

Излучение смеси ${}^3\text{He} - \text{Xe} - \text{Cd}$ в активной зоне ядерного реактора

М.У.Хасенов

Исследован спектр люминесценции смеси ${}^3\text{He} - \text{Xe} - \text{Cd}$ в диапазоне длин волн 350–830 нм при температуре газа 250–600 °С; смесь возбуждалась продуктами ядерной реакции ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$. Обсуждается механизм заселения уровней CdI , оценена константа скорости перезарядки ионов Xe_2^+ на атомах кадмия ($k \sim 10^{-13} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$).

Ключевые слова: люминесценция, кадмий, ксенон, ядерная накачка, лазер.

1. Введение

Смеси инертных газов с парами металлов группы II являются перспективными активными средами для создания мощных, высокоэффективных лазеров с накачкой жестким ионизатором [1–3]. В [3–5] было предложено для получения генерации на линиях триплетта ртути использовать смесь газов ($\text{He} - \text{Xe} - \text{Hg} - \text{H}_2$). Накачка состояния $\text{HgI } 7^3\text{S}_1$ происходит при диссоциативной рекомбинации ионов Hg_2^+ , константа скорости дезактивации водородом нижнего лазерного уровня на порядок больше, чем для верхнего уровня [3], ксенон в качестве буферного газа обеспечивает (без перезарядки на H_2) ионизацию атомов ртути. Квазинепрерывная генерация на переходе атома ртути $7^3\text{S}_1 - 6^3\text{P}_2$ с использованием такой схемы была получена на импульсном ядерном реакторе [6].

Схожая схема реализована при возбуждении смесей ртути с инертными газами электронным пучком [7]. В этой работе в качестве буферного газа использовалась смесь $\text{He} - \text{Ne} - \text{Ar}$ при полном давлении 2300 Тор; ссылаясь на более позднюю работу, чем [3, 8], авторы [7] указывают на рекомбинацию Hg_2^+ как на основной канал заселения 7^3S_1 . Попытка использовать H_2 для расселения уровня 6^3P_2 не привела к успеху, а при давлении водорода 20 Тор генерация срывалась [7]. На наш взгляд, это связано с тем, что образовавшиеся в плазме молекулярные ионы гелия эффективно перезаряжаются на атомах Ar , Ne , в свою очередь ионы Ar_2^+ , Ne_2^+ – на молекулах H_2 [9], а константы скорости перезарядки Ar_2^+ , Ne_2^+ на Hg малы ($5 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ для Ne_2^+ и менее $10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ для Ar_2^+ [10]). Поскольку давление паров ртути составляло ~ 1 Тор, энергия пучка уходила на ионизацию молекул H_2 , а не атомов ртути. Основным каналом ионизации ртути в такой смеси является процесс Пеннинга с участием возбужденных атомов аргона.

Схема энергетических уровней атома кадмия аналогична схеме уровней атомов ртути, поэтому представляет интерес исследование возможности квазинепрерывной генерации на $6s - 5p$ -переходах Cd . Квантовый КПД такой системы (отношение энергии фотона к энергии образования электрон-ионной пары в Xe) превышает 11 %, что заметно выше, чем на переходах иона кадмия в смеси $\text{He} - \text{Cd}$. В настоящей работе изучен спектр излучения смеси ${}^3\text{He} - \text{Xe} - \text{Cd}$ в активной зоне ядерного реактора.

2. Техника эксперимента

Установка для внутриреакторных спектральных измерений описана в работах [4, 5]. Стеклообразная ампула с окном на торце из радиационно-стойкого цериевого стекла (диаметр ампулы 30 мм, длина 60 мм) прогревалась в вакууме $\sim 10^{-5}$ Тор в течение нескольких часов. Затем ампула с кусочком кадмия-116 заполнялась ${}^3\text{He}$ при давлении 600 Тор или смесью ${}^3\text{He}$ (200 Тор) – Xe (400 Тор) и помещалась в центральный канал активной зоны стационарного ядерного реактора ВВР-К. Нижняя часть экспериментального канала высотой 700 мм представляла собой две концентрические трубы из стали Х18Н10Т с зазором между ними около 2 мм; изменяя давление ${}^4\text{He}$ в зазоре можно было изменять температуру ампулы. При спектральных измерениях регистрировалась температура дна экспериментального канала, а затем с помощью контрольной ампулы с термпарой проводилась калибровка по температуре ампулы с кадмием-116. Погрешность в определении температуры ампулы (в градусах Цельсия) составляла ~ 10 %. Возбуждение содержимого ампулы осуществлялось продуктами ядерной реакции ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$, плотность потока тепловых нейтронов была равна 1.0×10^{13} нейтр.·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$. По трубе длиной 6 м свет выводился из активной зоны реактора и регистрировался с помощью монохроматора SPM-2 с кварцевой призмой и ФЭУ-106, работающего в режиме счета фотонов. Спектральный диапазон (350–830 нм) определялся границами пропускания окна ампулы и чувствительности ФЭУ.

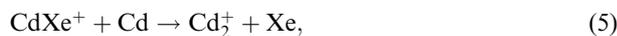
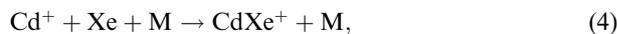
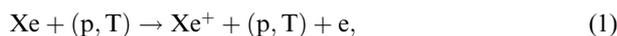
М.У.Хасенов. ТОО «Наука Л», Казахстан, 480062 Алма-Ата, ул. Утеген батыра, 112; e-mail: nauka_1@nursat.kz

Поступила в редакцию 5 июля 2004 г., после доработки – 26 октября 2004 г.

3. Результаты и их обсуждение

Спектр излучения смеси ${}^3\text{He}-\text{Cd}$ в основном соответствует описанному в [11, 12], отличаясь от него только соотношением интенсивностей некоторых линий. Непрерывный спектр образован излучением молекул Cd_2^* . Зависимость интенсивности атомарных линий с $\lambda = 508.6$ нм ($6^3\text{S}_1 - 5^3\text{P}_2$) и 643.8 нм ($5^1\text{D}_2 - 5^1\text{P}_1$) от температуры ампулы с кадмием-116 показана на рис.1 (здесь и далее интенсивности линий даются без поправки на спектральную чувствительность установки, 1 ед. = 1000 имп./с). Кроме линий триплета кадмия ($\lambda = 467.8, 480$ и 508.6 нм) и линии с $\lambda = 643.8$ нм, к атомарным относилась также линия с $\lambda = 361.0$ нм ($5^3\text{D}_3 - 5^3\text{P}_2$), максимальная интенсивность которой равна около 5.5 ед. при температуре 350°C . Для сравнения: максимальная интенсивность самой яркой в наших условиях ионной линии с $\lambda = 441.6$ нм составляла 110 ед. при температуре 360°C .

В смеси ${}^3\text{He}-\text{Xe}-\text{Cd}$ интенсивность линии с $\lambda = 361.0$ нм ниже порога чувствительности установки (~ 0.1 ед.); как и следовало ожидать, отсутствуют линии Cd II. По аналогии с ртутьсодержащими смесями возбуждение уровней кадмия, по-видимому, происходит в результате следующих процессов (M – третья частица):



(предполагалось, что, как и в смеси $\text{Xe}-\text{Hg}$ [10], константа скорости перезарядки Xe^+ на атомах кадмия $k_a < 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$).

Заселение 6^3S_1 - и 5^1D_2 -уровней кадмия может происходить как непосредственно в процессе реакции (6), так и каскадным образом с более высоких уровней; длины волн таких переходов лежат за пределами чувстви-

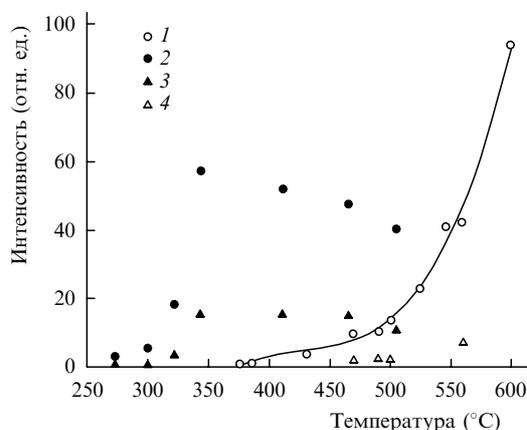


Рис.1. Зависимость интенсивности линий с $\lambda = 508.6$ нм (1, 2) и 643.8 нм (3, 4) в смесях ${}^3\text{He}-\text{Cd}$ (2, 3) и ${}^3\text{He}-\text{Xe}-\text{Cd}$ (1, 4) от температуры ампулы с кадмием-116.

ности ФЭУ. О получении генерации на переходах $6^3\text{P}_1 - 6^3\text{S}_1$, $4^3\text{F}_2 - 5^3\text{D}_3$ в смеси $\text{He}-\text{Cd}$ сообщалось в [13]. Отсутствие линии 361.0 нм в спектре излучения указывает на то, что в смеси (He) – $\text{Xe}-\text{Cd}$ либо заселение уровня 4^3F_2 несущественно, либо уровни 4^3F_2 , 5^3D_3 сильно тушатся ксеноном. Максимум интенсивности линии с $\lambda = 508.6$ нм в смеси ${}^3\text{He}-\text{Xe}-\text{Cd}$ достигается при значительно более высокой температуре, чем в смеси ${}^3\text{He}-\text{Cd}$ (см. рис.1). Это, по-видимому, объясняется тем, что перезарядка Xe_2^+ на Cd идет медленно. Зависимость интенсивности излучения на $\lambda = 508.6$ нм от плотности атомов кадмия N показана на рис.2. Плотность атомов кадмия (в см^{-3}) рассчитывалась по формуле [14]

$$N = \frac{1.41 \times 10^{27}}{T_g} \exp\left(-\frac{12550}{T_g}\right). \quad (7)$$

Здесь T_g – абсолютная температура газа в кельвинах.

Можно показать [4], что, если заселение уровней кадмия происходит в результате процессов (1)–(6), то зависимость интенсивности от N описывается выражением

$$I = \frac{kN}{kN + (\alpha S)^{1/2}} I_\infty, \quad (8)$$

где I_∞ – интенсивность при высокой плотности атомов кадмия; k – константа скорости процесса (3); $\alpha \approx 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ – коэффициент электрон-ионной рекомбинации, принятый одинаковым для основных ионов. Скорость ионизации газа ($S \approx 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) оценивалась по известным значениям сечения ядерной реакции и длин пробега протонов и тритонов в газе. Подгонка соотношения (8) под экспериментальную зависимость позволяет оценить I_∞ (~ 200 ед.) и k ($\sim 10^{-13} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$).

Таким образом, в отличие от константы скорости перезарядки Xe_2^+ на атомах ртути, константа скорости перезарядки Xe_2^+ на атомах кадмия мала. Достаточно высокая плотность паров кадмия ($\sim 3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) создается при температуре около 700°C . При такой плотности необходимо учитывать тушение состояния 6^3S_1 собственными атомами, хотя в исследованном нами диапазоне плотностей заметного тушения не обнаружено. Зависимость интенсивности от N удовлетворительно описывается соотношением (8) (рис.2). Возможно, в криптоне

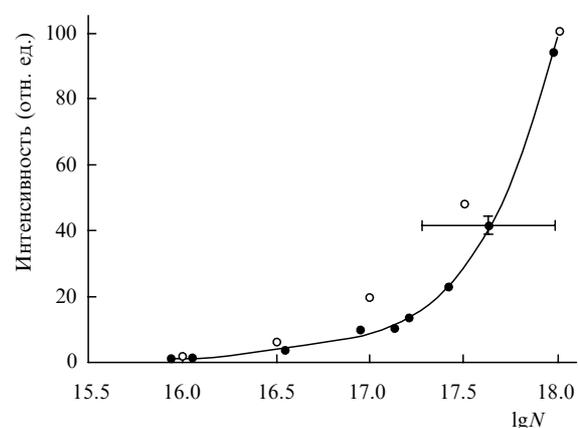


Рис.2. Зависимость интенсивности линии с $\lambda = 508.6$ нм (●) от плотности паров кадмия в смеси ${}^3\text{He}-\text{Xe}-\text{Cd}$. Светлые кружки – расчет по формуле (8) при $I_\infty = 200$ ед., $k = 10^{-13} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

перезарядка на Cd будет происходить быстрее, к тому же в криптоне атомы кадмия могут ионизироваться в процессе Пеннинга.

Спектры излучения измерены в Институте ядерной физики Национального ядерного центра Республики Казахстан. Автор благодарен А.С.Заславскому за помощь при измерениях.

1. Миськевич А.И., Дмитриев А.Б. и др. *Письма в ЖТФ*, **6**, 818 (1980).
2. Карелин А.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **20**, 631 (1993).
3. Батырбеков Г.А., Сорока А.М., Хасенов М.У. и др. *Квантовая электроника*, **14**, 1216 (1987).
4. Батырбеков Г.А., Сорока А.М., Хасенов М.У. и др. *Препринт ИЯФ АН КазССР, № 3-87* (Алма-Ата, 1987).
5. Батырбеков Г.А., Сорока А.М., Хасенов М.У. и др. *ЖПС*, **49**, 770 (1988).
6. Бочков А.В., Крыжановский В.А., Магда Э.П. и др. *Письма в ЖТФ*, **18**, 91 (1992).
7. Rhoades R.L., Verdeyen J.T. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2951 (1992).
8. Jog V.E., Biondi M.A. *J. Phys. B*, **14**, 4719 (1981).
9. Вирин Л.И. и др. *Ионно-молекулярные реакции в газах* (М.: Наука, 1979).
10. Johnsen R., Biondi M.A. *J. Chem. Phys.*, **73**, 5045 (1980).
11. Дмитриев А.Б., Миськевич А.И. и др. *ЖТФ*, **52**, 2235 (1982).
12. Копай-Гора А.П., Миськевич А.И. и др. *Оптика и спектроскопия*, **67**, 526 (1987).
13. Магда Э.П. *Труды конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой»* (Обнинск, 1993, т.1, с.65).
14. Карелин А.В., Широков Р.В. *Квантовая электроника*, **25**, 917 (1998).