

ШИРОКОПОЛОСНОЕ МАЛОИНЕРЦИОННОЕ СВЕЧЕНИЕ ОКСИДНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ, ВОЗБУЖДАЕМОЕ МОЩНЫМИ ПУЧКАМИ ЭЛЕКТРОНОВ

В. И. Барышников, Л. И. Щепина, Т. А. Колесникова,
Е. Ф. Мартынович

Возбуждение щелочно-галогидных кристаллов электронными пучками сопровождается широкополосной люминесценцией с излучательным временем < 0.4 нс [1]. Нами обнаружено свечение в спектральной области 150—1200 нм и далее монокристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, MgO (рис. 1, 1—4), которое повторяет форму импульсов электронного пучка. К настоящему времени разработаны миниатюрные наносекундные ускорители электронов [2] и пикосекундные обстреливатели [3], с применением которых появляется возможность создания малогабаритных безынерционных широкополосных источников света на основе терморадационно-устойчивых монокристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

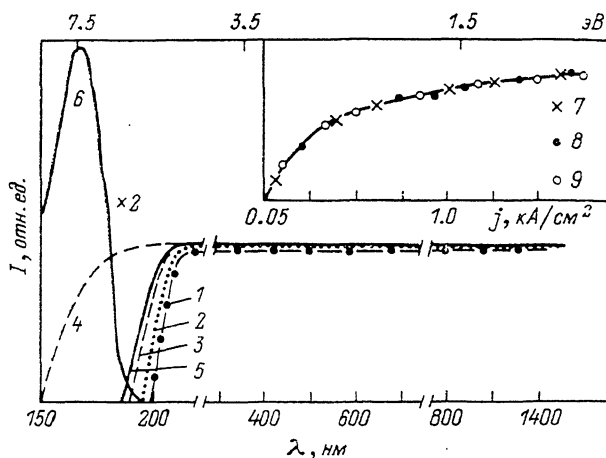


Рис. 1. Спектры катодолуминесценции (КЛ) оксидных монокристаллов (1—6) и зависимость интенсивности КЛ от величины плотности возбуждения (7—9).

1 — $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, 2 — MgO , 3 — $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($\tau < 1$ нс, 0.05 кА/см², 900 К), 4 — $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при 2.0 кА/см², 5 — при 0.05 кА/см² ($\tau < 1$ нс, 300 К), 6 — свечение АЛЭ ($\tau = 22$ нс, 78 К), 7 — ШКЛ в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 8 — КРЛ в BaF_2 , 9 — излучение с $\lambda_m = 390$ нм в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

В данной работе исследовались механизмы возбуждения широкополосной катодолуминесценции (ШКЛ) с $\tau < 1$ нс, возбуждаемой в оксидных монокристаллах (ОМ). Эксперименты проводились на образцах в виде полированных пластин толщиной 0.25 мм. Для возбуждения ШКЛ использовался ускоритель электронов с параметрами пучка: 0.03 — 0.35 МэВ, 0.05 — 2.0 кА/см², 1 нс, 0.1 — 10 Гц.

Как следует из рис. 1, 3, 4, положение коротковолновой границы спектра ШКЛ с $\tau < 1$ нс при 300 К в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ существенно зависит от плотности электронного облучения. При 78 К на фоне ШКЛ ($\tau < 1$ нс) появляется полоса с $h\nu = 7.5$ эВ ($\tau = 22$ нс; рис. 1, 6), которая обусловлена свечением автолокализованных экситонов (АЛЭ) [4]. Повышение температуры до 900 К приводит к полному тушению люминесценции АЛЭ, и спектр ШКЛ начинается от 6.5 эВ (190 нм), причем положение коротковолновой границы уже не зависит от плотности тока в пучке. Отсюда следует, что истинный спектр ШКЛ имеет коротковолновую границу 6.5 эВ.

Энергетический выход ШКЛ для ОМ равен $0.6 \cdot 10^{-3}$, т. е. близок к энергетическому выходу кросс-люминесценции (КРЛ) в BaF_2 (2.0×10^{-3} [5]). Кроме того, зависимость интенсивности ШКЛ упомянутых образцов и КРЛ BaF_2 от величины плотности возбуждения описывается одной кривой (рис. 1, 7—9). Излучательное время КРЛ $\text{BaF}_2 < 1$ нс и, так же как для ШКЛ ОМ, не зависит от температуры (78—970 К). В этом диапазоне температур не изменяется и выход ШКЛ исследуемых образцов и КРЛ BaF_2 . Известно, что КРЛ в BaF_2 обусловлена излучательными переходами между подзонами валентной зоны [5]. На основании малого времени излучения, высокой температурной устойчивости люминесценции и энергетических характеристик ШКЛ и КРЛ можно предположить, что ШКЛ в ОМ обусловлена излучательными переходами между подзонами валентной зоны, которая имеет структуру, приведенную в работе [6]. Вместе с тем, если КРЛ проявляется в спектре КЛ в виде характерных полос, то ШКЛ ОМ отличается широким бесструктурным спектром.

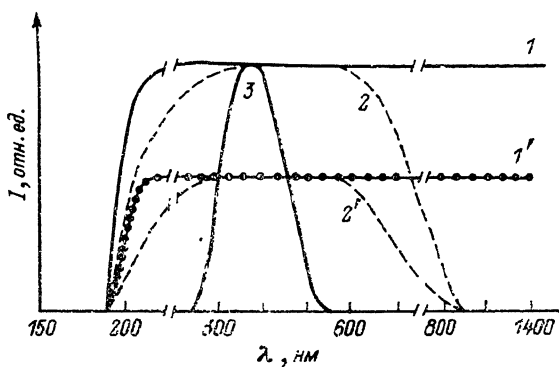


Рис. 2. Спектры КЛ ($\tau < 1$ нс) кристалла $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при различных значениях энергии электронов и плотности тока импульса возбуждения.

2.0 (1, 2) и 0.01 кА/см² (1', 2'); 60 ± 10 (2) и 12.5 кэВ (3). Температура измерения 900 К.

Пучок, используемый для возбуждения ШКЛ, имеет энергию электронов на 20 % ниже порога образования стабильных междоузельных ионов кислорода O^{2-} и анионных вакансий F^{2+} [7]. Это означает, что в данном случае ударным путем создаются короткоживущие $\text{F}^{2+}\text{O}^{2-}$ пары [8]. В результате ион O^{2-} оказывается в локальном кристаллическом поле возмущения. Расчет показал, что напряженность этого поля E достигает величины 0.8—1.2 МВ/см. Такая степень возмущения может привести к расщеплению подзон верхней валентной зоны, тогда излучательные переходы между перекрытыми подзонами верхней валентной зоны должны образовывать непрерывный спектр ШКЛ. И наоборот, при уменьшении энергии электронов в пучке расстояние ударного смещения сокращается. Вследствие этого E снижается, и в результате зазор между подзонами верхней валентной зоны восстанавливается, а бесструктурный спектр ШКЛ должен перейти в полосу люминесценции, ширина которой совпадает с шириной верхней валентной подзоны ϵ .

Для проверки данного предположения были измерены спектры КЛ в образцах $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при различных значениях энергии электронов в пучке. Контроль величины плотности тока осуществлялся по интенсивности КЛ F^+ -центров калиброванного образца $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Снижение энергии электронов в пучке возбуждения до 60 ± 10 кэВ сопровождается появлением границы ШКЛ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в длинноволновой области спектра 800—820 нм (рис. 2, 2). Дальнейшее уменьшение энергии до 12.5 кэВ приводит к образованию полосы КЛ с максимумом 390 ± 10 нм (рис. 2, 3). Интенсивность КЛ 390 нм ($\tau < 1$ нс при 78, 300, 970 К) от температуры не зависит; наблюдается нелинейная зависимость от плотности тока такая же, как для ШКЛ и КРЛ кристаллов BaF_2 (рис. 1, 7—9). Из этих эксперимен-

Ширина верхней валентной подзоны ε , образованной в основном $2P$ состояниями кислорода и $3d$ атомными орбиталами алюминия в кристалле $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

Эксперимент ХЭС [°]	Теоретический расчет ε , эВ		
	кластерный метод [°]	решение секулярного уравнения	
		$E = 0.1$ МВ/см	$E = 1.5$ МВ/см
3.1	3.1	3.35	4.68

Примечание. Увеличение E в 15 раз приводит к уширению подзоны на 40 %, т. е. имеет место расщепление — перекрытие подзон.

гов следует, что плотность тока импульса возбуждения не оказывает влияния на форму спектров КЛ и ШКЛ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 2, 1, 2, 1', 2').

Таким образом, снижение энергии электронов возбуждающего импульса приводит к трансформации ШКЛ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в полосу КЛ с $\lambda_m = 390$ нм. Это согласуется с предложенной нами моделью возбуждения ШКЛ ОМ.

Выводы, сделанные на основании экспериментальных данных, были подтверждены теоретическими расчетами по изменению ширины верхней валентной подзоны кристалла $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, образованной в основном $2P$ состояниями иона O^{2-} в зависимости от напряженности поля возмущения. В качестве базисных функций выбраны волновые функции $2P$ состояний

O^{2-} : $\psi = \sum_{i=1}^9 u_i |p\rangle$, где p — нормированные и взаимно ортогональные базисные функции. Применяя уравнение Шредингера и метод ортогонализованных плоских волн, получаем систему уравнений

$$\sum_{i=1}^9 \langle p_i | H | p_j \rangle u_i - \varepsilon u_j = 0.$$

Собственные значения энергии ε находим решением секулярного уравнения $\det(H_{ij} - \varepsilon \delta_{ij}) = 0$. Результаты расчета приведены в таблице.

Список литературы

- [1] Вайсбурд Д. И., Семин Б. Н., Таванов Э. Г. и др. Высокоэнергетическая электроника твердого тела. Новосибирск, 1982.
- [2] Барышников В. И., Мартынович Е. Ф. Миниатюрный наносекундный мощный ускоритель электронов «Сэмитрон-1» для накачки квантовых систем. Информационный листок ВДНХ СССР. М., 1984.
- [3] Ковальчук Б. М., Месяц Г. А., Шпак В. Г. // Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. Новосибирск, 1976.
- [4] Кузнецов А. И., Куусманн И. Л., Мусатов М. И. и др. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. № 2. С. 60—64.
- [5] Головин А. В., Захаров Н. Г., Родный А. П. // Опт. и спектр. 1988. Т. 65. № 1. С. 176—180.
- [6] Balzarotti A., Bianconi A. // Phys. St. Sol. (b). 1976. V. 76. N 3. P. 689—694.
- [7] Pells G. P., Phillips D. C. // J. Nucl. Materials. 1979. V. 80. P. 207—214.
- [8] Барышников В. И., Мартынович Е. Ф., Колесникова Т. А. и др. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 5. С. 1505—1507.
- [9] Tossell J. A. // J. Phys. Chem. Sol. 1975. V. 36. N 11. P. 1273—1278.

Иркутский государственный университет
НИИ прикладной физики

Поступило в Редакцию
7 апреля 1989 г.
В окончательной редакции
25 декабря 1989 г.