

соответствует описанию процесса излучения в классической электродинамике без учета радиационного трения.

Переходы с возбуждением «внутренних степеней свободы» в нерелятивистском случае вносят малый вклад в интенсивность излучения (основной вклад дают члены с $n=0$), так как члены ряда по n быстро убывают; отношение двух последовательных членов ряда порядка $(s\beta \cdot l_0 / \lambda_{\text{изл}})^2 n^{-3}$.

Таким образом, в этом методе описания квантового осциллятора удается в рамках самосогласованной квантовомеханической задачи отделить влияние классического поля излучения от квантового описания состояния частицы.

Авторы признательны проф. И. М. Тернову, доц. В. Д. Кривченкову и В. Р. Халилову за полезные замечания и обсуждения задачи, а также Р. А. Рзаеву, предложившему рассмотреть задачу о квантовых флуктуациях в отклоняющих магнитных системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, 1974, с. 97. [2] Kodai Husimi. Progr. Theor. Phys., 1953, 9, N 4, p. 381. [3] Соколов А. А., Тернов И. М. Релятивистский электрон. М.: Наука, 1974, с. 90.

Поступила в редакцию
20.05.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1982, Т. 23, № 2.

УДК 533.9.082.5

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ИОНОВ СТРОНЦИЯ И БАРИЯ В РАЗРЯДЕ В ОХЛАЖДАЕМОМ ПОЛОМ КАТОДЕ

Л. М. Волкова, А. М. Девятов, В. Х. Фазлаев
(кафедра электроники)

Для понимания физики процессов, которые происходят в газоразрядных приборах, работающих с парами щелочноземельных металлов (например, лазеры на ионных линиях магния, стронция, кальция и бария [1, 2]), необходимо знать механизм образования их ионов.

Изучение механизма образования ионов Sr^+ и Ba^+ проводилось в разряде с аргоновым ($p=10-66$ Па) и гелиевым ($p=53,5-214$ Па) наполнениями в охлаждаемом проточной водой полом катода ($\varnothing = 0,015$ м, $l=0,1$ м), изготовленном из стронция или бария особой чистоты. Разрядный ток в гелиевом разряде изменялся от 50 до 400 мА, а в аргоновом — от 50 до 200 мА. Диапазоны разрядных токов и давлений газов-наполнителей определялись возможностью определения необходимых параметров разряда.

Нами были измерены: концентрация N_e , средняя энергия $\bar{\epsilon}$ и функция распределения электронов по энергиям $f(\epsilon)$ методом зондов Ленгмюра и методом второй производной тока на зонд с последующим применением формулы Дрювестейна, концентрация атомов $N_{M(0)}$ и ионов N_{M+} бария и стронция в основном и возбужденных состояниях — по абсолютным интенсивностям и коэффициентам поглощения соответствующих спектральных линий атомов и ионов металлов, концентрация атомов N_B ($B=\text{He}, \text{Ar}$) гелия и аргона на резонансных и метастабильных уровнях — по измерению реабсорбции спектральных линий, оканчивающихся на этих уровнях.

В разряде в полом катоде скорость образования ионов металлов определяется скоростями прямой α_{oi} и ступенчатой α_{mi} ионизаций электронным ударом, скоростью ионизации, вызванной ударами второго рода при столкновении возбужденных атомов инертных газов с атомами металлов в основном и возбужденных состояниях α_{BM} , и скоростью фотоионизации из основного и возбужденных состояний атомов металлов фотонами резонансных линий гелия и аргона α_{ϕ} .

Для примера приводим величины скоростей перечисленных реакций для одного из условий эксперимента (катод из стронция, $i_p = 400$ мА, $p_{He} = 85$ Па), вычисленные нами при использовании измеренных на опыте параметров разряда ($f(\epsilon)$, N_e , $N_{M(0)}$, $N_{M(m)}$, $N_{B(M)}$ и т. д.):

$$\alpha_{oi} = 1,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}; \quad \alpha_{mi} = 8,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\alpha_{BM} = 9,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}; \quad \alpha_{\phi} = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Для оценки скоростей процессов, приводящих к исчезновению ионов из полости полого катода, нами были определены: вероятности ухода ионов из-за диффузии к стенкам и через торцы полого катода ($6,2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$) [3], рекомбинации в объеме ($3,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$) [4] и конверсии атомных ионов в молекулярные (10^2 с^{-1}) [5].

Проведенный анализ позволяет написать уравнение баланса образования ионов металлов в разряде в полом катоде в виде

$$\alpha_{oi} + \alpha_{mi} = N_{M^+} / \tau_{\text{диф}} \quad (1)$$

Скорость ионизации электронным ударом из основного состояния определялась по формуле

$$\alpha_{oi} = \sqrt{\frac{2e}{300m}} N_{M(0)} N_e \int_{\epsilon_{oi}}^{\infty} Q_{oi}(\epsilon) \frac{\epsilon i''(\epsilon) d\epsilon}{\int_0^{\infty} i''(\epsilon) \sqrt{\epsilon} d\epsilon}, \quad (2)$$

где $Q_{oi}(\epsilon)$ — эффективное сечение прямой ионизации [6], ϵ_{oi} — пороговое значение энергии ионизации, $i''(\epsilon)$ — вторая производная электронного тока на зонд.

Скорость ионизации электронным ударом из возбужденных (резонансных и метастабильных) состояний определялась по формуле, аналогичной (2), с заменой $N_{M(0)}$ на концентрацию атомов в возбужденном состоянии $N_{M(m)}$, $Q_{oi}(\epsilon)$ на сечение ступенчатой ионизации $Q_{mi}(\epsilon)$ [8] и ϵ_{oi} на ϵ_{mi} .

Из уравнения (1) определялись концентрации ионов металлов для исследуемых условий разряда. Кроме того, величины этих концентраций измерялись по поглощению резонансных линий ионов Ba^+ ($\lambda = 455,4$ нм) и Sr^+ ($\lambda = 407,8$ нм).

Полученные в работе величины концентраций ионов для стронциевого катода приведены в табл. 1 и 2, для бариевого — в табл. 3 и 4. В первых столбцах таблиц даны величины давления газов-наполнителей (гелия или аргона), во вторых — разрядные токи. В столбцах третьих и четвертых — концентрация электронов N_e и атомов металла в основном состоянии $N_{M(0)}$. В пятых столбцах — концентрации ионов, полученные из решения уравнения баланса при учете только прямой ионизации, в шестых — при учете только ступенчатой ионизации. В седьмых столбцах — концентрации ионов, полученные из

Таблица 1

He + Sr

p, Па	i _p , mA	N, 10 ¹⁰ см ⁻³		N _{M+} , 10 ⁸ см ⁻³			
		N _e	N _{M(0)}	расчет (учет только прямой ионизации)	расчет (учет только ступенчатой ионизации)	расчет	измерения
1	2	3	4	5	6	7	8
87	50	6	11	3	3	6	10
	100	10	18	11	4	15	18
	200	18	74	72	20	92	76
	300	31	135	180	60	240	160
	400	39	190	296	139	435	420
133	50	8	2	1	1	2	3
	100	14	4	4	7	11	15
	200	25	10	21	20	41	50
	300	50	20	51	117	168	147
	400	70	28	110	280	392	422
214	100	16	1	2	3	4	11
	200	29	3	7	17	24	27
	300	60	6	12	37	49	62
	400	100	8	25	72	97	85

Таблица 2

Ar + Sr

p, Па	i _p , mA	N, 10 ¹⁰ см ⁻³		N _{M+} , 10 ⁸ см ⁻³			
		3	4	5	6	7	8
1	2	3	4	5	6	7	8
10	50	28	17	8	3	11	17
	100	38	114	62	30	92	120
	200	68	340	204	140	344	363
20	50	26	19	16	15	31	32
	100	43	60	75	83	158	200
	200	76	220	446	311	757	820
66	50	24	3	10	12	22	25
	100	38	7	24	22	46	62
	200	95	25	160	280	440	525

решения уравнения (1), в восьмых — те же величины, определенные из измеренных коэффициентов поглощения резонансных линий ионов Sr⁺ (λ=407,8 нм) и Ba⁺ (λ=455,4 нм). Погрешность измерений ~40%.

Из таблиц видно, что измеренные и рассчитанные концентрации ионов Sr⁺ и Ba⁺ имеют близкие значения в широком диапазоне изменения разрядных токов и давлений инертных газов, что говорит о том, что механизм образования ионов металлов в наших условиях может быть описан уравнением (1).

Таблица 3

He + Ba

p , Па	i , мА	N , 10^{10} см $^{-3}$		N_{M^+} , 10^8 см $^{-3}$			
1	2	3	4	5	6	7	8
53,5	50	3	4	1	—	1	—
	100	6	10	4	1	5	5
	200	11	21	19	3	22	29
	300	22	33	28	6	34	38
	400	31	47	54	14	68	53
87	50	3	2	1	—	1	—
	100	10	5	8	2	10	8
	200	21	11	17	5	22	34
	300	31	19	35	10	45	47
	400	39	25	63	23	86	62
133	100	19	1	2	—	2	6
	200	33	2	8	—	8	25
	300	50	4	27	—	27	37
	400	59	5	32	—	32	48

Таблица 4

Ar + Ba

p , Па	i , мА	N , 10^{10} см $^{-3}$		N_{M^+} , 10^8 см $^{-3}$			
1	2	3	4	5	6	7	8
10	50	22	10	5	3	7	8
	100	37	50	46	14	60	64
	200	68	145	131	37	168	196
20	50	22	13	5	5	10	12
	100	47	45	36	32	68	81
	200	72	108	104	60	164	180

В разрядах при давлениях 53,5 и 87 Па гелия и 10 Па аргона около 30% концентрации ионов стронция и бария образуется ступенчато. С увеличением давления газов роль ступенчатой ионизации из возбужденных состояний (резонансных и метастабильных) растет. При давлениях 133 Па гелия и 20 Па аргона ионы металлов образуются примерно одинаково за счет прямой и ступенчатой ионизаций. Концентрация атомов бария на резонансном и метастабильных уровнях при давлении гелия 133 Па измерить не удалось из-за слабого поглощения соответствующих спектральных линий в разряде. При дальнейшем увеличении давления газов-наполнителей (до 214 Па гелия и 66 Па аргона) ионы образовывались преимущественно за счет ступенчатой ионизации, вклад прямой ионизации составляет только 30%.

Обращает на себя внимание тот факт, что в исследуемом разряде степень ионизации атомов металла на три порядка величины превышает степень ионизации атомов инертных газов. Например, в строн-

циевом полом катоде при наибольших исследуемых токах степень ионизации стронция составляет 10^{-1} , в то время как степень ионизации гелия — 10^{-4} .

Такой результат можно объяснить тем, что в исследуемых условиях средняя энергия электронов близка к энергиям ионизации атомов металлов. Так, средняя энергия $\bar{\epsilon}$ в гелиевом разряде была порядка 4—6 эВ, а в аргоновом $\bar{\epsilon} = 1—1,5$ эВ; как показали исследование скоростей образования ионов, основной вклад в них вносят прямая и ступенчатая ионизации электронами.

Кроме того, сечения прямой ионизации Sr и Ba [6] в 4 раза больше, чем у аргона [7], и в 30 раз больше сечения ионизации гелия [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Латуш Е. Л., Сэм М. Ф. В кн.: Квантовая электроника, № 3 (15). М.: Сов. радио, 1973, с. 66. [2] Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г. Квантовая электроника, 1973, №4 (16), с. 123. [3] Мак-Даниель И., Мэзон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах. М.: Мир, 1976, с. 36. [4] Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966, с. 342. [5] Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974, с. 230. [6] Вайнштейн Л. А., Очкур В. И., Раховский В. И., Степанов А. М. ЖЭТФ, 1971, 61, № 2, с. 510. [7] Rapp D., Englander-Golden P. J. Chem. Phys., 1965, 43, N 5, p. 1464. [8] Gguzinski M. Phys. Rev. 1965, 138A, N 2, p. 336.

Поступила в редакцию
22.04.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1982, Т. 23, № 2

УДК 539.2

РЕШЕНИЕ ЦЕПОЧКИ УРАВНЕНИЙ БОГОЛЮБОВА ДЛЯ КРИСТАЛЛА

И. П. Базаров, П. Н. Николаев

(кафедра квантовой статистики и теории поля)

Полученная в монографии Н. Н. Боголюбова [1] цепочка уравнений для равновесных функций распределения решена там для обычного газа с короткодействующими силами взаимодействия между атомами и для системы частиц с дальнодействующими (кулоновскими) силами взаимодействия путем разложения функций распределения по степеням соответствующего малого параметра. В настоящей работе мы найдем решение цепочки уравнений Боголюбова для кристалла разложением функций распределения по степеням установленного в работе [2] малого вплоть до температур плавления «кристаллического» параметра — отношению объема локализации атома к объему элементарной ячейки или связанного с этой величиной отношения куба среднеквадратичного смещения к объему элементарной ячейки.

Будем исходить из цепочки уравнений Боголюбова для кристалла, записанной в форме [2]:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial q_1^\alpha} + \frac{1}{\Theta} \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial q_1^\alpha} \rho_s + \frac{1}{\Theta} \sum_{i \neq 1, s} \int_{V_i} \frac{\partial \Phi(|q_1 - q_i|)}{\partial q_1^\alpha} [\rho_{s+1}(q_1, \dots, q_i) - \rho_s(q_1, \dots, q_s) \rho_1(q_i)] dq_i = 0, \quad (1)$$