

УДК 539.184

## ВОЗБУЖДЕНИЕ АТОМОВ КАДМИЯ МЕДЛЕННЫМИ ИОНАМИ Cd<sup>+</sup>

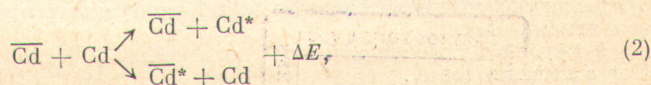
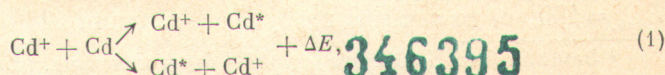
А. Н. Завилопуло, О. Б. Шпенник и И. П. Запесочный

Приводятся впервые полученные результаты по возбуждению резонансных и других наиболее интенсивных спектральных линий атомов кадмия, возникающих при столкновении атомов Cd с ионами Cd<sup>+</sup> в интервале энергий от порога до 1000 эв. Обнаружена структура на функциях возбуждения большинства измеренных линий. Для линий одной серии с ростом главного квантового числа темп нарастания кривой в припороговой области энергий значительно увеличивается и усиливается осциллирующий характер функций возбуждения.

Изучение элементарных процессов при столкновениях атомов с медленными ионами представляет интерес как с точки зрения теории атомных столкновений, так и для решения ряда практических задач. Эти процессы имеют место во многих атмосферных и астрофизических явлениях, в различных типах низкотемпературной плазмы и могут использоваться для создания инверсной заселенности уровней в лазерах. Однако экспериментальных работ по определению эффективных сечений возбуждения при медленных ионно-атомных столкновениях сравнительно мало. К настоящему времени проведены детальные исследования прямого возбуждения атомов инертных газов ионами He<sup>+</sup> и Ar<sup>+</sup> [1-3] и ионами щелочных металлов [4, 5], возбуждения ионов щелочных металлов при их взаимодействии с атомами инертных газов [6, 7] и возбуждения атомов цинка в процессе перезарядки ионов Zn<sup>+</sup> на атомах цинка, кадмия и натрия [8].

В данной работе изучены функции возбуждения некоторых спектральных линий атомов кадмия в энергетическом интервале налетающих ионов Cd<sup>+</sup> от порога до 1000 эв. Эксперименты проводились на установке, подробно описанной нами в [9]. Ее основными узлами являются: источник ионов, ионно-оптическая система, паронаполненная ячейка (камера столкновения), спектральный прибор (ЗМР-3 или ИСП-51) и блок регистрации оптического излучения (ФЭУ в сочетании с усилителем У1-2). В наших опытах использовался ионный источник с электронной бомбардировкой, причем энергия ионизирующих электронов выбиралась ниже порога возбуждения резонансного уровня иона кадмия [10]. Энергия ионного пучка в камере столкновений определялась по сдвигу вольтамперной характеристики ионного тока на коллектор. Функции возбуждения получены путем усреднения многих кривых (10-20), измеренных при токе ионного пучка 0.2-1.5 мкА и различных давлениях паров кадмия в камере столкновений.

Атомы кадмия при прохождении ионов через камеру столкновений могут возбуждаться по следующим каналам:



где  $\bar{C}d$  означает быстрые нейтральные атомы кадмия, образующиеся в камере столкновений в процессе симметричной резонансной перезарядки ионов  $Cd^+$  на атомах кадмия. Дефекты энергии  $\Delta E$  реакций (1) и (2) равны. Для выяснения роли каждого из этих процессов, приводящих к возбуждению исследуемой линии, изучались зависимости интенсивностей спектральных линий и изменение ионного тока на приемник в широком диапазоне давлений ( $5 \cdot 10^{-4}$ — $8 \cdot 10^{-2}$  тор). Оказалось, что в интервале давлений ( $5 \cdot 10^{-4}$  до  $1.5 \cdot 10^{-3}$  тор) соблюдается линейная зависимость интенсивности линий от давления, а при  $p=1.5 \cdot 10^{-3}$  тор наблюдается излом, после которого эта зависимость становится более сильной. Отклонение от линейности можно объяснить значительным усилением роли второго процесса (реакция 2), приводящего к возбуждению атомов.

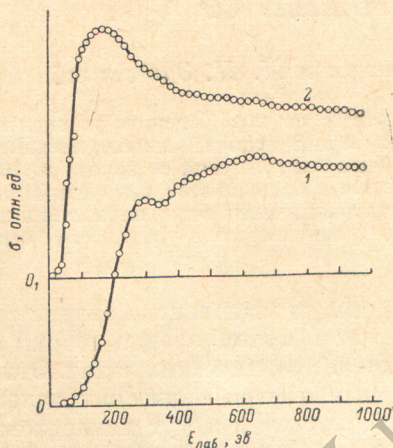


Рис. 1. Функции возбуждения резонансных линий кадмия.

1 —  $\lambda=2288 \text{ \AA}$  ( $5^1S_0-5^1P_1$ ), 2 —  $\lambda=3261 \text{ \AA}$  ( $5^1S_0-5^3P_1$ ).

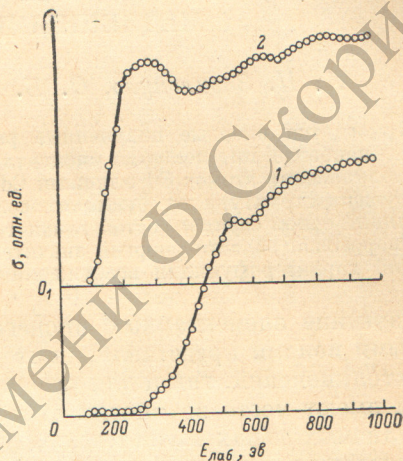


Рис. 2. Функции возбуждения линий атома и иона кадмия.

1 —  $\lambda=4416 \text{ \AA}$  ( $5^3P_{3/2}-5^3D_{5/2}$ ), 2 —  $\lambda=6438 \text{ \AA}$  ( $5^1P_1-5^1D_2$ ).

В подтверждение вышесказанного нами были поставлены специальные эксперименты с двумя ячейками. Первая ячейка служила камерой перезарядки, а вторая — камерой столкновений. Давление паров кадмия в камере перезарядки было выбрано таким, что перезарядка составляла ~50% ионов. В опытах сначала измерялись интенсивности спектральных линий при прохождении камеры столкновений смешанных пучков ионов и нейтральных атомов, затем — только нейтральных атомов. Оказалось, что возбуждение линий  $Cd$  нейтральными атомами имеет место и его эффективность примерно в два раза выше, чем ионами.

Остановимся более подробно на результатах наших измерений, приведенных на рис. 1—4. Характерным для большинства кривых является то, что темп нарастания функций возбуждения в припороговой области очень мал и только с  $E_{\text{лаб}} \approx 100$  эв он резко увеличивается, а для линии иона кадмия  $4416 \text{ \AA}$  излом появляется при  $E_{\text{лаб}} \approx 300$  эв. Более того, излучение линий экспериментально наблюдается при энергиях ионов, превосходящих порог реакций в несколько раз.<sup>2</sup> Как и в случае электронного возбуждения, имеется различие в поведении интеркомбинационной  $\lambda=3261 \text{ \AA}$  резонансных линий (рис. 1). Если на функции возбуждения линии  $3261 \text{ \AA}$  обнаружен один максимум при  $E_{\text{лаб}}=180$  эв, то сечение возбуждения линии  $2288 \text{ \AA}$  нарастает более мед-

<sup>1</sup> Заметим, что Де Хиром и др. [11] было показано, что эффективное сечение возбуждения спектральной линии  $Ne$   $5882 \text{ \AA}$  нейтральными атомами  $Ne$  намного больше, чем ионами  $Ne^+$ .

<sup>2</sup> Подобная картина наблюдалась в работе [12] для случая столкновения ионов  $Ne^+$  с атомами гелия.

ленно у порога с небольшим максимумом при  $E_{\text{лаб.}} = 300$  эв и вторым более широким при 600 эв. Функция возбуждения одиночной линии  $6438 \text{ \AA}$  (рис. 2) в общих чертах напоминает функцию возбуждения резонансной  $\lambda = 2288 \text{ \AA}$  с той особенностью, что скорость возрастания этой кривой выше у порога и лучше выявлен первый максимум при  $E_{\text{лаб.}} = 290$  эв.

Измеренные нами функции возбуждения линий, исходящих с  $6^3S_1$ ,  $7^3S_1$ - и  $8^3S_1$ -уровней, а также с  $5^3D_j$ - и  $6^3D_j$ -уровней, позволили проследить пороговую зависимость сечений возбуждения линий одной серии с ростом главного квантового числа  $n$  исходного уровня. Приведенные на рис. 3 и 4 кривые свидетельствуют о том, что с ростом  $n$  наклон функций возбуждения в припороговой области энергий увеличивается как

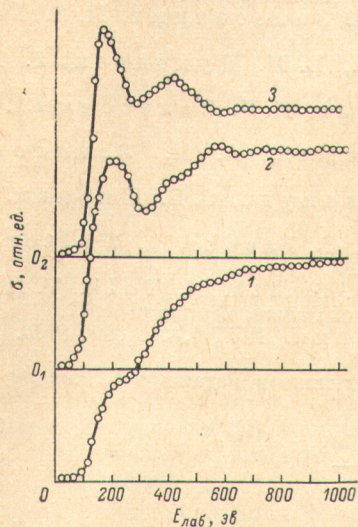


Рис. 3. Функции возбуждения линий кадмия с уровнями  $^3S_1$ .  
1 —  $\lambda = 4800 \text{ \AA}$  ( $5^3P_1 - 6^3S_1$ ), 2 —  $\lambda = 3133 \text{ \AA}$  ( $5^3P_1 - 7^3S_1$ ), 3 —  $\lambda = 2868 \text{ \AA}$  ( $5^3P_2 - 8^3S_1$ ).

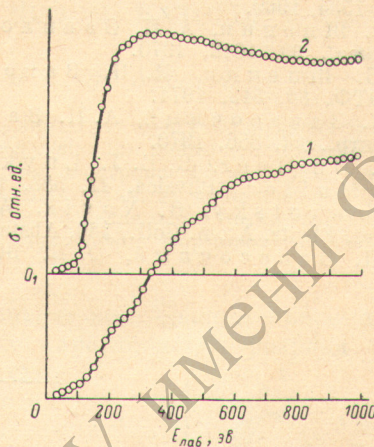


Рис. 4. Функции возбуждения спектральных линий кадмия с уровнями  $^3D_j$ .  
1 —  $\lambda = 3611/13/14 \text{ \AA}$  ( $5^3P_j - 5^3D_j$ ), 2 —  $\lambda = 2981/82 \text{ \AA}$  ( $5^3P_j - 6^3D_j$ ).

для линий с уровнями  $^3S_1$ , так и с  $^3D_j$ . Кроме того, энергетическая зависимость сечений возбуждения линий с уровнями  $^3S_1$  более сложная, чем с уровнями  $^3D_j$ .

Другим важным результатом наших исследований является тот факт, что для линий одной серии по мере роста главного квантового числа энергетическая зависимость сечений возбуждения спектральных линий значительно усложняется. Так, функция возбуждения линии  $4800 \text{ \AA}$  плавно растет с небольшими уступами в области 220 и 750 эв (рис. 3), в то время как на функции возбуждения линии  $3133 \text{ \AA}$  обнаружен четкий максимум при  $E_{\text{лаб.}} = 200$  эв и второй максимум — при  $E_{\text{лаб.}} = 550$  эв, а функция возбуждения линии  $2868 \text{ \AA}$  уже имеет два хорошо разделенных максимума при 170 и 400 эв. Как видно из рис. 4, скорость нарастания кривых возбуждения увеличивается и для линий, исходящих с  $^3D_j$ -уровней (линии  $2981$  и  $3610 \text{ \AA}$ ), правда здесь не обнаружены хорошо разделенные вторичные максимумы в исследованной области энергий.

Следует отметить, что в отличие от ранее изученного нами процесса  $Zn^+ + Cd$  [9], где наблюдалась периодичность появления максимумов тонкой структуры (максимумы расположены при таких скоростях ионов, которые кратны скорости, соответствующей положению первого максимума), в данном случае ( $Cd^+ + Cd$ ) такая периодичность пока не обнаружена.

В заключение отметим, что изменение вида кривой возбуждения с увеличением главного квантового числа наблюдалось и при возбуждении

атомов электронным ударом [13], а также в процессе взаимодействия ионов  $Zn^+$  с атомами  $Cd$  и при возбуждении атомов  $He$  ионами  $He^+$  [1].

Авторы выражают благодарность И. Ф. Кирлику за помощь при измерениях.

#### Литература

- [1] N. Tolk, C. W. White. VI Int. Conf. Phys. Electr. Atom. Coll., 309. Abstracts of Papers, Cambridge, Massachusetts, 1969.
- [2] P. I. Maevisar-Whelan, W. L. Borst. Phys. Rev., 41, 314, 1970.
- [3] P. O. Haugsjaa, R. C. Amme, N. G. Utterback. Phys. Rev. Letters, 22, 322, 1969.
- [4] С. В. Бобашев. Письма в ЖЭТФ, 11, 389, 1970.
- [5] С. В. Бобашев, В. А. Крицкий. Письма в ЖЭТФ, 12, 280, 1970.
- [6] С. С. Поп, И. Ю. Кривский, И. П. Запесочный, М. В. Баженская. ЖЭТФ, 58, 810, 1970.
- [7] В. Б. Матвеев, С. В. Бобашев, В. М. Дукельский. ЖЭТФ, 57, 1534, 1969.
- [8] О. Б. Шпеник, А. Н. Завилопуло, И. П. Запесочный. Опт. и спектр., 29, 1018, 1970.
- [9] О. Б. Шпеник, И. П. Запесочный, А. Н. Завилопуло. ЖЭТФ, 60, 513, 1971.
- [10] И. П. Запесочный, А. Н. Завилопуло, О. Б. Шпеник. Опт. и спектр., 28, 856, 1970.
- [11] F. I. De Heer, B. E. J. Luyken, D. Jaacks, L. Wolterbeek, A. Muller. Physica, 41, 588, 1969.
- [12] S. Dworetzky, R. Novik, W. W. Smith, N. Tolk. V. Int. Conf. Phys. Electr. Atom. Coll., 280, Abstracts of Papers, Leningrad, 1967.
- [13] И. П. Запесочный, О. Б. Шпеник. ЖЭТФ, 50, 890, 1966.

Поступило в Редакцию 12 января 1971 г.