанализатором рассеянных на угол 90° электронов был описан ранее [4]. Ток первичного пучка составлял  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  А при полной ширине энергетического разброса на полувысоте максимума распределения 0.3 эВ. Угловое разрешение энергоанализатора  $\sim 6^\circ$ . Абсолютная энергетическая шкала калибрована с точностью  $\pm 0.03$  эВ путем определения потенциала появления тока в зоне столкновения с учетом полуширины аппаратной функции у основания. Частота следования импульсов канального электронного умножителя — детектора рассеянных электронов  $10^4$  с<sup>-1</sup>, статистический разброс экспериментальных точек  $< 1\%$ , давление исследуемых паров  $\sim 10^{-3}$  Тор.

Как отмечалось в [3], полностью заполненная 4f-оболочка обуславливает наличие у иттербия интенсивного «простого» спектра, связанного с возбуждением одного внешнего s-электрона, что приводит к образованию системы уровней, сходной с системой уровней энергии атомов второй группы периодической системы. Это подтверждается и нашими наблюдениями. Так, в спектре рассеянных электронов (рис. 1) доминируют линии, соответствующие возбуждению  $6^3P_{0,1,2}$ ,  $6^1P_1$  и  $7^1S_0$ -уровней. Можно отметить, что в образовании самой интенсивной линии спектра потерь помимо  $6^1P_1$ -уровня значительный вклад вносят и близко расположенные  $5^3D_{123}$ -уровни, вероятность возбуждения которых достаточно велика. Справа от максимума линии заметно проявление  $5^1D_2$ -уровня. Как и в атомах подгруппы цинка,  $(n+1)^1S_0$ -уровень возбуждается значительно эффективнее, чем близлежащий  $(n+1)^3S_1$ -уровень, поскольку максимум потери приходится именно на него.

Линия A ( $E_a = 5.0$  эВ) соответствует возбуждению группы уровней, наиболее вероятными из которых являются  $7^1P_1$ ,  $6^1D_2$  и  $6^3D_{123}$ . Экстремум B ( $E_a = 5.5$  эВ) обусловлен возбуждением аналогичных уровней с большими значениями  $n$ . И наконец, линия C ( $E_a = 5.92$  эВ) отражает наличие большого числа высоковозбужденных состояний, сходящихся к границе однократной ионизации ( $E_i = 6.25$  эВ).

Энергетические зависимости ДС упругого рассеяния и возбуждения  $6^3P_{012}$  и  $6^1P_1$ -уровней показаны на рис. 2. Как видно, все кривые имеют немонотонный ход, свидетельствующий о сильном влиянии резонансных эффектов на сечения рассеяния. При этом нами наблюдались два вида резонансов. Одни из них связаны с основным состоянием атома, а другие расположены вблизи возбужденных уровней.

Резонансы формы, обусловленные рассеянием электронов с отличными от нуля угловыми моментами, проявляют себя в виде глубоких минимумов при  $E = 0.28$  и  $1.76$  эВ в сечении упругого рассеяния. Мы классифицируем их соответственно как  $p$ - и  $d$ -волновые резонансы. По аналогии с резонансами в рассеянии электронов на атомах второй группы [5, 6] их можно сопоставить

$(6s^26p)^2P$ - и  $(6s^26d)^2D$ -состояния иона  $Yb^-$ . Возможно, что  $d$ -резонанс более широкий и имеет структуру вида максимум ( $E=1.04$  эВ)—минимум.

Поскольку существование подобных резонансов не являлось очевидным для атомов редкоземельных элементов, то в специально поставленном эксперименте была проверена пропорциональность сигнала рассеянных электронов при столь низких энергиях величине давления и тока первичного пучка. Пропорциональность сохранялась в интервале давлений паров  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  Тор, это свидетельствовало, что структура при указанных энергиях не является аппаратной.

Вышележащий резонанс расположен вблизи порогов возбуждения  $6^3P_{012}$ -уровней. Интенсивный минимум в ДС упругого рассеяния ( $E=2.48$  эВ) полностью коррелирует по энергии с максимумом в возбуждении  $6^3P_{012}$ -уровней, что подтверждает резонансный характер этой особенности и указывает на многоканальность распада состояния  $Yb^-$ . Измеренная кривая в большей мере отражает ход энергетической зависимости ДС возбуждения метастабильного  $6^3P_2$ -уровня, имеющего доминирующее сечение в припороговой области.

На всех кривых можно проследить структуру, связанную с наличием короткоживущего состояния  $Yb^-$ , лежащего над  $6^1P_1$ - и  $5^3D_{123}$ -уровнями атома.



Рис. 1. Спектр электронов, рассеянных атомами иттербия.

$E=14$  эВ,  $\theta=90^\circ$ .

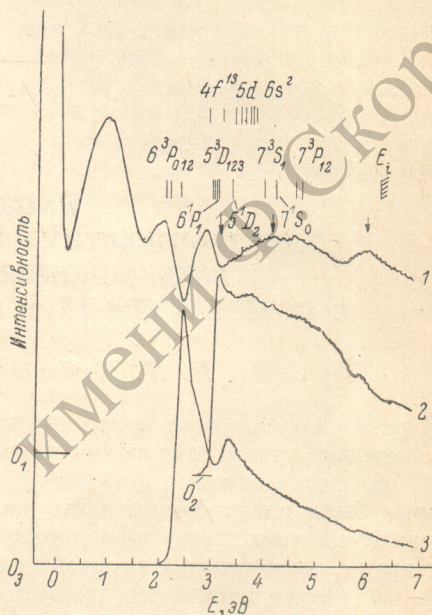


Рис. 2. Энергетические зависимости ДС упругого рассеяния (1), возбуждения  $6^1P_1$ - (2) и  $6^3P_{012}$ -уровней (3).

Стрелки — экстремумы в оптическом канале [3].

Это резонансное состояние приводит к образованию особенностей вида максимум—минимум (2.94 и 3.22 эВ соответственно) в ДС упругого рассеяния, минимум—максимум (3.10 и 3.36 эВ) в ДС возбуждении  $6^3P_{012}$ -уровней и приводит к появлению максимума (3.18 эВ) непосредственно за порогом возбуждения  $6^1P_1$ - и  $5^3D_{123}$ -уровней.

Широкий максимум на кривой 2 при  $E=3.76$  эВ (рис. 2) является следствием образования состояний  $Yb^-$  около  $4f^{13}5d6s^2$ -уровней, поскольку он расположен в непосредственной близости от границы серии таких уровней атома [7].

Слабовыраженные структурные особенности зарегистрированы также при энергиях 4.2 и 4.6 эВ, которые можно связать с существованием резонансов, родоначальными состояниями которых являются  $7s$ - и  $7p$ -уровни. Широкие экстремумы при  $E=6.0$  эВ характерны для всех каналов рассеяния. Из-за большого числа уровней атома в этой области трудно указать их родоначальные состояния.

Сопоставление с данными оптических измерений [3] дает хорошее согласие в энергетическом положении некоторых экстремумов, наблюдаемых в различных каналах (рис. 2).

Авторы признательны М. Г. Козлову и Л. Л. Шимону за оказанное содействие в выполнении данной работы.

#### Литература

- [1] P. Cahuzac. Phys. Lett., 427, 473, 1968.
- [2] В. М. Климкин. Квант. электрон., 2, 579, 1975.
- [3] Л. Л. Шимон, Н. В. Головачук, И. И. Гарга, И. В. Курта. Опт. и спектр., 50, 1037, 1981.
- [4] С. М. Казаков, А. И. Коротков, О. Б. Шпеник. ЖЭТФ, 78, 1687, 1980.
- [5] P. D. Burrow, J. A. Michejda, J. Comer. J. Phys. B, 9, 3225, 1976.
- [6] С. М. Казаков. Письма ЖЭТФ, 7, 900, 1981.
- [7] W. C. Martin, R. Zalubas, L. Hagan. Atomic Energy Levels. 60. NBS, Washington, 1978.

Поступило в Редакцию 26 мая 1982 г.

УДК 535.33 : 546.48.004.14

### НАБЛЮДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИИ ВОЗБУЖДЕННЫХ ИОНОВ КАДМИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*И. П. Богданова и С. В. Рязанцева*

В работах [1-3] были получены данные, свидетельствующие о том, что при прохождении пучка электронов через пары кадмия при давлении  $\approx 10^{-3}$  Тор в трубке возбуждения возникают возбужденные долгоживущие частицы, которые были идентифицированы как молекулярные ионы кадмия. Эти молекулярные частицы движутся в зоне электронного пучка от электродов навстречу друг другу, диссоциируя спонтанно или в столкновениях с нормальными атомами на возбужденные нейтральные атомы или атомарные ионы кадмия. Было сделано заключение, что возбужденные частицы образуются, вероятнее всего, за счет срыва электронами пучка атомов кадмия, адсорбированных на поверхностях медных посеребренных сеток, закрывающих отверстия анодов, т. е. за счет явления электронно-стимулированной десорбции (ЭСД).

В то же время при изучении электронно-стимулированной десорбции с металлических поверхностей масс-спектрометрическим методом регистрируют в основном атомарные, а не молекулярные ионы. Поэтому представилось необходимым аналогичные измерения провести в условиях, когда было бы заведомо известно, что возможен срыв электронами молекулярных частиц.

Так, в работе [4] молекулярные ионы  $H_2^+$ ,  $CO^+$ ,  $H_2O^+$  и  $CH_3^+$  были обнаружены при десорбции электронами с энергией  $E=2.5$  кэВ различных газов ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  и  $C_2H_2$ ) с поверхности кремния. Поэтому в качестве объекта исследования был выбран также неметалл — стекло — материал, широко применяемый при изготовлении газоразрядных приборов.

Для наблюдения ЭСД возбужденных частиц с поверхности стекла была применена методика, описанная в [1]. Измерения проводились в отпаянной трубке возбуждения с электронной пушкой, конструкция которой, представленная на рис. 1 а, несколько отличалась от приведенной в [1, 2]. Отличие заключалось в том, что электронный пучок, сформированный системой электродов, пройдя пространство возбуждения, попадал не на коллектор  $A_4$ , а на плоское стеклянное окошко, впаянное в баллон трубки. За окошком вплотную к нему располагался анод  $A_4$ .

На аноды  $A_1$  и  $A_2$  электронной пушки подавались потенциалы  $\approx (5-10)$  В. Энергия электронов пучка определялась потенциалом анода  $A_3$  относительно заземленного катода. Анод  $A_4$  можно было поддерживать при потенциале