

03;07;11;12

## Кинетика люминесценции при распылении металлического кадмия импульсным пучком быстрых электронов в среде гелия

© А.И. Миськевич, Лю Тао

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)  
115409 Москва, Россия  
e-mail: miskev@mail.ru

(Поступило в Редакцию 7 апреля 2009 г.)

Приводятся результаты экспериментального изучения кинетики люминесценции, возникающей при бомбардировке в среде гелия фольги из металлического кадмия импульсным пучком быстрых электронов с энергией 150 keV и длительностью 3 ns. Облучение фольги производилось при значениях давления газа от 76 до 2280 Torr. При температуре фольги  $T = 249^\circ\text{C}$  измерено время высвечивания бейтлеровских уровней иона Cd II в зависимости от давления буферного газа и определена константа столкновительного тушения  $5s^2\ ^2D_{5/2}$  уровня Cd II атомами He, равная  $k \approx 3 \cdot 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$ . Проведено сравнение экспериментальных данных с расчетами, выполненными для парогазовой смеси, с целью определения доли возбужденных ионов Cd II в состоянии  $5s^2\ ^2D_{5/2}$ , образующихся непосредственно за счет распыления металлического кадмия электронами высокой энергии и компонентами гелиевой плазмы. Для давления буферного газа гелия  $P \leq 2.5 \text{ atm}$  и температуры кадмиевой мишени  $T = 240^\circ\text{C}$  это значение оказалось равным  $\alpha = 0.28 + 0.23P$  (где  $P$  — давление гелия в atm).

### Введение

При бомбардировке поверхности твердого тела заряженными частицами происходит распыление материала мишени, сопровождающееся ионной и световой эмиссией [1,2]. При облучении мишени альфа-частицами, продуктами  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  ядерной реакции или осколками деления урана распыление вещества мишени может происходить при высоких значениях давления буферного газа. Интенсивность возникающего светового излучения зависит от температуры мишени и увеличивается многократно при подогреве ее до температуры  $T = 0.5 - 0.7T_{\text{fus}}$ , где  $T_{\text{fus}}$  — температура плавления материала мишени [3,4].

Спектральный состав световой эмиссии при распылении металлов высокоэнергетичными частицами отличается при одинаковых условиях возбуждения от спектров люминесценции аналогичных парогазовых смесей, приготавливаемых за счет термического испарения. Например, при бомбардировке металлической пленки Cd или Zn продуктами ядерных реакций  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  в температурном диапазоне  $170 - 240^\circ\text{C}$  наблюдаются anomalно высокое заселение бейтлеровских уровней ионов Cd II или Zn II и отсутствие многих атомарных и ионных линий, обычно присутствующих в спектрах парогазовых смесей высокого давления [3–5]. Это указывает на существование особого механизма (или даже нескольких механизмов) заселения уровней при распылении металлов высокоэнергетичными частицами. Применительно к лазерам с ядерной накачкой использование распылительного механизма заселения уровней позволяет значительно понизить рабочую температуру активного элемента и, вероятно, позволит использовать

металлический уран и другие труднолетучие металлы в качестве лазерно-активного вещества [6,7].

С целью изучения действующих механизмов заселения уровней при распылении металлической мишени были проведены измерения спектрально-временных характеристик люминесценции на длине волны 442 и 325 nm (переход  $5s^2\ ^2D_{5/2}, 5s^2\ ^2D_{3/2} - 5p\ ^2P_{3/2,1/2}$  Cd II), возникающий при бомбардировке металлического кадмия импульсным электронным пучком с энергией 150 keV и длительностью 3 ns. Измерения проводились при температуре мишени  $240^\circ\text{C}$  и различных значениях давления буферного газа гелия — от 76 до 2280 Torr.

### 1. Методика измерений

Используется мишень из листового металлического кадмия толщиной 1 mm, которая подогревается электрическим нагревателем до температуры  $240^\circ\text{C}$ . При бомбардировке такой мишени электронами высокой энергии в среде гелия основными источниками светового излучения являются:

- 1) возбужденные атомы и ионы Cd II, испускаемые при поверхностной ионизации за счет взаимодействия металлического кадмия с ионами и метастабильными гелия,
- 2) продукты распыления металла электронным пучком,
- 3) возбужденные атомы и ионы Cd II, образовавшиеся вследствие плазмохимических реакций в паровой фазе в буферном газе.

Проведенные в настоящей работе исследования спектрального состава излучения показали, что основная часть световой энергии испускается на переходах  $5s^2\ ^2D_{5/2,3/2} - 5p\ ^2P_{3/2,1/2}$  иона Cd II.

Основные плазмохимические реакции и константы, используемые в расчетах характеристик объемной парогазовой смеси He–Cd, возбуждаемой пучком быстрых электронов с энергией 150 keV

№	Плазмохимическая реакция	Константа скорости
1	$\text{He}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{He}$ ,	$k_1 = 7.2 \cdot 10^{-30} \cdot T^{-0.75} \text{ cm}^6/\text{s}$
2	$\text{He}^*(2^1P) \rightarrow \text{He}^*(2^1S) + h\nu$	$A_2 = 0.0197 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$
3	$\text{He}^*(2^1P) + \text{He} \rightarrow \text{He}^*(2^1S) + \text{He}$	$k_3 = (2.4 - 2.9) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{s}$
4	$\text{He}^*(2^1S) + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_2^* + \text{He}$ ,	$k_4 = 3 \cdot 10^{-33} \exp(-780/T) \text{ cm}^6/\text{s}$
5	$\text{He}^*(2^1S) + e \rightarrow \text{He}^*(2^3S) + e + \Delta E$	$k_5 = 4.0 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$
6	$\text{He}^*(2^1S) + \text{Cd} \rightarrow (\text{Cd}^+)^* + \text{He} + e$	$k_6 = 5 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
6a	$\text{He}^*(2^1P) + \text{Cd} \rightarrow (\text{Cd}^+)^* + \text{He} + e$	$k_{6a} = 9.3 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
7	$\text{He}^+ + \text{Cd} \rightarrow (\text{Cd}^+)^* + \text{He}$	$k_7 = 5.5 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
8	$\text{He}_2^m + \text{Cd} 5s^2 2D_{5/2}(\text{Cd}^+)^* + 2\text{He} + e$	$k_8 = 4.9 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
9	$\text{He}_2^+ + \text{Cd} \rightarrow (\text{Cd}^+)^* + 2\text{He}$	$k_9 = 2.6 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$
10	$\text{Cd}^+ + \text{He} + \text{Cd} \rightarrow \text{Cd}_2^+ + \text{He}$	$k_{10} = 7.3 \cdot 10^{-15}/[\text{Cd}] \text{ cm}^6/\text{s}; (10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s})$
11	$\text{Cd}^+(5s^2 2D_{5/2}) \rightarrow \text{Cd}^+(5p^2 P_{3/2}) + 442 \text{ nm}$	$A_{11} = 1.4 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$

При столкновениях с атомами буферного газа гелия все возбужденные состояния Cd будут испытывать тушение. С учетом этого эффекта уравнение баланса для возбужденных ионов  $\text{Cd}^+(5s^2 2D_{5/2,3/2})$  в излучающем объеме можно записать следующим образом:

$$\frac{d[\text{Cd}^+(t)]}{dt} = F(t) - A[\text{Cd}^+(t)] - k[\text{Cd}^+(t)][\text{He}][\text{Cd}]. \quad (1)$$

Здесь  $[\text{Cd}^+(t)]$ ,  $[\text{Cd}]$  и  $[\text{He}]$  — концентрация  $5s^2 2D_{5/2,3/2}$  ионов Cd II, нейтральных атомов Cd и He;  $F(t)$  — скорость образования и поступления извне в излучающий объем ионов Cd II в состоянии  $5s^2 2D_{5/2,3/2}$ ;  $k$  — константа тушения уровней  $5s^2 2D_{5/2,3/2}$  Cd II;  $A$  — коэффициент Эйнштейна для  $5s^2 2D_{5/2,3/2}$  Cd II. Для уровня  $5s^2 2D_{5/2}$   $A = 1.4 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$  и  $A = 2.85 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$  — для  $5s^2 2D_{3/2}$  Cd II [8].

Механизм тушения  $5s^2 2D_{5/2,3/2}$  уровней иона Cd II связан с реакцией 10 (см. таблицу) образования молекулярного иона  $\text{Cd}_2^+$  при тройных столкновениях.

Функция накачки  $F(t)$  учитывает все три источника образования бейтлеровских ионов. Очевидно, что возникновение светового излучения при поверхностной ионизации ионами гелия (компонент 1) и распылении мишени быстрыми электронами (компонент 2) происходит за короткое время, практически совпадающее с длительностью электронного импульса накачки. Третий компонент светового излучения, связанный с объемным возбуждением парометаллической среды, образуется позднее в ходе плазмохимических реакций с участием атомов Cd и возбужденных состояний ( $\text{He}^+$ ,  $\text{He}^*$ ,  $\text{He}_2^+$ ,  $\text{He}_2^*$ ) буферного газа после окончания импульса накачки.

Наличие третьего компонента связано с тем, что при температуре мишени  $T \sim 0.5T_{\text{fus}}$  газовый излучающий объем содержит за счет термического испарения некоторое количество паров кадмия — около  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  при  $T = 240^\circ\text{C}$  [9]. Возбуждение такой парогазовой смеси He–Cd пучком быстрых электронов будет приводить к заселению бейтлеровских уровней иона кадмия за

счет реакций Пеннинга и перезарядки (см. таблицу), реакции 6–9. Константы скоростей взяты из работы [10].

При давлении He  $\sim 1 \text{ atm}$  и выше происходит эффективная конверсия возбужденных атомных состояний  $\text{He}^+$  и  $\text{He}^*$  в молекулярные  $\text{He}_2^+$  и  $\text{He}_2^*$ . Поэтому при высоких значениях давления буферного газа основной вклад в возбуждение бейтлеровских уровней в парогазовых смесях вносят реакции 8 и 9, в то время как при низких — наоборот, реакции 6 и 7 (см. таблицу).

Заселение  $5s^2 2D_{5/2,3/2}$  уровней Cd II в парогазовых смесях может происходить также за счет каскадных переходов с верхних возбужденных уровней, которые могут возбуждаться в реакциях 6–9 (см. таблицу), за счет прямого возбуждения паров кадмия электронами высокой энергии. Оценки, сделанные с использованием данных работы [11], по сечениям возбуждения атомов кадмия электронами для условий настоящего эксперимента показывают, что вклад прямого возбуждения уровней  $5s^2 2D_{5/2,3/2}$  Cd II быстрыми электронами невелик и его можно не учитывать из-за низкого парциального давления паров Cd в смеси He–Cd — около  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$  при давлении гелия  $\sim 760 \text{ Torr}$ , и вклад этого процесса может составлять не более 1%.

Реакции 6–9 (см. таблицу) имеют небольшую скорость по сравнению с параметрами импульса электронов накачки ( $T_P \sim 3 \text{ ns}$ ) — порядка  $10^6 \text{ s}^{-1}$ . Это позволяет разделить во времени вклад отдельных видов накачки — объемного возбуждения и распылительного источника, если известен вид функции  $F(t)$ .

Измеряемой в эксперименте величиной является  $I(t)$  — интенсивность линии с длиной волны 442 nm в момент времени  $t$ . Учитывая, что  $I(t) = A[\text{Cd}^+(t)]$ , из уравнения (1) находим вид функции накачки  $F(t)$ :

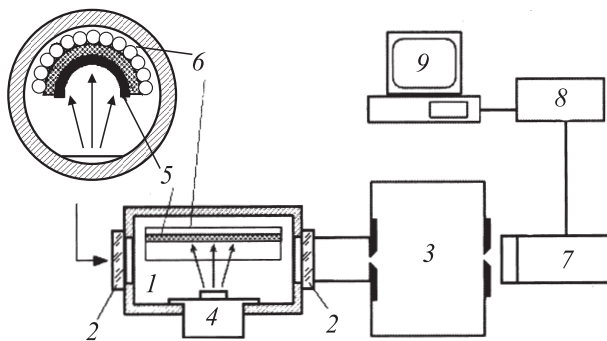
$$F(t) = \frac{1}{A} \frac{dI(t)}{dt} + I(t) + \frac{kI[\text{He}]}{A} [\text{Cd}]. \quad (2)$$

Таким образом, функция накачки  $F(t)$  может быть определена из измеренных временных осциллограмм с

помощью выражения (2). Для определения константы тушения  $k$  возбужденного уровня атомами гелия необходимо произвести измерения времени высвечивания бейтлеровских уровней Cd II при разных значениях давления буферного газа.

## 2. Экспериментальная установка

Блок-схема установки приведена на рис. 1. Цилиндрическая камера (1)  $\varnothing 80 \times 100$  mm с кварцевыми окнами (2) на торцах была установлена на входной щели монохроматора МДР-12 (3). На цилиндрической поверхности камеры имелся фланец, с помощью которого камера соединялась с малогабаритным ускорителем электронов „Арина“ (4). Внутри камеры напротив электронного пучка размещалась мишень (5) с исследуемым металлом. Мишень состояла из электрического нагревателя (6), выполненного в виде полуцилиндра, разрезанного по образующей, термопары и фольги из металлического кадмия на внутренней цилиндрической поверхности. Температура фольги контролировалась термопарой и поддерживалась постоянной регулятором температуры Щ-4518. Фольга имела следующие размеры: внешний диаметр 32, внутренний диаметр 30, длина 70 mm. Для обеспечения равномерного распределения температуры по длине фольги внутренний полуцилиндр, на который снаружи укладывалась обмотка нагревателя, был изготовлен из красной меди. Фольга толщиной 1 mm изгибалась по радиусу  $R = 15$  mm и плотно прижималась к медному полуцилиндру для обеспечения хорошего теплового контакта с ним. Регистрация светового излучения производилась фотоумножителем ФЭУ-71 (7), работающим в токовом режиме на нагрузку 50  $\Omega$  без использования усилителя. Запись формы световых импульсов производилась с помощью цифрового осциллографа Rigol DS5022 ME (8), связанного с персональным компьютером IBM PC (9).



**Рис. 1.** Блок-схема установки для исследования кинетики люминесценции при распылении металлического кадмия: 1 — камера, 2 — кварцевое окно, 3 — входная щель монохроматора МДР-12, 4 — ускоритель электронов „Арина“, 5 — мишень с металлическим кадмием, 6 — электрический нагреватель, 7 — фотоумножитель ФЭУ-71, 8 — цифровой осциллограф Rigol DS5022 ME, 9 — персональный компьютер IBM PC.

пьютером IBM PC (9). Временное разрешение установки составляло 20 ns/cm. Установка позволяла работать с металлическим Cd при температуре до 300°C с любыми неагрессивными газами при давлении от нескольких Torr до 3 atm.

При работе камера откачивалась и заполнялась буферным газом гелием при давлении от 76 до 2280 Torr. С помощью циркуляционного насоса буферный газ мог прокачиваться через фильтр из разогретой до 700°C титановой губки. Необходимость использования прокачки и очистки буферного газа была связана с тем, что при разогреве мишени наблюдалось газовыделение со стенок камеры, что влияло на люминесцентные свойства образующейся плазмы. Конструкция циркуляционного насоса и система очистки газа описана в работе [12].

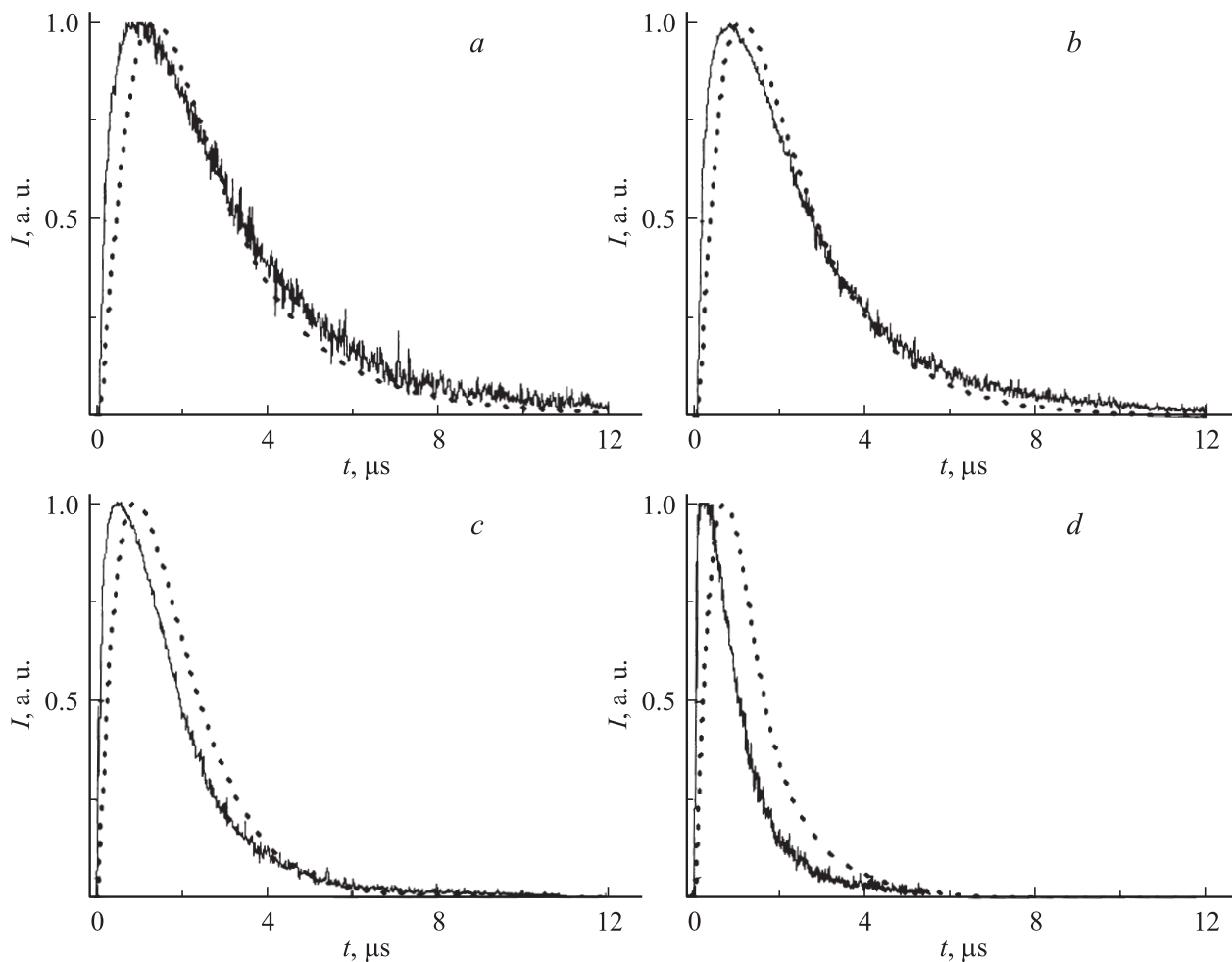
## 3. Полученные результаты

Измерение интенсивности люминесценции иона кадмия при бомбардировке кадмиевой мишени электронным пучком производилось при температуре 240°C и различных значениях давления гелия — от 0.1 до 3 atm. Полученные результаты для нескольких значений давления буферного газа, представлены на рис. 2, где показана зависимость интенсивности линии  $\lambda = 442$  nm от времени (переход  $5s^2 \ ^2D_{5/2} - 5p \ ^2P_{3/2}$  Cd II). Кривые высвечивания  $5s^2 \ ^2D_{5/2}$  уровня Cd II содержат несколько временных компонентов, связанных с источниками заселения уровня. Первый, самый быстрый компонент характеризует радиационное время жизни уровня и обусловлен процессами распыления металлического кадмия за счет бомбардировки мишени импульсом электронов малой длительности ( $T_p = 3$  ns) и созданными им ионами He<sup>+</sup>. Медленные компоненты высвечивания связаны с плазмохимическими реакциями таблицы, происходящими в объемно-возбуждаемой плазме.

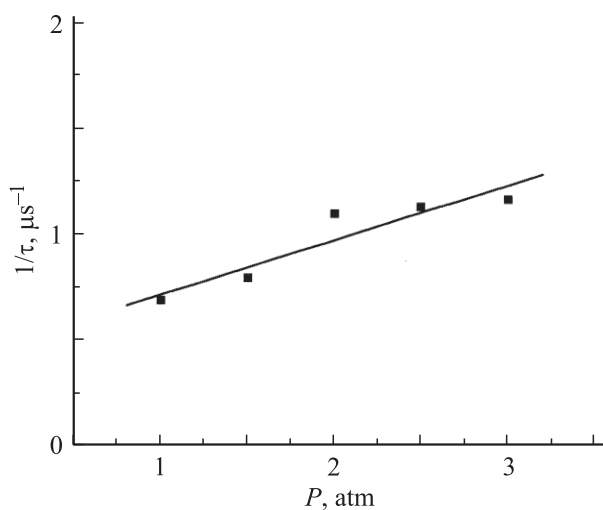
На рис. 3 приведена зависимость обратного времени высвечивания быстрого компонента люминесценции на длине волны 442 nm от давления гелия. Тангенс угла наклона прямой дает значение константы столкновительного тушения  $5s^2 \ ^2D_{5/2}$  уровня Cd II равное  $9.3 \cdot 10^{-15}/[\text{Cd}] \text{ cm}^6/\text{s}$ . Для условий данной работы ( $[\text{Cd}] \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) эта величина близка к константе  $k = 1.9 \cdot 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$ , приведенной ранее в работе [10].

С использованием (2) из измеренных осциллограмм рис. 2 была получена функция  $F(t)$  накачки  $5s^2 \ ^2D_{5/2}$  уровня Cd II (рис. 4). Для того чтобы определить вклады в люминесценцию за счет распыления металла и за счет возбуждения паровой фазы, был проведен расчет временных спектров люминесценции парометаллической смеси при возбуждении прямоугольным импульсом электронов с энергией 150 keV и длительностью 3 ns.

Основные плазмохимические процессы, протекающие в такой парогазовой смеси, приведены в таблице. Из-за низкого содержания атомов кадмия ( $[\text{He}] = 2.69 \cdot 10^{18} - 8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $[\text{Cd}] = 3.54 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )

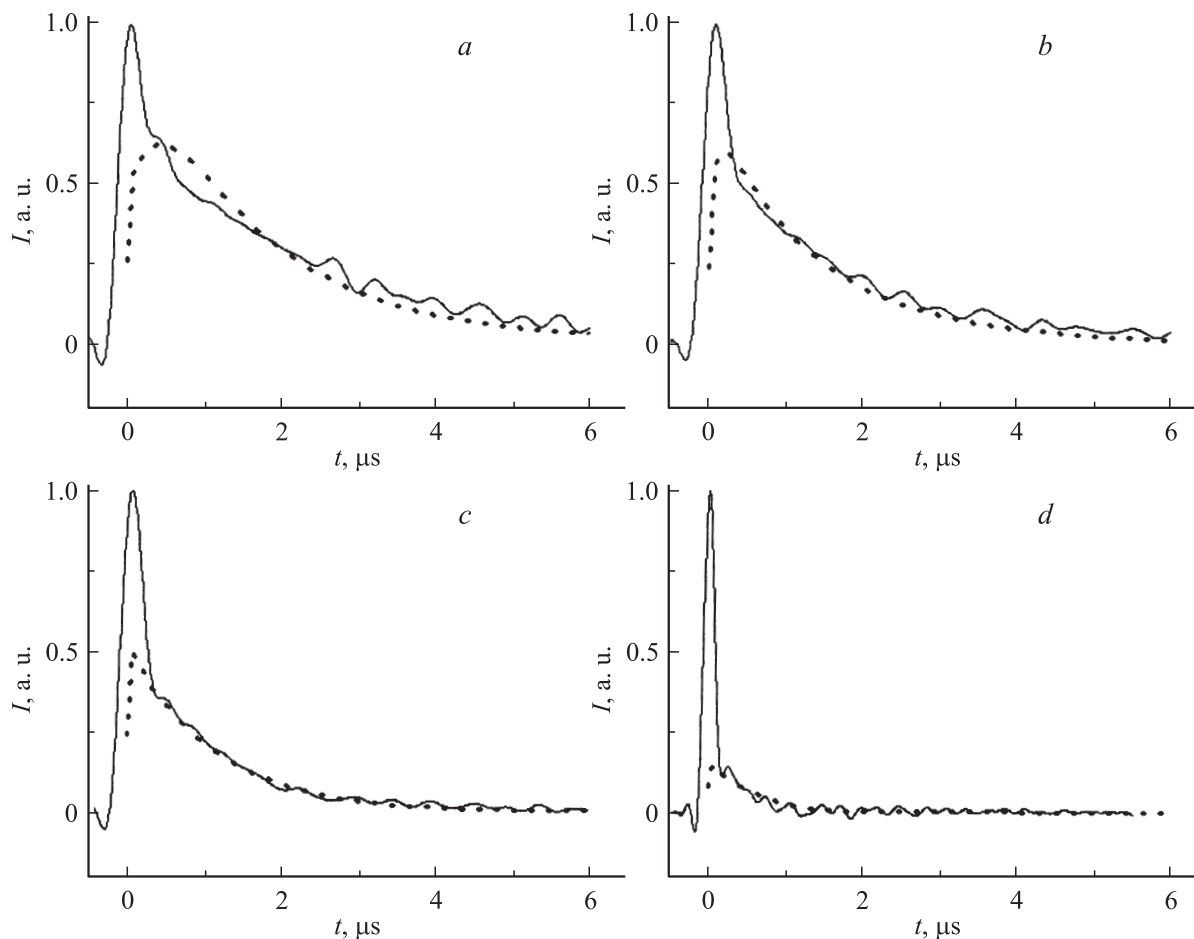


**Рис. 2.** Интенсивность бейтлеровской линии  $\lambda = 442 \text{ nm}$  иона Cd при бомбардировке металлического кадмия импульсным электронным пучком при давлении гелия 0.25 (a), 0.5 (b), 1 (c) и 2.5 atm (d). Температура мишени и смеси He–Cd —  $240^\circ\text{C}$ . Сплошная кривая — эксперимент, пунктир — результаты расчета для парогазовой смеси при объемном возбуждении.



**Рис. 3.** Обратное время высвечивания быстрого компонента люминесценции иона кадмия на длине волны 442 nm при разных значениях давления  $P$  буферного газа гелия. Температура мишени —  $240^\circ\text{C}$ ; ■ — экспериментальные точки.

можно считать, что вся энергия электронного пучка расходуется на возбуждение и ионизацию атомов буферного газа (He). При этом будут создаваться ионы  $\text{He}^+$  в основном состоянии и возбужденные атомы He преимущественно в состоянии  $\text{He}^*(2^1P)$  [13]. Конверсия атомов  $\text{He}^*(2^1P)$  в метастабильные  $\text{He}^*(2^1S)$  или молекулярные  $\text{He}_2^m$  состояния происходит радиационно или столкновительно за время  $\sim 1\text{--}10 \mu\text{s}$  (см. таблицу). Поскольку рассматривается нестационарная задача с характерным временем импульса накачки 3 ns, такие значения времени конверсии слишком большие, чтобы повлиять на существенное изменение концентрации атомов  $\text{He}^*(2^1P)$ . Поэтому в плазмохимическую модель введена дополнительно реакция (6а), которая учитывает образование возбужденных ионов кадмия за счет реакции Пеннинга с участием атомов  $\text{He}^*(2^1P)$ . Константа скорости этой реакции выбрана по аналогии с реакцией Пеннинга для атомов  $\text{He}^*(2^1S)$ , причем использовалось максимальное значение этой константы, приведенное в [10].



**Рис. 4.** Функция накачки  $5s^2 2D_{5/2}$  Cd II уровня при бомбардировке металлического кадмия импульсным электронным пучком при давлении гелия 0.25 (a), 0.5 (b), 1.0 (c) и 2.5 atm (d). Температура мишени — 240°C. Пунктир — результаты расчета  $F(t)$  для парогазовой смеси при объемном возбуждении He–Cd-смеси импульсом электронов.

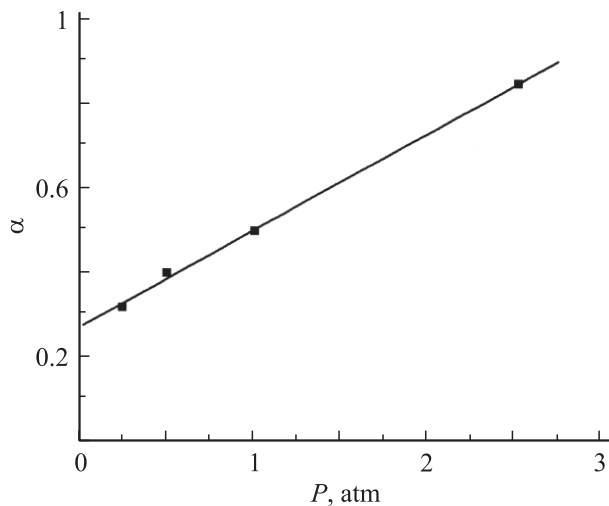
Составленная на основании реакций таблицы система нестационарных кинетических уравнений для компонентов плазмы  $\text{He}^+$ ,  $\text{He}_2^+$ ,  $\text{He}^*$ ,  $\text{He}_2^*$ ,  $\text{Cd}^+$ ,  $n_e$ ,  $T_e$ , решалась с помощью программы MatLab 7 в два этапа.

На первом этапе все ионные уровни Cd II, включая основное состояние иона, не различались между собой и принимались как один общий уровень, и определялись интегральные характеристики плазмы — температура и концентрация электронов, концентрация атомарных и молекулярных ионов гелия, суммарная концентрация ионов кадмия, молекул гелия, возбужденных и метастабильных атомов. На этом этапе расчета использовались интегральные константы скорости плазмохимических реакций, приведенные в таблице.

Полученные в результате такого расчета интегральные характеристики плазмы — концентрации  $\text{He}^+(t)$ ,  $\text{He}_2^+(t)$ ,  $\text{He}^*(t)$ ,  $\text{He}_2^*(t)$ ,  $\text{Cd}^+$ ,  $n_e(t)$  и температура  $T_e(t)$  использовались на втором этапе в качестве исходных данных при расчете заселенности бейтлеровских уровней иона Cd II. На этом этапе расчета учитывались плазмохимические реакции 6–9 таблицы с парциальными коэффициентами скорости реакций, относящихся только

к  $5s^2 2D_{5/2}$  уровню Cd II. Система дифференциальных уравнений решалась численно.

Результаты расчета значений интенсивности линий  $\lambda = 442 \text{ nm}$  иона Cd II как функции времени при накачке коротким (3 ns) импульсом быстрых электронов ( $E_e = 150 \text{ keV}$ ) для различных давлений буферного газа показаны на рис. 2 пунктиром. Поскольку абсолютная привязка результатов расчетов к измеренным величинам была затруднительна, для определения временных отличий расчетные значения нормировались к максимальной амплитуде измеренного импульса. Сравнение экспериментальных осциллограмм (рис. 2, сплошная кривая) с расчетными (рис. 2, пунктир) показывает, что на временном интервале 0–1000 ns пиковое значение интенсивности излучения объемно-возбуждаемой плазмы (пунктир) достигается с временной задержкой  $\sim 1 \mu\text{s}$  по сравнению с экспериментально измеренными значениями (сплошная кривая). На наш взгляд, это связано с действием распылительного механизма заселения этого уровня за счет бомбардировки металлической фольги быстрыми электронами и компонентами гелиевой плазмы — преимущественно ионами  $\text{He}^+$ .



**Рис. 5.** Относительный вклад в заселение бейтлеровского  $5s^2 \ ^2D_{5/2}$  уровня Cd II за счет распыления металлической подложки электронным пучком и компонентами гелиевой плазмы в зависимости от давления  $P$  буферного газа гелия. Температура кадмиевой мишени  $240^\circ\text{C}$ ; ■ — экспериментальные точки.

Результаты проведенного нами расчета временных характеристик люминесценции объемно-возбуждаемой плазмы хорошо согласуются с экспериментальными результатами работы [10], где были измерены кривые высвечивания  $5s^2 \ ^2D_{5/2}$  уровня Cd II при возбуждении объемной парогазовой He–Cd смеси осколками деления урана.

По результатам проведенных расчетов с помощью формулы (2) была определена функция накачки  $5s^2 \ ^2D_{5/2}$  уровня Cd II для парометаллической смеси (рис. 4, пункт).

Ее сравнение с аналогичной величиной, полученной из экспериментальных данных, позволило оценить относительный вклад в заселение бейтлеровского уровня за счет распылительного механизма (собственно распыления электронным пучком) и за счет поверхностной ионизации компонентами гелиевой плазмы. Для этого необходимо было вычестить из измеренного сигнала ту долю люминесценции, которая была создана за счет объемного возбуждения парогазовой He–Cd смеси. Для этого расчетные и измеренные значения функции  $F(t)$  взаимно нормировались по заднему фронту, так как этот временной участок функции накачки связан с процессами, происходящими в объемно-возбуждаемой плазме. Относительный вклад распылительного механизма в заселение бейтлеровского уровня определялся как разность экспериментальных и расчетных пиковых значений функции накачки, отнесенных к экспериментальному пиковому:  $\alpha = (F_{\text{exp}} - F_{\text{calc}})/F_{\text{exp}}$ . Данные, приведенные на рис. 5, показывают, что суммарный относительный вклад от распыления электронным пучком и поверхностной ионизации  $\alpha$  изменяется от 32% при  $P_{\text{He}} = 0.25 \text{ atm}$  до 85% при  $H_{\text{He}} = 2.5 \text{ atm}$  для переднего

фронта функции накачки  $F(t)$  и описывается линейной зависимостью:

$$\alpha = 0.28 + 0.32P, \quad (3)$$

где  $P$  — давление буферного газа гелия в atm.

Экстраполяция относительного вклада к нулевому давлению гелия (рис. 5) дает величину 28%, определяющую относительный вклад в заселение бейтлеровского  $5s^2 \ ^2D_{5/2}$  уровня Cd II за счет распыления металлической подложки только электронным пучком без участия возбужденных компонентов буферного газа. Вклад в заселение этого уровня за счет поверхностной ионизации возбужденными компонентами гелия в диапазоне давлений 0–2.5 atm характеризуется величиной 0.23P.

## Заключение

Получение сильной люминесценции при бомбардировке подогретой до температуры  $T \sim 0.5\text{--}0.7T_{\text{fus}}$  металлической фольги частицами высокой энергии (электроны, альфа-частицы, осколки деления урана) представляет собой эффективный способ прямого преобразования энергии ядерных реакций в световое излучение. Применительно к лазерам с ядерной накачкой этот способ позволяет работать при пониженных температурах активного элемента и использовать в качестве активных сред многие труднолетучие вещества (включая уран).

## Список литературы

- [1] *Thomas G.F.* // *Surface Sci.* 1979. Vol. 90. P. 381–416.
- [2] Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1213 с.
- [3] *Миськевич А.И.* // *Квант. электрон.* 2002. Т. 32. № 9. С. 803–808.
- [4] *Миськевич А.И., Лю Тао* // *Опт. и спектр.* 2008. Т. 105. № 5. С. 755–763.
- [5] *Миськевич А.И., Чжао Сяолинь* // *ЖТФ.* 2002. Т. 72. Вып. 7. С. 122–128.
- [6] *Ramanijam P.S.* // *Phys. Rev. Lett.* 1977. Vol. 39. N 19. P. 1192–1194.
- [7] *Плехоткин Г.А., Шухтин А.М.* // *Опт. и спектр.* 1983. Т. 54. № 4. С. 630.
- [8] *Mayo R., Ortiz M., Campos J., Blagoev K., Malcheva G.* // *Phys. Scr.* 2005. Vol. 72. P. 142–147.
- [9] *Smithells Metal Reference Book.* 7th edition / Ed. by E.A. Brandes, G.B. Brooks. Oxford Butterworth Heinemann, 1992. Ch. 8. P. 8–55.
- [10] *Поletaев Е.Д., Дьяченко П.П., Тараско М.З., Дюжов Ю.А.* // *Тр. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“.* 1995, Арзамас-16. Т. 1. С. 121–133.
- [11] *Goto T., Hane K., Okuda M., Hattory S.* // *Phys. Rev. A.* 1983. Vol. 27. N 4. P. 1844–1850.
- [12] *Копай-Гора А.П., Миськевич А.И., Саламаха Б.С.* // *Приборы и техника эксперимента.* 1986. № 5. С. 171–174.
- [13] *Bennett W.R.* // *Ann. Phys.* 1962. Vol. 18. P. 367–418.