

концентрации двуокиси кремния температурный коэффициент сопротивления, будучи положительным для слоев нитрида титана, уменьшается и при определенном соотношении концентраций TiN и SiO<sub>2</sub> (1:1) и толщине слоя (~0.15 мкм) меняет свой знак на отрицательный.

Слой устойчивы на воздухе до 250° С. Более высокие температуры приводят к окислению нитрида титана и увеличению электросопротивления слоя. В усло-

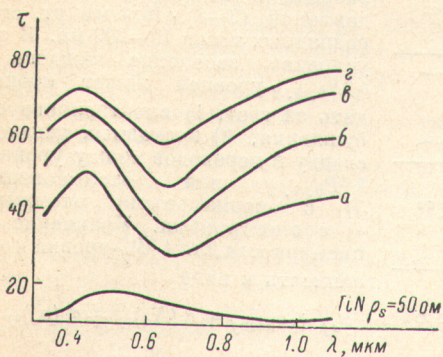


Рис. 2. Светопропускание покрытий состава TiN—SiO<sub>2</sub> в зависимости от содержания SiO<sub>2</sub> (мол. % SiO<sub>2</sub>): 52,  $\rho_s=2000$  ом (а), 70,  $\rho_s=2 \cdot 10^8$  ом (б), 77,  $\rho_s=1 \cdot 10^{11}$  ом (в); 82,  $\rho_s > 10^{11}$  ом (г).

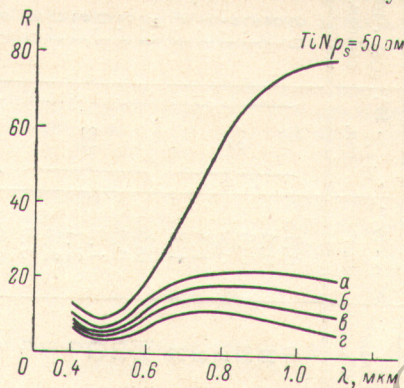


Рис. 3. Отражение покрытий состава TiN—SiO<sub>2</sub> в зависимости от содержания SiO<sub>2</sub> (см. обозначения рис. 2).

виях вакуума и восстановительной среды покрытия состава нитрид титана—двуокись кремния устойчивы до 800° С. Длительное пребывание в воде и влажной атмосфере не меняет свойств покрытия. Слои обладают высокой механической прочностью. Продолжительное пропускание как постоянного, так и переменного тока не изменяет электрооптических свойств слоев.

Слои из микрокомпозиции нитрид титана—двуокись кремния могут найти применение для изготовления электропроводящих покрытий, прозрачных электродов, а также различных радиотехнических элементов.

#### Литература

- [1] Б. С. Гальперин. Непроволочные резисторы. Изд. «Энергия», М., 1968.
- [2] Б. П. Крыжановский, Л. А. Черезова. Авторское свидетельство № 255394.
- [3] И. В. Гребенщиков. Просветление оптики, 1946 г.
- [4] М. Д. Лютая. Получение и физико-химические свойства нитридов, Киев, 1968.

Поступило в Редакцию 6 мая 1970 г.

УДК 539.184

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ УРОВНЕЙ 4<sup>3</sup>P<sub>0,1,2</sub> АТОМА ЦИНКА

Н. П. Пенкин и Т. П. Редько

Определение сечений возбуждения электронным ударом метастабильных состояний атомов с помощью электронных пучков часто затруднительно из-за сложности детектирования метастабильных атомов. Этой трудности можно избежать, используя низкотемпературную плазму, в которой концентрации метастабильных атомов достигают большой величины и могут быть измерены оптическими методами с большой степенью точности. Для нахождения сечения возбуждения в этом случае необходимо написать уравнение баланса для исследуемого состояния, которое учитывало бы все процессы его возникновения и гибели. Для повышения точности определения сечений необходимо выбрать такие условия, когда возбуждение электронным ударом преобладало бы над всеми другими процессами заселения.

$N_0 \cdot 10^{-14}$ , см <sup>-3</sup>	$i$ , ма	$N_e \cdot 10^{-9}$ , см <sup>-3</sup>	$T_e \cdot 10^{-3}$ , °К	$4^3P_2$				$4^3P_1$				$4^3P_0$			
				$N_{4^3P_2} \cdot 10^{-11}$ , см <sup>-3</sup>	$\tau_{эфф.} \cdot 10^6$ , сек.	$\langle Qv \rangle \cdot 10^6$ , см <sup>2</sup> /сек.	$Q(V_{макс}) \times 10^{17}$ , см <sup>2</sup>	$N_{4^3P_1} \cdot 10^{-11}$ , см <sup>-3</sup>	$\tau_{эфф.} \cdot 10^6$ , сек.	$\langle Qv \rangle \cdot 10^6$ , см <sup>2</sup> /сек.	$Q(V_{макс}) \times 10^{17}$ , см <sup>2</sup>	$N_{4^3P_0} \cdot 10^{-11}$ , см <sup>-3</sup>	$\tau_{эфф.} \cdot 10^6$ , сек.	$\langle Qv \rangle \cdot 10^6$ , см <sup>2</sup> /сек.	$Q(V_{макс}) \times 10^{17}$ , см <sup>2</sup>
3.4	20	1.2	31	1.6	75	4.0	18	28	2.0	9	0.15	29	0.8	4	
	40	1.9	28	3.0		2.4	6								
	60	2.6	26	4.0		2.6	7								
	100	4.1	24	4.7		2.7	8								
	150	6.0	22	5.5		2.2	8								
5.2	20	1.3	31	2.6	90	3.2	15	32	2.3	10	1.4	32	1.7	8	
	40	2.4	28	2.5		12	1.4		7						
	60	3.5	25	3.0		14	1.4		6						
	100	5.8	24	3.0		14	1.2		6						
	150	8.6	23	11.0		13	1.0		5						
8.0	20	1.6	31	4.8	95	2.6	12	35	1.9	9	3.0	35	1.2	4	
	40	3.2	28	8.6		11	1.0		4						
	60	4.7	22	12.4		11	0.8		4						
							1.7		4						
							1.6		4						

Настоящая работа посвящена определению эффективных сечений возбуждения электронных ударом уровней  $4^3P_{0,1,2}$  ZnI. Для создания атомов в  $4^3P_{0,1,2}$ -состояниях ионизировался положительный столб разряда в парax динка в области давлений (3-8) · 10<sup>-2</sup> мм рт. ст. и разрядных токов 10-200 ма. В этих условиях заселение каждого из  $4^3P_{0,1,2}$ -уровней может происходить за счет: 1) электронного возбуждения, 2) каскадных переходов сверху и переходов между уровнями  $4^3P_{0,1,2}$  при столкновениях; 3) нормальными атомами и 4) с электронами. Уравнение стационарности для  $4^3P_j$ -уровня можно записать в виде

$$n_{e_j} + a_{каскj} + a(N_0)n_j + a(n_e)n_j = \frac{N_j \tau_j}{\tau_{эфф. j}}, \quad (1)$$

Где члены в левой части равенства учитывают последовательно указанные выше процессы заселения уровня  $4^3P_j$ , а член справа определяет все возможные процессы разрушения этого уровня.

Чтобы получить из соотношения (1) величину эффективного сечения возбуждения электронным ударом, нужно знать концентрации атомов в нормальном ( $N_0$ ) и возбужденных  $4^3P_{0,1,2}$ -состояниях ( $N_{4^3P_j}$ ,  $N_{4^3P_1}$ ,  $N_{4^3P_2}$ ), концентрацию и температуру электронов ( $n_e$ ,  $T_e$ ) и эффективные времена жизни ( $\tau_{эфф. j}$ ) ионизуемых уровней.

Концентрации нормальных атомов и атомов, находящихся в состояниях  $4^3P_{0,1,2}$ , определялись методом крутков. Рожественского. Для этого измерялись величины  $N_f$  по круткам у интеркомбинационной резонансной линии 3076 Å ( $4^3P_1 - 4^1S_0$ ) и у линии видимого триплета цинка 4810, 4722, 4680 Å ( $5^3S_1 - 4^3P_{0,1,2}$ ). При определении заселенностей уровней с помощью этих величин использовались значения чисел  $f$ , полученные усреднением результатов работ [1-3].

Известно, что при давлении паров металлов  $\leq 10^{-1}$  мм рт. ст. в положительном столбе разряда электроны обладают маквелловским распределением по скоростям. Концентрация электронов и электронной температуры измеряется с помощью впадинных по оси разрядной трубки пингвинских зондов. Электронные части вольтамперных характеристик обрабатывались по методу Ленгмюра, а ионные по способу, предложенному в работе [4]. Концентрация электронов, полученные этими двумя способами, удовлетворительно совпали между собой (с точностью до 25%/о).

В работе [2] исследовалось послесвечение положительного столба разряда в парах цинка в той же области давлений и разрядных токов, что и в настоящей работе. Были выяснены механизмы разрушения  $4^3P_{0,1,2}$ -состояний и измерены их эффективные времена жизни. Было показано, что при концентрациях электронов  $\leq 10^{10} \text{ см}^{-3}$  роль электронного перемешивания  $4^3P_{0,1,2}$ -уровней пренебрежимо мала. При этом условии в расчетах стационарной плазмы можно использовать эффективные времена жизни  $4^3P_{0,1,2}$ -состояний, полученные в послесвечении и учитывающие все механизмы их гибели.

Перераспределение заселенности  $4^3P_{0,1,2}$ -уровней за счет переходов между ними при столкновениях с нормальными атомами вычислялось с помощью сечений этих процессов, полученных в работе [2]. В зависимости от условий эксперимента этот член в уравнении стационарности составлял от 5 до 30% от общего числа заселений этих уровней.

Член  $\alpha_{\text{каскад}}$ , учитывающий заселение уровней за счет каскадных переходов, определялся экспериментально. Были измерены интенсивности линий, оканчивающихся на  $4^3P_{0,1,2}$ -уровнях. Оказалось, что основной вклад вносят линии, принадлежащие двум переходам:  $5^3S_1-4^3P_{0,1,2}$  и  $4^3D_{1,2,3}-4^3P_{0,1,2}$ . Доля каскадного заселения  $4^3P_{0,1,2}$ -состояний в выбранных условиях эксперимента не превышала 20% от общего числа заселений.

Используя всю совокупность полученных результатов, учитывая каскадные переходы и атомное перемешивание  $4^3P_{0,1,2}$ -уровней, из уравнения (1) можно

получить для каждого из этих уровней величину  $\langle Qv \rangle = \int_{V_a}^{\infty} Q(V) \sqrt{VF(V)} dV$ , где

$Q(V)$  — сечение возбуждения уровня электронным ударом,  $F(V)$  — функция распределения электронов по энергиям,  $V_a$  — потенциал возбуждения уровня.

Функции возбуждения метастабильных уровней типа  $4^3P_0$  и  $4^3P_2$  неизвестны. Так как все три процесса  $\text{Zn}(4^1S_0) + e \rightarrow \text{Zn}(4^3P_{0,1,2}) + e$  соответствуют переходам с изменением мультиплетности при одинаковых значениях квантовых чисел  $n$  и  $L$  верхних уровней, можно, вероятно, для всех трех состояний воспользоваться функцией возбуждения  $4^3P_1$ -уровня цинка, полученной в работе [5], и вычислить значения сечений в максимуме функции возбуждения  $Q(V_{\text{макс.}})$ .

В таблице приведены результаты измерений  $N_0$ ,  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $N_{3P_{0,1,2}}$ , проведенных в настоящей работе, значения  $\tau_{\text{эфф.}}$  уровней  $4^3P_{0,1,2}$ , взятые из работы [2], а также величины  $\langle Qv \rangle$  и  $Q(V_{\text{макс.}})$  для уровней  $4^3P_{0,1,2}$ .

Из данных таблицы получаются следующие средние значения для  $Q(V_{\text{макс.}})$ :  $Q_{3P_2}(V_{\text{макс.}}) = 1.5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ,  $Q_{3P_1}(V_{\text{макс.}}) = 1.0 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ,  $Q_{3P_0}(V_{\text{макс.}}) = 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ . Точность приведенных значений сечений можно оценить в 60—70%.

### Литература

- [1] F. W. Vugon, M. N. McDermott, R. Novick, B. W. Perry, E. B. Solomon. Phys. Rev., 134, A47, 1964; P. Soleillet. Compt. Rend., 204, 253, 1937.
- [2] Н. П. Пенкин, Т. П. Редько. Опт. и спектр., 30, 3, 1971.
- [3] П. Ф. Груздев. Опт. и спектр., 22, 169, 1967; J. Schuttevaer, J. A. Smit. Physica, 10, 502, 1943; А. А. Антена, В. А. Зилитис. Опт. и спектр., 26, 145, 1969.
- [4] Ю. М. Каган, В. И. Перель. ДАН СССР, 91, 1321, 1953; 95, 785, 1954; Вестн. ЛГУ, сер. физ., № 8, 129, 1955.
- [5] И. П. Запесоцкий. Докт. дисс., Ужгород, 1966.

Поступило в Редакцию 11 мая 1970 г.

УДК 535.37:553.824.

## ВОЗРАСТАНИЕ ВЫХОДА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ РУБИНА ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

З. Л. Моргенштерн и В. Б. Неуструев

В ряде работ было показано, что внешнее электрическое поле, приложенное параллельно тригональной оси рубина, приводит к расщеплению  $R$ - и  $B$ -линий поглощения и  $R$ -линий люминесценции [1, 2]. Мы исследовали влияние электрического поля на выход люминесценции. С этой целью измерялись зависимости интенсивности люминесценции в  $R$ -линиях при возбуждении в  $U$ - и  $Y$ -полосах ( $\lambda_{\text{возб.}} = 560$  и  $410 \text{ нм}$ ) и поглощения в этих полосах от величины внешнего приложенного электрического поля. Все опыты производились при температуре  $77^\circ \text{ К}$ , поле прикладывалось параллельно тригональной оси кристалла.