

## ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ АТОМА КАДМИЯ

В. В. Советер, И. П. Запесочный и О. Б. Шпенник

Проведены исследования функций возбуждения спектральных линий атома кадмия (в спектральной области 2200—8200 Å) электронным ударом от порога до 15 эв и определены абсолютные сечения возбуждения. Определены сечения возбуждения линий, расположенных в ультрафиолетовой и красной областях спектра, что дает возможность оценить скорость спада сечений линий с высоколежащих уровней внутри большинства серий. На функциях возбуждения спектральных линий обнаружена группа максимумов за порогом ионизации. Предполагается, что эти максимумы обусловлены автоионизационными состояниями кадмия.

Первые эксперименты по возбуждению атомов кадмия медленными электронами были проведены Ларше [1] еще в 1931 г. фотографическим методом. После появления фотоэлектронных умножителей возбуждение атомов кадмия электронным ударом изучалось в работах [2-6]. В [2, 3] впервые были измерены эффективные сечения девяти спектральных линий и обнаружена структура на функциях возбуждения некоторых линий. В более поздней работе [4] были значительно лучше разрешены максимумы тонкой структуры трех наиболее интенсивных спектральных линий кадмия. В [5, 6] возбуждение кадмия исследовалось в условиях разряда.

Все же имеющийся экспериментальный материал по возбуждению атомов кадмия электронным ударом является весьма ограниченным. В связи с этим нами были поставлены эксперименты с целью получения новых, достаточно полных и корректных данных об эффективных сечениях и выяснения особенностей электронного возбуждения атома кадмия.

### Установка и методика измерений

Основными узлами нашей экспериментальной установки являются: металлическая разборная камера, в которой размещена миниатюрная паронаполненная ячейка,<sup>1</sup> и электронная пушка; оптическая система; система регистрации излучения атомов и модулятор электронного пучка.

Параллельный электронный пучок круглого сечения диаметром 2,0 мм формировался треханодной электронной пушкой. Пучок модулировался с частотой  $\nu = 2010$  гц импульсами прямоугольной формы (коэффициент заполнения 0,5), которые подавались на второй электрод электронной пушки. Пушка крепилась к паронаполненной ячейке [7], которая служит собственно камерой столкновения.

В этих условиях электронная пушка работала при высоком вакууме и пробег электронов пучка в рабочей среде определялся практически только расстоянием между ускоряющим электродом и приемником электронов, которое было всего 3 мм. Это позволило увеличить интенсивность выходного излучения за счет повышения давления в объеме соударе-

<sup>1</sup> Все предыдущие измерения проводились при заполнении всего объема стеклянных камер парами кадмия.

ний без нарушения условий однократности столкновений. Во избежание помех из-за отраженных и вторичных электронов коллектор электронов был выполнен в виде глубокого цилиндра Фарадея и покрывался аквадагом. Ампула с рабочим веществом соединялась с газовой ячейкой посредством паропровода в виде трубки.

Излучение из ячейки и вакуумной камеры выводилось через кварцевые окна под углом  $90^\circ$  к электронному пучку и проецировалось на входную щель монохроматора (ИСП-51, ЗМР-3, МДР-2), на выходе которого был установлен фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-18А, ФЭУ-64, ФЭУ-79). Электрический сигнал ФЭУ, соответствующий световому потоку, усиливался узкополосным усилителем и подавался на вход синхронного детектора, выходной сигнал которого измерялся милливольтметром или самописцем.

Эффективные сечения спектральных линий определялись путем сравнения их абсолютной интенсивности с интенсивностью излучения линий 5155 и 4307 Å, сечения возбуждения которых были измерены ранее [2, 3].

Калибровка энергии налетающих электронов осуществлялась по сдвигу вольт-амперной характеристики электронного тока на коллектор и по порогу появления наиболее интенсивных линий в спектре атома кадмия 3261 и 5086 Å. Таким образом, возможная ошибка в определении энергии электронного пучка одинакова для всех измеренных линий, что и дает возможность сравнивать энергетические положения экстремумов на разных кривых как внутри одной серии, так и между различными сериями. Отрицательный объемный заряд, который может влиять на энергию электронного пучка в неодинаковой степени при разных ускоряющих потенциалах, в наших измерениях практически отсутствовал. Это контролировалось путем сравнения экспериментальной и теоретической разности порогов возбуждения линии 3261 Å и одной из высоколежащих линий (или ионной линии), которые совпадали с точностью  $\pm 0.15$  эв.

Постоянство условий эксперимента, при которых измерялись все линии данной серии, проверялось путем записи функции возбуждения линии  $5^1S_0 - 5^3P_1$  ( $\lambda$  3261 Å) в начале и в конце измерений. Низкочастотные флуктуации давления паров кадмия также были подавлены, о чем свидетельствовала высокая стабильность интенсивности выходного излучения.

Для исключения погрешности, вносимой спектральным прибором и ФЭУ за счет поляризации спектральных линий, перед входной щелью монохроматора устанавливался деполаризатор [8]. Правда, в спектральной области  $\lambda < 3700$  Å деполаризатор не мог быть использован вследствие большого поглощения. Однако функции возбуждения линий с  $n^3S_1$ -уровней, для которых  $\lambda < 3700$  Å, практически не искажены этим эффектом из-за малой величины их поляризации. Наши экспериментальные оценки для линий 5086 и 3133 Å показали, что их поляризация в изученном интервале энергии меньше 3%. Таким образом, только сечения возбуждения линий с  $n^3D_{123}$ -уровней не свободны от возможных погрешностей, вносимых поляризацией излучения.

### Результаты измерений

Эффективные сечения и функции возбуждения линий измерялись при следующих условиях: давление паров кадмия в ячейке —  $6 \cdot 10^{-3}$  тор, ток электронного пучка — 80 мка, энергетический разброс электронов в пучке — 0.6 эв. При этих условиях вторичные процессы (ступенчатое возбуждение; удары второго рода; самопоглощение, за исключением резонансных линий) практически отсутствовали. Об этом свидетельствует полное совпадение кривых возбуждения для одной из интенсивных спектральных линий каждой серии, измеренных в широком интервале давления паров в камере столкновений ( $8 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-3}$ ) и токов электронного пучка (1–100 мка).

Величины эффективных сечений возбуждения линий приведены в табл. 1. Они получены путем усреднения четырех отдельных измерений, при этом разброс значений от средней величины не превышал 15%. С учетом же погрешности измерения сечений возбуждения линий 4307 и 5155 Å в работе [3] (которые, как уже упоминалось выше, использова-

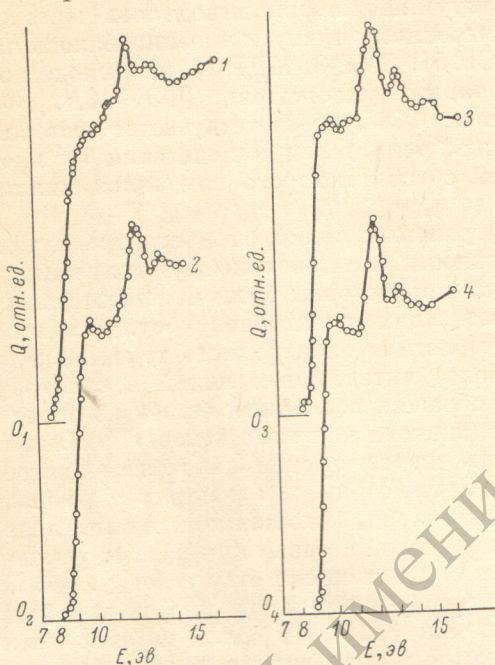


Рис. 1. Функции возбуждения линий резкой серии одиночников.

1 — 5155, 2 — 4307, 3 — 3982, 4 — 3818 Å.

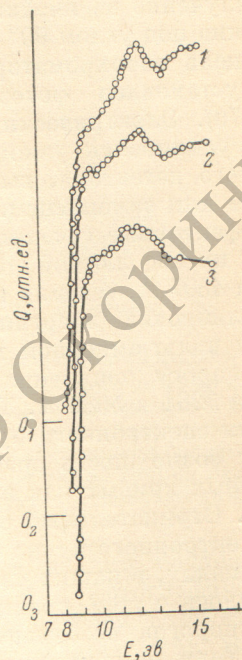


Рис. 2. Функции возбуждения линий главной серии одиночников.

1 — 8200, 2 — 6778, 3 — 6201 Å.

лись нами в качестве реперных) ошибка в определении абсолютных сечений составляет 55%. Для красной линии 8200 Å максимальное отклонение от истинной величины может достигать 80%.

Функции возбуждения для каждой из шести серий представлены на рис. 1-6. Экспериментальная погрешность положения точек по оси ординат не превышает  $\pm 3\%$  (в максимуме кривых), а точность калибровки энергии возбуждающего пучка электронов составляет  $\Delta E = \pm 0.3$  эв.

### Обсуждение результатов

Рассмотрим прежде всего абсолютные сечения возбуждения. Из табл. 1 видно, что наибольшими сечениями обладают синглетная резонансная линия 2288 Å ( $Q_{14.0 \text{ эв}} = 1.1 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>) и резонансная интеркомбинационная линия 3261 Å ( $Q_{\text{макс}} = 0.21 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>),<sup>2</sup> а также головная линия диффузной серии одиночников ( $Q_{14.0 \text{ эв}} = 0.38 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>). Сечения остальных линий заключаются в пределах  $1 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup>.

Подробный анализ абсолютных сечений возбуждения показывает, что скорости их спада внутри отдельных серий существенно различаются. Оказывается, что сечения линий кадмия (как и линий гелия и щелочных элементов [9]) внутри отдельных серий можно охватить следующей эмпирической формулой:

$$Q_E(n) = Cn^{-\alpha}, \quad (1)$$

<sup>2</sup> Эти значения сечений возбуждения получены без учета резонансного самопоглощения.

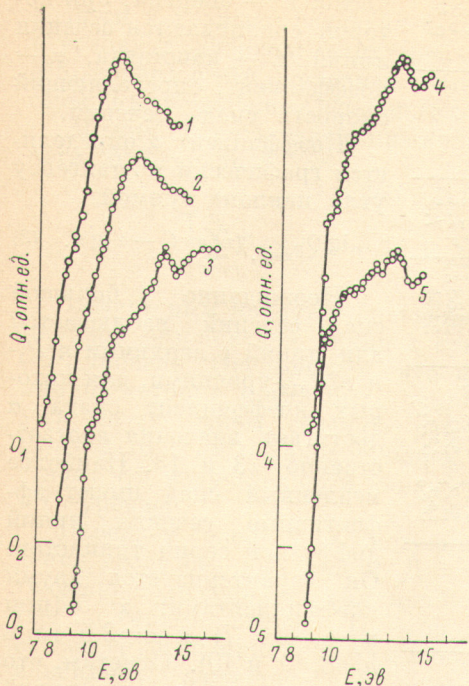


Рис. 3. Функции возбуждения линий диффузной серии одиночников.  
 1 — 6438, 2 — 4662, 3 — 4140, 4 — 3904, 5 — 3776 Å.

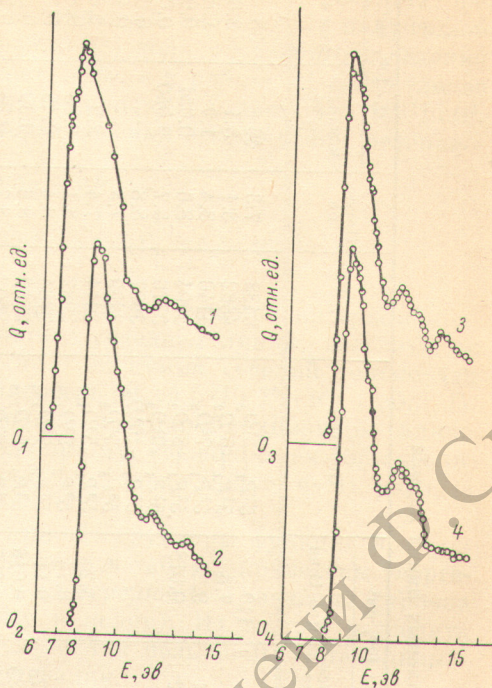


Рис. 4. Функции возбуждения линий резонансной серии триплетов.  
 1 — 5086, 2 — 3133, 3 — 2734, 4 — 2712 Å.

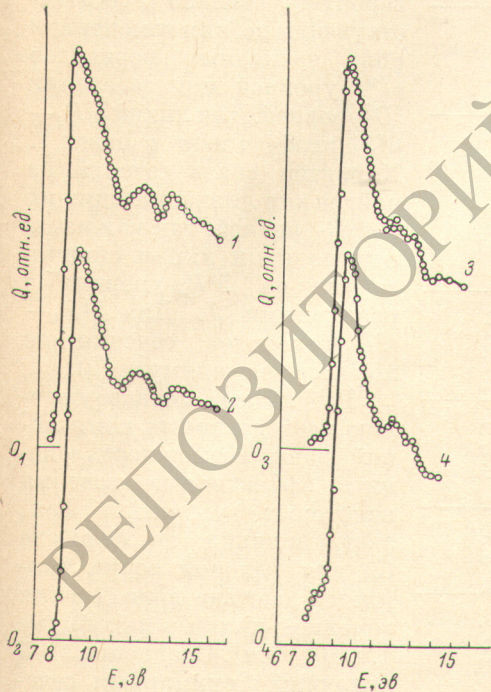


Рис. 5. Функции возбуждения линий главной серии триплетов.  
 1 — 7399/85/46, 2 — 6116/6111/6099, 3 — 5606, 4 — 5340 Å.

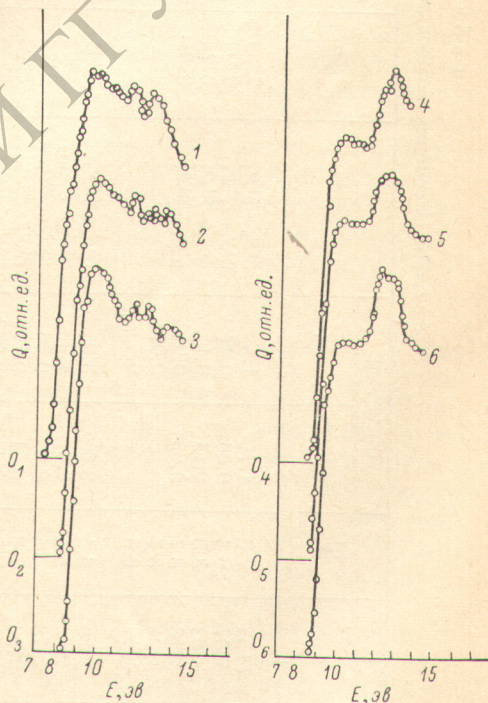


Рис. 6. Функции возбуждения линий диффузной серии триплетов.  
 1 — 3614/13/10, 2 — 2982, 3 — 2764, 4 — 2660, 5 — 2602, 6 — 2566 Å.

Таблица 2

## Максимумы тонкой структуры функций возбуждения спектральных линий кадмия

Синглеты																	
$n$	Порог, эв		Положение максимумов (эв) линий $5^1P_1 - n^1S_0$			$n$	Порог, эв		Положение максимумов (эв) линий $6^1S_0 - n^1P_1$			$n$	Порог, эв		Положение максимумов (эв) линий $5^1P_1 - n^1D_2$		
7	7.8		(10.1)	12.1	13.4	7	8.1		(10.0)	12.3		5	7.3		—	11.0	—
8	8.3		10.0	12.1	13.5	8	8.4		9.8	12.3		6	8.1		—	12.0	—
9	8.5		10.1	12.2	13.6	9	8.6		10.0	11.8—12.3		7	8.4		9.3	(10.2)	13.2
10	8.7		10.2	12.2	13.5							8	8.6		9.4	10.4	13.2
												9	8.7		9.5	10.3	13.2
I			10.1	12.1	13.5				10.0	12.3					9.4	10.3	13.2
II			10.0	12.0	13.5				10.0	12.0					10.0	10.0	13.5
Триплеты																	
$n$	Порог, эв		Положение максимумов (эв) линий $5^3P_J - n^3S_1$			$n$	Порог, эв		Положение максимумов (эв) линий $6^3S_1 - n^3P_{012}$			$n$	Порог, эв		Положение максимумов (эв) линий $5^3P_2 - n^3D_{123}$		
6	6.4	7.8	—	12—13	—	7	8.1	8.7	12.3	13.7		5	7.4	9.5÷10.0	11.8	12.7	
7	7.8	8.7	11.8		13.7	8	8.4	9.0	11.8 ÷	12.7	13.8	6	8.1	10.0	(11.8)	(12.6)	13.7
8	8.3	9.0	11.8	12.7	13.8	9	8.6	9.2	11.8	12.7	—	7	8.4	10.0	(11.9)	(12.6)	13.8
9	8.5	9.2	11.8	12.7	13.5	10	8.7	9.2	11.8	12.6	—	8	8.6	10.0		12.7	
												9	8.7	10.0		12.1÷12.7	
												10	8.8	10.0		12.1÷12.7	
I			11.8	12.7	13.8				11.8	12.7	13.8			10.0	11.8	12.7	13.8
II			12.0	12.7	13.5				12.0	12.7	13.5			10.0	12.0	12.7	13.5

зации составляет в среднем 0.6 эв, что в точности совпадает с энергетическим разбросом электронного пучка в наших экспериментах. Из этого следует, что ответственные за образование четвертого стабильного максимума при 12.0 эв автоионизационные уровни следует искать вблизи энергии 11.4 эв.

Конечно, для того чтобы глубже разобраться в механизме образования этих стабильных максимумов, необходимо провести дополнительные исследования с электронными пучками повышенной энергетической однородности.

Относительно припороговых максимумов, т. е. максимумов первой группы, можно заметить следующее: основное их отличие от «стабильных» максимумов состоит в том, что их энергетическое положение постепенно смещается в сторону больших энергий внутри одной и той же серии с ростом  $n$  верхнего уровня линий. Как видно из рисунков, наиболее резко припороговые максимумы проявляются на линиях резкой и главной серии триплетов, а в случае диффузных серий наблюдаются только изгибы на восходящей ветви кривых.

Примечательным фактом является совпадение положения (табл. 2) припороговых максимумов триплетных линий с  $n^3S_1$ - и  $n^3P_{012}$ -уровней при одинаковых значениях главного квантового числа ( $n=7 \div 9$ ). Энергетический интервал порог — первый максимум в случае линий резкой серии триплетов уменьшается с ростом  $n$  (от 6 до 9) от величины 1.4 до 0.7 эв, а для линий резкой серии эта величина постоянная и составляет 0.6 эв. Полагая, что головной максимум триплета  $6^3S_1-6^3P_{012}$  располагается от порога тоже на 0.6 эв (что опять совпадает с энергетическим разбросом пучка), ясно, что его положение также хорошо совпадает с главным максимумом линий с  $6^3S_1$ -уровней.

Такое совпадение припороговых максимумов на линиях этих двух серий, по-видимому, не является случайным, а указывает на общую причину их происхождения. На этом основании можно считать, что имеет место интенсивное каскадное заселение с  $n^3P_{012}$ -уровней не только  $6^3S_1$ -уровней (как это видно из анализа результатов абсолютных измерений), но и более высоколежащих триплетных  $S$ -термов.

#### Литература

- [1] К. Л а г с х е. Zs. Phys., 67, 440, 1931.
- [2] И. П. Запесочный, В. С. Шевера. ДАН СССР, 141, 559, 1961.
- [3] И. П. Запесочный, В. С. Шевера. Матер. XV совещ. по спектр., 2, 167, ВИНТИ, 1964.
- [4] И. П. Запесочный, О. Б. Шпеник. ЖЭТФ, 50, 890, 1966.
- [5] А. Н. Ключарев. Автореф. канд. дисс., Л., 1971.
- [6] Н. П. Пенкин, Т. П. Редько. Опт. и спектр., 20, 197, 1966.
- [7] О. Б. Шпеник, И. П. Запесочный, А. Н. Завилопуло. ЖЭТФ, 60, 513, 1971.
- [8] В. Л. Федоров, А. П. Мезенцев. Опт. и спектр., 19, 12, 1965.
- [9] И. П. Запесочный. Автореф. докт. дисс., Ужгород, 1966.
- [10] Сб. «На пороге в космос», 218. ИЛ, 1960.

Поступило в Редакцию 31 августа 1972 г.