

- [1] Шемякин В.А., Баранов В.К., Косяченко Л.А. и др. // Опτικο-мех. пром-сть. 1979. № 9. С. 39–42.
- [2] Гуц В.В., Косяченко Л.А., Пивовар А.В., Шемякин В.А. // Проблемы физики и технологии широкозонных полупроводников. Л., 1979. С. 340–345.
- [3] Косяченко Л.А. // Записки Тартуского университета. 1983. № 655. С. 12–33.
- [4] Баранюк В.Е., Мазний В.П. А.С. № 1835886. Приоритет от 4.06.1991.
- [5] Мазний В.П., Мельник В.В. А.С. № 1764474. Приоритет от 29.10.1990.
- [6] Верещагин И.К. Электрорлюминесценция кристаллов. М.: Наука, 1974. 280 с.
- [7] Ермаков О.Н. Влияние температурных эффектов на характеристики полупроводниковых источников излучения. 4.П. Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1987. № 1(1254). 54 с.
- [8] Мазний В.П. // УФЖ. 1991. Т. 36. № 10. С. 1554–1559.
- [9] Мазний В.П. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 3. С. 17–21.
- [10] Баранюк В.Е., Мазний В.П., Мельник В.В. // ПТЭ. 1991. № 2. С. 223.
- [11] Рыжиков В.Д. Сцинтилляционные кристаллы полупроводниковых соединений АВ. Получение, свойства, применение. М., 1989. 124 с.

02;04;07

Журнал технической физики, т. 66, в. 2, 1996

КОНСТАНТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ В КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ HeCd ПЛАЗМЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

© С.В.Макаров, Ю.Н.Новоселов

Институт электрофизики УрО РАН,
620219 Екатеринбург, Россия
(Поступило в Редакцию 26 декабря 1994 г.)

Смесь паров кадмия с гелием высокого давления представляет интерес как активная лазерная среда, в которой возможна генерация в широком диапазоне спектра от ИК до УФ на атомарных и ионных переходах [1]. При низком давлении смеси генерация достигается при возбуждении электрическим разрядом. В смесях высокого давления лазерное излучение на CdII получено при возбуждении электронным пучком, а также продуктами ядерной реакции. В то же время электроразрядный метод возбуждения плотной HeCd смеси изучен недостаточно. Анализ работы электроразрядного лазера, в частности HeCd лазера высокого давления, возможен при наличии констант возбуждения и ионизации каждого компонента смеси. Эти константы зависят от функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ), которая в газоразрядной плазме существенно отличается от максвелловской. В настоящей работе на основе численного решения уравнения Больцмана выполнен расчет квазистационарных энергетических распределений электронов, констант возбуждения и ионизации, а также дрейфовой скорости, подвижности и коэффициента диффузии электронов в плотной HeCd разрядной плазме.

При расчетах за основу была принята кинетическая модель HeCd лазера высокого давления с накачкой электронным пучком [2]. Модель

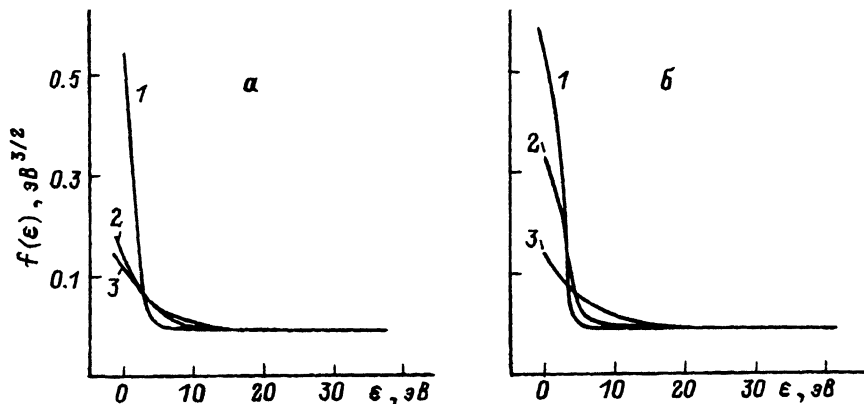


Рис. 1. Функция распределения электронов по энергии.

Температура смеси *а* — 325, *б* — 450°C; E/N : 1 — $0.5 \cdot 10^{-16}$, 2 — $2 \cdot 10^{-16}$, 3 — $4 \cdot 10^{-16}$ В · см².

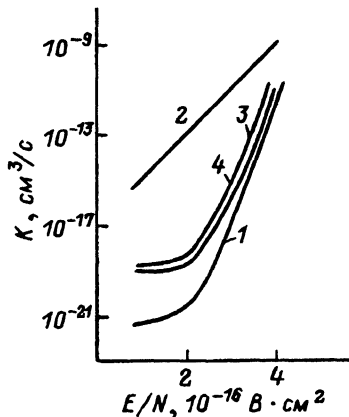
была дополнена процессами возбуждения и ионизации атома кадмия электронным ударом. Сечения возбуждения синглетных и триплетных уровней из основного состояния рассчитывались в обобщенной борн-кулоновской модели с нормировкой и учетом обмена. Учитывались следующие процессы взаимодействия электронов с компонентами смеси: гелий — возбуждение атома в 13 различных состояний, ступенчатое возбуждение атома, прямая и ступенчатая ионизация атома; кадмий — возбуждение атома в 25 различных состояний, прямая и ступенчатая ионизация атома, ионизация атома прямым электронным ударом с возбуждением в 7 состояний иона, а также обратные процессы.

Основные расчеты выполнялись для условий, соответствующих эксперименту [3]. При моделировании концентрация гелия принималась равной $1.7 \cdot 10^{19}$ см⁻³, а концентрация кадмия задавалась температурой смеси в соответствии с данными [4]. Температура смеси варьировалась от 325 до 550°C, при этом параметр E/N изменялся от $0.5 \cdot 10^{-16}$ до $4 \cdot 10^{-16}$ В · см² (E — напряженность электрического поля, N — концентрация атомов в смеси).

Компоненты исследуемой смеси имеют существенно различную энергетическую структуру атомов, например, потенциал ионизации гелия (24.58 эВ) почти в три раза превышает потенциал ионизации кадмия (8.99 эВ). Пары кадмия в смеси выступают в роли легкоионизируемой добавки, и изменение их количества влияет не только на процессы в стадии формирования разряда [3], но и в стадии квазистационарного горения. Выполненные нами расчеты позволяют количественно оценить влияние концентрации кадмия на изменение ФРЭЭ в квазистационарном режиме.

На рис. 1 приведены типичные ФРЭЭ для температуры смеси 325 и 450°C, что соответствует концентрации паров кадмия $2 \cdot 10^{15}$ и $6 \cdot 10^{16}$ см⁻³. В слабых полях $E/N = 0.5 \cdot 10^{-16}$ В · см² (кривые 1 на рис. 1, *а, б*) основная доля электронов обладает энергией, меньшей 5 эВ. Увеличение параметра E/N до 10^{-16} В · см² и выше приводит к появлению достаточно энергичных электронов. При малой concentra-

Рис. 2. Константы ионизации гелия (1) и кадмия (2) в основное состояние иона, ионизации кадмия с возбуждением ионных уровней $5s^2 D_{5/2}$ (3) и $5s^2 D_{3/2}$ (4). Температура смеси 550°C .



пии паров ФРЭЭ в этих полях изменяется слабо (рис. 1, а, кривые 2, 3). В смеси с большим содержанием паров вид ФРЭЭ при разных полях более разнообразен. В любом случае увеличение напряженности поля вызывает обогащение ФРЭЭ быстрыми электронами. Из рисунков видно, что увеличение концентрации паров кадмия приводит к снижению количества быстрых электронов в ФРЭЭ (кривые 2 на рис. 1, а и б). В экспериментальной работе [5] отмечалось, что рост плотности атомов кадмия в смеси снижает температуру электронов, что приводит к уменьшению интенсивности ионных линий люминесценции кадмия.

Полученные ФРЭЭ позволяют определить константы скоростей ионизации (рис. 2) и возбуждения (рис. 3) компонент смеси. Скорости столкновительного взаимодействия электронов с атомами определя-

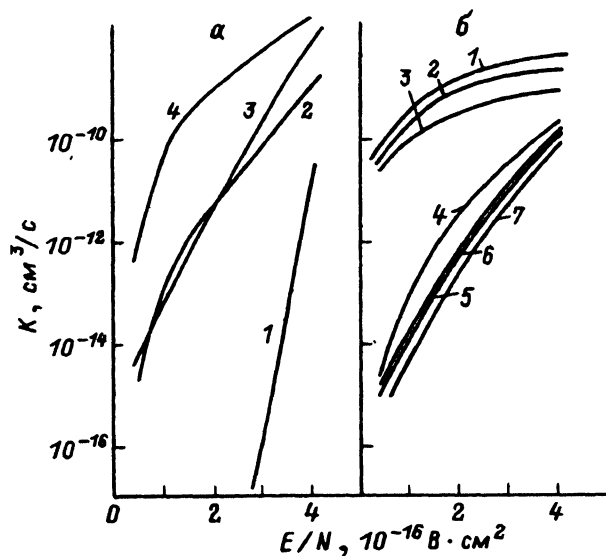


Рис. 3. Константы возбуждения атомарных уровней.

а: 1 — гелий 2^3S_1 и 2^1S_0 кадмий (синглеты), 2 — $6s^1S_0$, 3 — $5d^1D_2$, 4 — $5p^1P_1$; б — кадмий (триплеты): 1 — $5p^3P_2$, 2 — $5p^3P_1$, 3 — $5p^3P_0$, 4 — $6s^3S_1$, 5 — $5d^3D_3$, 6 — $5d^3D_2$, 7 — $5d^3D_1$. Температура смеси 550°C .

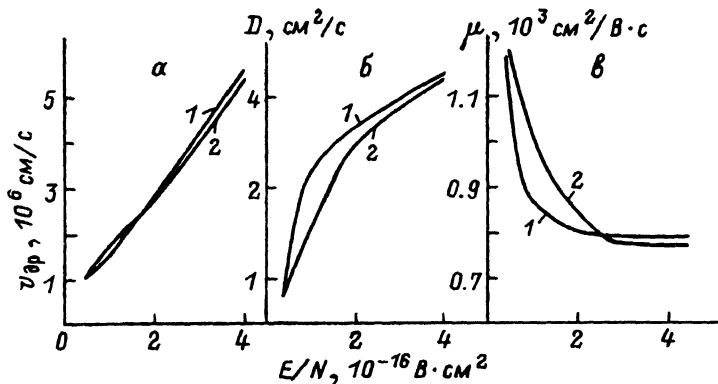


Рис. 4. Дрейфовая скорость (а), коэффициент диффузии (б) и подвижность электронов (в).

1 — 325, 2 — 450°С.

лись из соотношения

$$\langle vQ(\varepsilon) \rangle = \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_0^{\infty} d\varepsilon \varepsilon f_0(\varepsilon) Q(\varepsilon),$$

где ε — энергия электрона, $Q(\varepsilon)$ — сечение взаимодействия электрона с атомом, $f_0(\varepsilon)$ — функция распределения электронов по энергии, v — скорость электрона, e — заряд электрона, m — масса электрона.

На рис. 2 приведены рассчитанные таким образом константы ионизации гелия и кадмия, а также константы ионизации кадмия в возбужденные ионные состояния $4d^9 5s^2 D_{3/2, 5/2}$. Интерес к этим уровням CdII обусловлен тем, что они являются верхними для переходов с длиной волны 441.6 и 325.0 нм соответственно. На этих линиях получена лазерная генерация в плотной HeCd смеси, возбуждаемой пучком электронов. Видно, что небольшое увеличение поля от $E/N = 2 \cdot 10^{-16}$ до $4 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ приводит к резкому возрастанию (почти на 8 порядков) констант возбуждения ионных уровней. Обращает внимание то, что значение константы ионизации кадмия существенно выше константы ионизации гелия.

При анализе процессов в HeCd плазме представляют также интерес константы скоростей возбуждения атомарных уровней кадмия, как синглетных, так и триплетных. Рассчитанные для некоторых уровней константы приведены на рис. 3. Видно, что наиболее эффективно в газоразрядной плазме возбуждаются уровни триплетной группы $5p^3 P$, константы возбуждения более высоко лежащих групп $6s^3 S$ и $5d^3 D$ имеют значения на несколько порядков ниже. Аналогичная картина наблюдается и для синглетных уровней $6s^1 S_0$, $5d^1 D_2$ и $5p^1 P_1$. Это свидетельствует о том, что ожидать появления лазерной генерации на переходах между указанными уровнями в квазистационарном режиме протекания тока не следует. Возможно, что лазерная генерация может быть получена на триплетных переходах в рекомбинационном режиме [6,7].

Для расчета энергетических параметров разряда в плотной HeCd смеси необходимы значения коэффициентов переноса электронов. На рис. 4 приведены зависимости дрейфовой скорости v , коэффициента диффузии D и подвижности μ от параметра E/N . Дрейфовая скорость определялась как $v = \mu E$, коэффициент диффузии — по формуле

$$D = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_0^{\infty} d\varepsilon \left[\frac{\varepsilon}{\langle N Q_m(\varepsilon) \rangle} \right] f_0(\varepsilon),$$

подвижность рассчитывалась из соотношения

$$\mu = -\frac{1}{3} \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_0^{\infty} d\varepsilon \left[\frac{\varepsilon}{\langle N Q_m(\varepsilon) \rangle} \right] \frac{df_0(\varepsilon)}{d\varepsilon},$$

где N — концентрация атомов в смеси.

Из рис. 4 видно, что коэффициенты переноса электронов слабо зависят от температуры смеси. Скорость дрейфа практически линейно изменяется с изменением параметра E/N и в расчетах может быть аппроксимирована линейной зависимостью. Из последних двух формул видно, что вид кривых D и μ определяется формулой функции распределения при соответствующих параметрах. При температуре смеси 325°C, начиная с $E/N = 1 \cdot 10^{-16}$ В · см², функция распределения практически не изменяется, соответственно не изменяются D и μ . При температуре 450°C форма функций распределения более разнообразна с изменением параметра E/N . Этим объясняется более плавное поведение кривых D и μ до выхода на горизонтальный участок.

В заключение авторы выражают признательность А.В.Пращуку и С.В.Белинскому за помощь в расчетах сечений возбуждения атомарных уровней кадмия электронным ударом.

Список литературы

- [1] *Справочник по лазерам* / Под ред. А.М.Прохорова. М.: Сов. радио. 1978. Т. 1. 195 с.
- [2] Макаров С.В., Новоселов Ю.Н., Осипов В.В. // *Квантовая электроника*. 1990. Т. 17. № 8. С. 974–978.
- [3] Гарусов К.А., Новоселов Ю.Н., Сурков Ю.С. // *ЖТФ*. 1991. Т. 61. Вып. 12. С. 138–142.
- [4] *Физические величины. Справочник* / Под ред. И.С.Григорьевой, Е.З. Мелехова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
- [5] Новоселов Ю.Н., Сурков Ю.С. // *Опт. и спектр.* 1992. Т. 72. Вып. 2. С. 318–322.
- [6] Гарусов К.А., Новоселов Ю.Н., Сурков Ю.С. // *Опт. и спектр.* 1992. Т. 73. Вып. 5. С. 20–23.
- [7] Бугаев С.П., Горюнов Ф.Г., Нагорный Д.Ю. и др. // *Опт. и спектр.* 1988. Т. 65. Вып. 3. С. 744–747.