

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ
УРОВНЕЙ КАДМИЯ МЕДЛЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

И. П. Богданова, С. В. Рязанцева и В. Е. Яхонтова

Для ряда атомарных и ионных линий кадмия произведены измерения зависимости кажущихся эффективных сечений возбуждения и функций возбуждения от давления.

При возбуждении инертных газов электронным ударом в диапазоне давлений $10^{-4} \div 10^{-1}$ тор для некоторых уровней наблюдается рост кажущегося эффективного сечения возбуждения от давления [1^{-3}]. Природа процесса, обуславливающего дополнительное заселение этих уровней, пока еще не установлена. До настоящего времени оставалось также неизвестным, является ли это присущим только инертным газам или наблюдается и при возбуждении атомов других элементов, например паров металлов 2-й группы.

В настоящей работе в качестве объекта исследования был выбран кадмий. Для ряда атомарных и ионных линий кадмия произведены измерения зависимости кажущихся эффективных сечений возбуждения и функций возбуждения от давления.

Все измерения производились в отпаянной трубке возбуждения с электронной пушкой [4]. Трубка возбуждения, имевшая отросток с металлическим кадмием и геттер, помещалась в две печи. Температура нижней печи, определяющей давление паров кадмия в трубке возбуждения, менялась от 180 до 275° С и измерялась с помощью термпары. Спай термпары был помещен вблизи от поверхности рабочего вещества. Температура верхней печи поддерживалась постоянной и была выше температуры нижней печи. Давление паров кадмия определялось по уравнению упругости пара [5]. Перед каждым измерением производился длительный (4 ÷ 5-часовой) прогрев трубки возбуждения. Как показали контрольные измерения, за это время достигалось стационарное состояние.

Свечение паров кадмия возбуждалось пучком электронов $\varnothing 4$ мм. Плотность тока в пучке не превышала $1.6 \cdot 10^{-3}$ А/см². Энергия возбуждающих электронов менялась от порога возбуждения до 150 эВ. Разброс энергий возбуждающих электронов, определенный методом задерживающего поля, не превышал 0.5 эВ.

Измерения производились с помощью регистрирующей системы, работающей в режиме счета фотонов [6].

Произведены следующие измерения.

1. В диапазоне давлений от 0.1 до 14 мтор измерена зависимость кажущихся эффективных сечений возбуждения от давления для атомарных и ионных линий при энергии электронов 100 эВ.

2. Определена форма функций возбуждения этих линий от порога возбуждения до 150 эВ для разных давлений.

3. Измерены абсолютные значения эффективных сечений возбуждения этих линий при энергии электронов 100 эВ для $p=0.1$ мтор.

Таблица 1

Члены серий	λ Å	Переход	$\sigma_{p=14 \text{ мтор}} / \sigma_{p=0.1 \text{ мтор}}$	$\sigma \times 10^{18} \text{ см}^2$ ($p = 0.1 \text{ мтор } 100 \text{ эВ}$)
2	5155.68	$5'P_1 - 7'S_0$	2.0	0.75
3	4306.82	$5'P_1 - 8'S_0$	1.4	0.35
4	3981.77	$5'P_1 - 9'S_0$	1.0	0.10
5	3818	$5'P_1 - 10'S_0$	0.6	0.032
6	3724	$5'P_1 - 11'S_0$	0.4	0.011
1	6438.4696	$5'P_1 - 5'D_2$	1.6	22
2	4662.352	$5'P_1 - 6'D_2$	1.5	1.3
4	3905.1	$5'P_1 - 8'D_2$	1.0	0.032
5	3776	$5'P_1 - 9'D_2$	0.5	0.030
6	3697	$5'P_1 - 10'D_2$	0.3	0.026
				0.071
	4678.156	$5^3P_0 - 6^3S_1$	15.5	0.20
1	4799.918	$5^3P_1 - 6^3S_1$	16.1	0.31
	5015.824	$5^3P_2 - 6^3S_1$	13.6	0.020
2	3133.19	$5^3P_1 - 7^3S_1$	9.5	0.081
1	3610.510	$5^3P_2 - 5^3D_{1, 2, 3}$	15.2	—
	3612.8755			
	3614.450			
1	3466.201	$5^3P_1 - 5^3D_{1, 2}$	14.7	—
	3467.656			

Таблица 2

Члены серий	λ Å	Переход	$\sigma_{p=14 \text{ мтор}} / \sigma_{p=0.1 \text{ мтор}}$	$\sigma \times 10^{18} \text{ см}^2$ ($p = 0.1 \text{ мтор } E = 100 \text{ эВ}$)
1	6466.76	$6^2P_{1/2}^0 - 6^2D_{3/2}$	3.9	0.079
2	4030.26	$6^2P_{1/2}^0 - 7^2D_{3/2}$	7.2	0.012
	5338.96	$5^2D_{3/2} - 4^2F_{5/2}^0$	7.5	0.10
1	5379.63	$5^2D_{3/2} - 4^2F_{7/2}^0$	6.5	0.14
	4416.9	$5^2P_{3/2}^0 - 5s'^2D_{3/2}$	1.0	31
	3251.23	$5^2P_{1/2}^0 - 5s'^2D_{3/2}$	1.0	16
	3536.68	$5^2P_{3/2}^0 - 5s'^2D_{3/2}$	1.0	2.9
	5026.9	$5^2D_{3/2} - 5p'^4F_{7/2}^0$	1.0	0.034
	4883.08	$5^2D_{3/2} - 5p'^4F_{9/2}^0$	1.0	0.09
				$\sigma \times 10^{18} \text{ см}^2$ ($p = 0.33 \text{ мтор } 100 \text{ эВ}$)
2	6356.56	$4^2F_{5/2}^0 - 6^2G_{7/2}$	8.9	0.056
	6361.80	$4^2F_{7/2}^0 - 6^2G_{9/2}$	9.6	0.076
3	5267.96	$4^2F_{5/2}^0 - 7^2G_{7/2}$	6.8	0.012
	5271.57	$4^2F_{7/2}^0 - 7^2G_{9/2}$		

В табл. 1 и 2 приведены длины волн исследованных линий. В четвертом столбце этих таблиц указано, во сколько раз увеличилось эффективное сечение возбуждения линий при увеличении давления от минимального до 14 мтор для энергии электронов 100 эВ. Как видно из таблиц, для большинства линий характерен рост сечений возбуждения с давлением. Так, для линий $\lambda = 5339/5380 \text{ Å}$ ($4^2F_{5/2, 7/2}^0$) в указанном диапазоне давлений сечения возрастают в 7.0 раз.

Внутри серий атомарных линий можно проследить уменьшение этой зависимости при увеличении главного квантового числа. Так, сечения линий, соответствующих переходам с уровней 7^1S_0 и 8^1S_0 , увеличиваются

соответственно в 2.0 и 1.4 раза, а для уровня 9^1S_0 сечение постоянно. Аналогичная зависимость наблюдается и для уровней серии n^1D_2 и n^3S_1 .

Для ионных линий с верхними бейтлеровскими уровнями $5s' 2D_{3/2, 5/2}$, $5p^1 4F_{7/2, 5/2}$ во всем исследованном диапазоне давлений эффективные сечения возбуждения остаются постоянными.

В пятом столбце табл. 1 и 2 приведены полученные нами значения абсолютных эффективных сечений возбуждения линий для энергии электронов 100 эВ. Для расчета величины эффективных сечений использованы

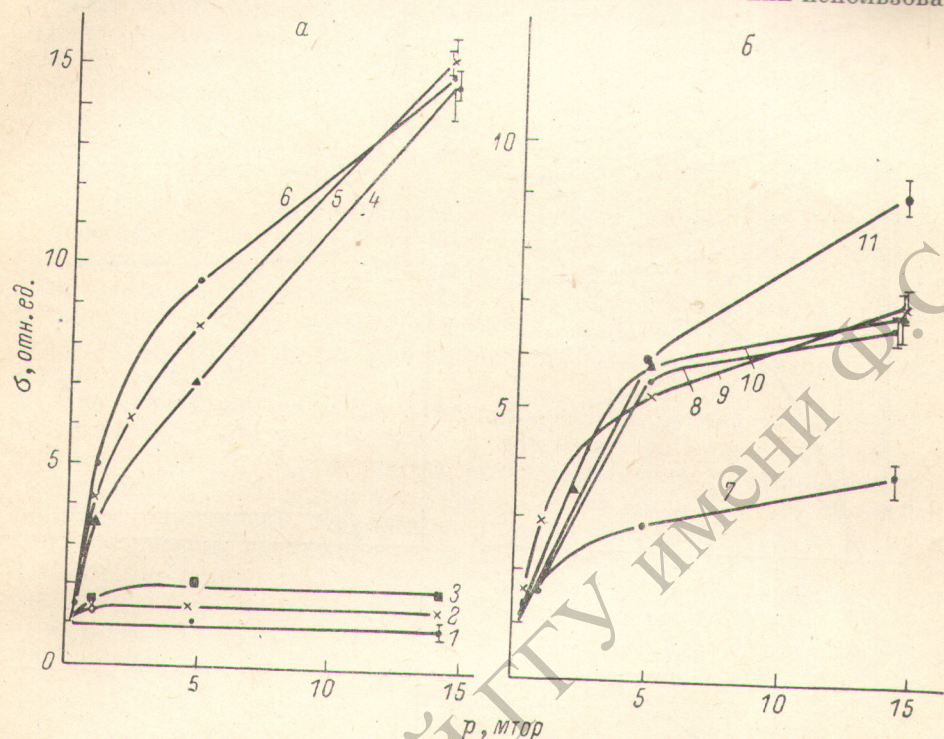


Рис. 1. Зависимость кажущегося эффективного сечения возбуждения уровней атома (а) и иона (б) кадмия от давления при энергии возбуждающих электронов 100 эВ.

1 — $\lambda = 3982 \text{ \AA}$ (9^1S_0), 2 — $4306 \text{ \AA}$ (8^1S_0), 3 — $5156 \text{ \AA}$ (7^1S_0), 4 — $3466/66 \text{ \AA}$ ($5^3D_{1,2}$), 5 — $3610/13/14 \text{ \AA}$ ($5^3D_{1,2,3}$), 6 — $4678/4800/5086 \text{ \AA}$ (6^3S_1), 7 — $6466 \text{ \AA}$ ($6^3D_{3/2}$), 8 — $5268/72 \text{ \AA}$ ($7^2G_{7/2, 9/2}$), 9 — $4030 \text{ \AA}$ ($7^2D_{3/2}$), 10 — $5339/80 \text{ \AA}$ ($4^2F_{5/2, 7/2}$), 11 — $6357/62 \text{ \AA}$ ($6^2G_{7/2, 9/2}$).

наши относительные измерения яркости и значения эффективных сечений в максимуме функций возбуждения [7, 8].

На рис. 1 приведена зависимость кажущегося эффективного сечения возбуждения уровней атома и иона кадмия от давления при энергии электронов 100 эВ. При наличии измерений по нескольким линиям с одного уровня данные усредняли по всем этим линиям. Как видно из этого рисунка, сечения растут линейно для атомарных линий вплоть до давления 1.0 мторр, а для ионных линий D , F и G -серий до 1.0, 3.0 и 5.0 мторр соответственно. Затем рост сечений замедляется. Сечения возбуждения одиночных атомарных линий во всем диапазоне давлений растут значительно медленнее, чем сечения триплетных и ионных линий (рис. 1 и табл. 1, 2).

На рис. 2 представлены функции возбуждения всех исследованных линий. В работе [7] промерены функции возбуждения всех атомарных линий от порога возбуждения до 15 эВ, нами проведены измерения на атомарных и ионных линиях до энергии возбуждающих электронов 150 эВ.

На рис. 2, а собраны функции возбуждения линий, сечения возбуждения которых с давлением не изменяются (кривые 1, 2) или изменяются незначительно (кривые 3—9).

Рис. 2, б, в, г, д иллюстрирует изменение формы функций возбуждения от давления. Здесь представлена зависимость кажущегося сечения воз-

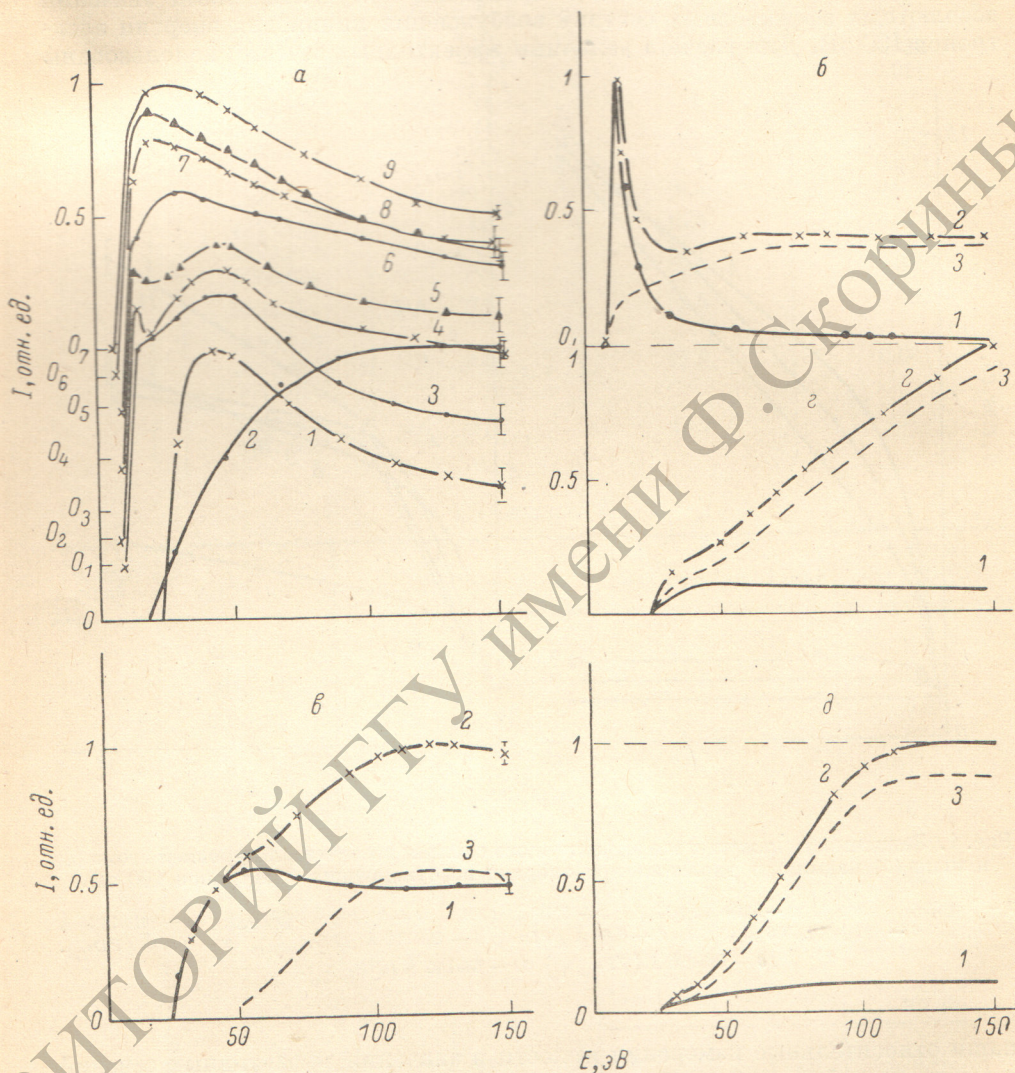


Рис. 2. Функции возбуждения линий.

а: 1 — $\lambda = 4883 \text{ \AA} / 5027 \text{ \AA}$ ($5p^4F_{5/2}^0, \gamma_{1/2}$), 2 — $4417/3251/3537 \text{ \AA}$ ($5s^2D_{3/2}, \gamma_{1/2}$), 3 — $3982 \text{ \AA}$ (9^1S_0), 4 — $4306 \text{ \AA}$ (8^1S_0), 5 — $5156 \text{ \AA}$ (7^1S_0), 6 — $6778 \text{ \AA}$ (8^1P_1), 7 — $3905 \text{ \AA}$ (8^1D_2), 8 — $4662 \text{ \AA}$ (6^1D_2), 9 — $6438 \text{ \AA}$ (5^1D_2); б: $\lambda = 5086 \text{ \AA}$ (6^3S_1), 1 — $p = 0.1$ мтор, 2 — $p = 9.0$ мтор, 3 — добавочный процесс; в: $\lambda = 6466 \text{ \AA}$ ($6^2D_{3/2}$), 1 — $p = 0.94$ мтор, 2 — $p = 9.0$ мтор, 3 — добавочный процесс; г: $\lambda = 5339 \text{ \AA}$ ($4^2F_{5/2}^0$), 1 — $p = 0.1$ мтор, 2 — $p = 9.0$ мтор, 3 — добавочный процесс; д: $\lambda = 6357/62 \text{ \AA}$ ($6^2G_{7/2}, \gamma_{1/2}$), 1 — $p = 0.33$ мтор, 2 — $p = 9.0$ мтор, 3 — добавочный процесс.

буждения линий от энергии электронов для двух давлений (значения давлений указаны в подписи к рис. 2). Рис. 2, б относится к линии $5086 \text{ \AA}$ (6^3S_1). Для других исследованных триплетных линий кривые аналогичны, поэтому они не приводятся.

Рис. 2, в, г, д относится к ионным линиям соответственно D, F и G-серий. Штриховая кривая представляет собой разность ординат кривых, полученных при разных давлениях, т. е. зависимость величины дополнительного заселения уровней от энергии возбуждающих электронов.

Из этого рисунка видно, что вклад дополнительного заселения возрастает при увеличении энергии электронов на линии $5339 \text{ \AA}$ ($4^2F_{7/2}$), достигает насыщения при энергии 60 и 120 эВ на линиях $4678/4800/5086 \text{ \AA}$ (6^3S_1) и $6357/62 \text{ \AA}$ ($6^2G_{7/2, 9/2}$) соответственно и имеет максимум при энергии 120 эВ на линии $6466 \text{ \AA}$ ($5^2D_{3/2}$).

Была исследована зависимость выхода яркости спектральных линий от тока в пучке от 25 до 200 мкА при давлениях от 0.1 до 9.0 мтор и от 10 до 75 мкА при давлении 14 мтор. Во всем диапазоне токов и давлений яркость линий линейно возрастала с увеличением тока. Таким образом, можно сделать вывод, что зависимость эффективного сечения возбуждения от давления обусловлена процессом, линейно зависящим от тока в пучке и нелинейно зависящим от давления паров кадмия. Эффективность этого процесса увеличивается с увеличением энергии электронов (для ионных и триплетных атомарных линий) и мала для линий серий n^1S_0 и n^1D_2 .

Наблюдаемое дополнительное заселение уровней нельзя объяснить процессами передачи энергии возбуждения между близко расположенными уровнями за счет ударов 2-го рода. Это следует из того, что функции возбуждения спектральных линий различных серий, изученные нами в настоящей работе, а также взятые из работы [8], имеют иную форму, чем зависимость процесса дополнительного заселения от энергии возбуждающих электронов.

Процесс дополнительного заселения, определяющий зависимость эффективных сечений возбуждения от давления, не может быть объяснен также и с помощью ступенчатого возбуждения или рекомбинационными процессами, так как в этих случаях должна была бы наблюдаться нелинейная зависимость яркости спектральных линий от тока в пучке.

Не исключена возможность дополнительного заселения уровней в результате диссоциации возбужденных молекулярных образований, однако этот вопрос требует дополнительного исследования.

Авторы благодарят Н. П. Пенкина за интерес к работе и обсуждение результатов.

Литература

- [1] И. П. Богданова, В. Д. Марусин. Опт. и спектр., 28, 645, 1970.
- [2] И. П. Богданова, В. Д. Марусин. Опт. и спектр., 42, 995, 1977.
- [3] И. П. Богданова, В. Д. Марусин, В. Е. Яхонтова. Опт. и спектр., 44, 638, 1977.
- [4] И. П. Богданова, И. И. Гейци. Изв. АН СССР, сер. физ., 27, 1056, 1963.
- [5] А. Н. Несмеянов. Давление паров химических элементов. Изд. АН СССР, М., 1961.
- [6] И. П. Богданова, В. Д. Марусин. Опт. и спектр., 20, 209, 1966.
- [7] В. В. Совтер, И. П. Запесочный, О. Б. Шпеник. Опт. и спектр., 36, 826, 1974.
- [8] С. П. Варшавский, А. А. Митюрева, Н. П. Пенкин. Опт. и спектр., 29, 637, 1970.

Поступило в Редакцию 23 марта 1978 г.