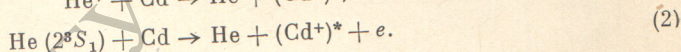
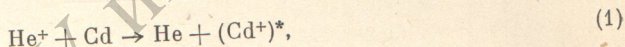


# ПЕННИНГОВСКАЯ ИОНИЗАЦИЯ И НЕРЕЗОНАНСНАЯ ПЕРЕЗАРЯДКА В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ РАЗРЯДА В СМЕСИ He—Cd

В. А. Картазаев и Ю. А. Толмачев

Исследовано послесвечение маломощного импульсного разряда в смеси гелий—кадмий. Показано, что в заселении ряда уровней иона кадмия большую роль играют столкновения метастабильных атомов гелия и кадмия. Измерены сечения этого процесса. Измерены также полные и парциальные сечения перезарядки He<sup>+</sup>—Cd и пеннинговской ионизации He (2<sup>3</sup>S<sub>1</sub>)—Cd.

Процессы нерезонансной перезарядки He<sup>+</sup>—Cd и пеннинговской ионизации He (2<sup>3</sup>S<sub>1</sub>)—Cd явились в последние годы предметом детального исследования в связи с их ролью в работе He—Cd<sup>+</sup>-лазера. Селективное заселение ряда уровней Cd<sup>+</sup> осуществляется в результате реакций



Полученные значения сечений реакции перезарядки (1) лежат в пределах  $(0.03-3.7) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2 [1-3]$ , а реакции пеннинговской ионизации (2) —  $(2.9-4) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2 [1, 4]$ . Анализ проведенных экспериментов показывает, что наиболее вероятной причиной такого большого расхождения являются ошибки определения концентрации нормальных атомов кадмия. Во всех случаях предполагалось, что давление паров кадмия равно давлению насыщенных паров над поверхностью металлического кадмия, помещенного в специальный отросток или отростки, соединенные с активной разрядной трубкой. Вместе с тем при прохождении электрического тока через газ возможно значительное изменение концентрации паров металла вследствие электрофореза как продольного, так и поперечного. Учесть подобные эффекты можно только при независимом контроле за концентрацией нормальных атомов оптическими методами. Целью настоящей работы явилось уточнение величин эффективных сечений процессов (1) и (2).

Экспериментальная установка, используемая нами, была описана ранее [5]. Разрядная трубка имела диаметр 20 мм, длину исследуемой части 210 мм. Давление гелия  $P_{\text{He}}=5$  тор,  $P_{\text{Cd}}=10^{-4}$  тор. Сила тока в импульсе  $i < 100$  мА, длительность импульса возбуждения 10—100 мкс. Концентрация нормальных атомов кадмия измерялась по поглощению на линии  $\lambda=326.1$  нм методом зеркала за трубкой [6]. При измерениях учитывалась СТС линии  $\lambda=326.1$  нм [7]. Эксперимент проводился в условиях, когда оптическая толщина столба паров кадмия не превышала 2, поэтому учет СТС  $\lambda=326.1$  нм производился путем введения эффективной температуры контура. Ошибка такого способа описания, согласно оценкам, не превышает 20—30%.

Как показано в работах [1, 3, 8], в результате реакции (1) непосредственно заселяются состояния 9s, 8d, 6f и 6g иона кадмия. Каскадные пе-



переходы с этих уровней обуславливают наличие медленных компонент распада всех расположенных ниже состояний  $\text{Cd}^+$ . Пеннинговская ионизация (2) приводит к возбуждению двух бойтлеровских уровней  $4d^9 5s^2 {}^2D_{3/2, 5/2}$ . В распаде заселенности этих состояний нами также обнаружены компоненты, соответствующие каскадным переходам с уровней, возбуждаемых при перезарядке. Кроме того, в раннем послесвечении на линиях с бойтлеровских уровней наблюдается резкий спад яркости, который свидетельствует о большой роли электронного возбуждения во время импульса.

На рис. 1 показана зависимость заселенности различных состояний от времени в послесвечении. Как видно из рис. 1, спад концентрации мета-

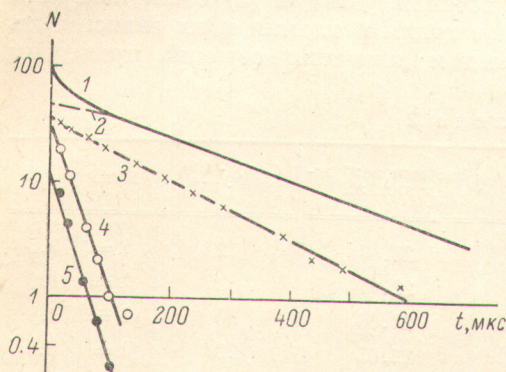


Рис. 1. Изменение заселенности состояний в послесвечении разряда в смеси He—Cd при  $P_{\text{He}} = 5$  тор,  $P_{\text{Cd}} = 10^{-4}$  тор,  $i = 60$  мА,  $\tau_{\text{вмг}} = 30$  мкс.

1—7s, 7p, 6d, 6p, 5f, 4f (пр. ед.); 2—8d, 9s, 6g, 6f (пр. ед.); 3—He ( $2^3S_1$ ),  $N \times 0.5 \cdot 10^{-10}$ ,  $\text{см}^{-3}$ ; 4—Cd ( $5^3P_2$ ),  $N \times 0.5 \cdot 10^{-9}$ ,  $\text{см}^{-3}$ ; 5—разность кривых 1 и 2, точки — произведение концентрации He ( $2^3S_1$ ) и Cd ( $5^3P_2$ ).

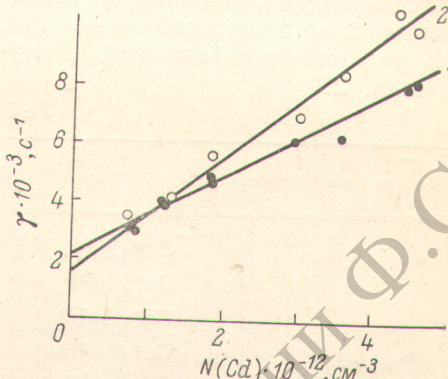


Рис. 2. Зависимость вероятности разрушения ионов  $\text{He}^+$  (1) и метастабильных атомов He ( $2^3S_1$ ) (2) от концентрации  $N(\text{Cd})$ .

стабильных атомов He ( $2^3S_1$ ) и заселенности уровней  $\text{Cd}^+$  в позднем послесвечении ( $t > 100$  мкс) происходит по экспоненциальному закону  $J = J(0) \exp(-\gamma_{\text{эфф}} \cdot t)$ . Зависимость постоянной распада заселенности  $\gamma_{\text{эфф}}$  от концентрации атомов кадмия представлена на рис. 2. Этот график показывает, что  $\gamma_{\text{эфф}} = \gamma_0 + N(\text{Cd}) \langle \sigma_2 v \rangle$ , где  $\gamma_0$  — суммарная вероятность тушения метастабильных атомов или ионов гелия в чистом газе,  $N(\text{Cd})$  — концентрация нормальных атомов кадмия и  $\sigma_2$  — суммарное сечение перезарядки или пеннинговской ионизации. Получены следующие константы скоростей реакций:  $\langle \sigma_1^1 v \rangle = (12 \pm 1) \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\langle \sigma_2^2 v \rangle = (20 \pm 2) \times 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , что соответствует сечениям  $\sigma_1^1 = 7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_2^2 = 12 \times 10^{-15} \text{ см}^2$ .

Таблица 1

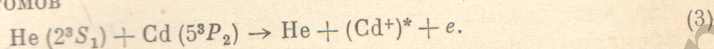
	$g_i/g_k$	$\sigma_i/\sigma_k$				$\sigma_i/\sigma_k$	
		наши данные	[*]			наши данные	[*]
${}^2D_{3/2}/{}^2D_{5/2}$	1.5	$1.40 \pm 0.15$	1.67	$9s/8d$		$1.60 \pm 0.15$	1.6
${}^2F_{7/2}/{}^2F_{5/2}$	1.33	$1.46 \pm 0.10$	1.28	$6f/8d$		$1.7 \pm 0.2$	1.6
${}^2G_{9/2}/{}^2G_{7/2}$	1.25	$1.3 \pm 0.1$	1.4	$6g/8d$		$1.0 \pm 0.12$	1.5
				$9p/8d$		$< 0.5$	1.5

Измерения абсолютных яркостей линий позволили найти отношения парциальных сечений перезарядки для различных компонент тонкой структуры уровней иона кадмия (табл. 1). Полученные значения в пределах ошибки эксперимента совпадают с отношением статистических ве-



сов соответствующих уровней. Поскольку измерения проводились при относительно больших давлениях гелия, наблюдаемая связь может быть обусловлена не только пропорциональностью величины сечения статистическому весу уровня [8], но и существованием процессов перемешивания заселенности при столкновениях с нормальными атомами или электронами.

Аналогично смеси He—Hg и He—Zn [5, 9] наряду с процессами (1) и (2) в заселении ряда уровней иона кадмия проявляются столкновения метастабильных атомов



Для определения эффективных сечений реакций (3) были измерены концентрации метастабильных атомов гелия и кадмия и их зависимость от условий эксперимента. Полученные значения сечений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Реакция возбуждения	Уровень	Энергия возбуждения, эВ	$\langle \sigma v \rangle \cdot 10^{11}$ $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	Примечание
$\text{He}(2^3S_1) + \text{Cd}(5^3P_2)$	$\text{Cd}^+(5f^2F_{7/2})$	23.67	2	$\lambda = 349.5$
	$\text{Cd}^+(7p^2P_{3/2})$	22.94	2	$\lambda = 339.0$
	$\text{Cd}^+(6d^2D_{5/2})$	22.66	30	$\lambda = 672.6$
	$\text{Cd}^+(6d^2D_{3/2})$	22.65	20	$\lambda = 646.5$
	$\text{Cd}^+(4f^2F_{7/2})$	22.43	50	$\lambda = 537.8$
	$\text{Cd}^+(4f^2F_{5/2})$	22.43	40	$\lambda = 533.7$
	$\text{Cd}^+(7s^2S_{1/2})$	22.29	2	$\lambda = 794.3$
	$\text{Cd}^+(6p^2P_{3/2})$	20.81	50	$\lambda = 806.6$
$\text{He}(2^3S_1) + \text{Cd}$	$\text{Cd}^+(4d^95s^2^2D_{5/2})$	17.57	30	Уровень
	$\text{Cd}^+(4d^95s^2^2D_{3/2})$	18.27	20	Уровень

Примечание. Приведенные величины констант соответствуют температуре  $T = 500$  К. Точность измерений определяется систематическими ошибками измерения абсолютных яркостей линий и оценивается коэффициентом 1.5.

### Литература

- [1] G. J. Collins. J. Appl. Phys., 44, 4633, 1973.
- [2] В. С. Алейников, В. В. Ушаков. Опт. и спектр., 33, 214, 1972.
- [3] В. Ф. Елаев, О. П. Семенова. Изв. вузов, физика, № 1, 19, 1975.
- [4] L. A. Riseberg, L. D. Scheerer. Phys. Rev., A, 8, 1962, 1973.
- [5] В. А. Картазаев, Ю. А. Пиотровский, Ю. А. Толмачёв. Опт. и спектр., 43, 196, 1977.
- [6] С. Э. Фриш. В сб.: Спектроскопия газоразрядной плазмы. «Наука», Л., 1970.
- [7] F. M. Kelly, E. Tomchuk. Proc. Phys. Soc., 74, 689, 1959.
- [8] A. R. Turner-Smith, J. M. Green, C. E. Webb. J. Phys. B, 6, 114, 1973.
- [9] В. А. Картазаев, Ю. А. Толмачёв, Ю. А. Пиотровский. В сб.: Прикладная спектроскопия. Изд. АН СССР, М., 96, 1977.

Поступило в Редакцию 24 января 1978 г.