

**ФИЗИКА ИЛИМДЕРИ**  
**ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**PHYSICAL SCIENCES**

*Акбеков Т.М., Оскомбаева З.А., Мейманкулова Н.Т.*

**ТЕТРАГОНАЛДЫК КОРГОШУН МОНООКСИДИНИН КАТМАРЛУУ КРИСТАЛЛЫНЫН  
ЭРКИН ЭКСИТОНУНУН ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯСЫ**

*Акбеков Т.М., Оскомбаева З.А., Мейманкулова Н.Т.*

**ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СВОБОДНОГО ЭКСИТОНА СЛОИСТОГО КРИСТАЛЛА  
ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ МОНООКСИДИ СВИНЦА**

*T. Akbekov, Z. Oskombaeva, N. Meimankulova*

**LUMINESCENCE OF A FREE EXCITON OF A LAYERED CRYSTAL  
OF TETRAGONAL LEAD MONOXIDE**

УДК: 621.315.592

Бул макалада Санкт-Петербург мамлекеттик университетинин лабораториясында гидротермикалык синтез ыкмасы менен өстүрүлгөн  $PbO_m$  кристаллдары боюнча изилдөөлөр жүргүзүлгөн.  $PbO_T$  люминесценцияны изилдөө изотроптук  $E \perp C$ ,  $K \parallel C$  геометрияда да жана  $E \perp C$ ,  $K \perp C$ ,  $E \parallel C$ ,  $K \parallel C$  геометрияда да жүргүзүлгөн. Спектрдеги дублет өзгөчөлүгүнүн көрүнүшүнүн мүмкүн болгон себебин түшүндүрүү үчүн ар кандай моделдер талдоого алынган. Негизги экситондук абалды да, фонондук өтүү менен өз ара аракеттенүүчүнү да бөлүү мүмкүнчүлүгү эске алынган. Эки өлчөмдүү жана үч өлчөмдүү экситондук тилкелердин моделинде ар кандай температураларда люминесценция спектрлери эсептелген. Бир тектүү эмес кеңейүү эске алынган, анын мааниси эсептелген контурду эксперименталдык менен салыштыруудан тандалып алынган. Эң жакшы макулдашуу үч өлчөмдүү экситон тилкелеринин моделинде эки фонон менен өз ара аракеттенген бир экситондук абал үчүн алынган. Изилдөөлөрдүн натыйжалары боюнча абсорбциядагы тиешелүү босоголордун дублеттүүлүгү жердин экситондук абалынын бөлүнүшү менен байланышкан.

**Негизги сөздөр:** гидротермалдык синтез, поляризация, эркин экситон, байланышкан экситон, экситон зонасы, экситон-фонон өткөөлү, дублет тилкелери, изотроптук геометрия, сиңүү, поляризация даражасы.

В работе проведено исследование кристаллов  $PbO_m$  выращенных в лаборатории Санкт-Петербургского государственного университета, методом гидротермального синтеза. Исследование люминесценции  $PbO_T$  проводилось как в изотропной геометрии  $E \perp C$ ,  $K \parallel C$ , так в геометрии  $E \perp C$ ,  $K \perp C$ ,  $E \parallel C$ ,  $K \parallel C$ . Для выяснение возможной причины проявления в спектре дублетной особенности были проанализировали различные модели. Учитывалась возможность расщепления как основного экситонного состояния, так взаимодействующего с переходом фонона. В модели двумерных и трехмерных экситонных зон были проведены расчеты спектров люминесценции при различных температурах. Учитывалось неоднородное уширение- $\gamma$ , величина которого выбиралась из сравнения расчетного контура с экспериментальным. Наилучшее согласие было получено в модели трехмерных экситонных зон для одиночного экситонного состояния, взаимодействующего двумя фононами при  $\gamma = 1 мэВ$ . По результатам исследований, дублетность соответствующих порогов в поглощении связана с расщеплением основного экситонного состояния.

**Ключевые слова:** гидротермальный синтез, поляризация, свободный экситон, связанный экситон, экситонная зона, экситон-фононный переход, дублетные полосы, изотропная геометрия, степень поляризации.

In this work, research was carried out on  $PbO_T$  crystals grown in the laboratory of St. Petersburg State University by the method of hydrothermal synthesis. The study of luminescence was carried out both in isotropic geometry  $E \perp C$ ,  $K \parallel C$ , and in geometry  $E \perp C$ ,  $K \perp C$ ,  $E \parallel C$ ,  $K \parallel C$ . To elucidate the possible cause of the manifestation of the doublet feature in the spectrum, various models were analyzed. The possibility of splitting both the ground exciton state and the one interacting with the phonon transition was taken into account. In the model of two-dimensional and three-dimensional exciton bands, the luminescence spectra were calculated at various temperatures. The inhomogeneous broadening was taken into account, the value of which was chosen from a comparison of the calculated contour with the experimental one. The best agreement was obtained in the model of three-dimensional exciton bands for a single exciton state interacting with two phonons at. According to the research results, the doublet nature of the corresponding thresholds in absorption is associated with the splitting of the ground exciton state.

**Key words:** hydrothermal synthesis, polarization, free exciton, bound exciton, exciton zone, exciton-phonon transition, doublet bands, isotropic geometry, degree of polarization.

В данной работе кристаллы  $PbO$  для проведения исследований, были выращены в лаборатории Санкт-Петербургского государственного университета по методике гидротермального синтеза, описанной в работах [1-2].

Исследование люминесценции  $PbO_T$  проводилось как в изотропной геометрии  $E \perp C$ ,  $K \parallel C$ , так в геометрии  $E \perp C$ ,  $K \perp C$ ,  $E \parallel C$ ,  $K \parallel C$ .

В изотропной геометрии не наблюдается необычная поляризация спектров, характерная для спектров пропускания [3]. При наблюдении от боковой грани кристалла, содержащей оптическую ось, люминесценция свободного экситона поляризована (рис. 1) ( $T = 77K$ ).

В поляризации  $E \perp C$  спектр формируется с участием колебаний  $\hbar\omega_1$  и  $\hbar\omega_2$ . При  $E \parallel C$  основной вклад дает фоновый  $\hbar\omega_4$  ( $\approx 17.7 мэВ$ ). Фононы  $\hbar\omega_2$  и  $\hbar\omega_1$  в значительной степени ослабленные (степень поляризации 10%) проявляется и в поляризации  $E \parallel C$ . Линии фоновых повторений ассиметричны с резким длинноволновым и пологим коротковолновым краем. При понижении температуры все особенности спектра смещаются в область меньших энергий, линии сужаются, становятся более симметричными. Наиболее структурные спектры наблюдались в изотропной  $E \perp C$ ,  $K \parallel C$ . Вследствие уменьшения полуширин полос удалось выделить три слабые узкие линии, расположенные при энергиях 1,9782, 1,9786 и 1,9809 эВ. На длинноволновом крыле линии люминесценции свободного экситона с участием фонона  $\hbar\omega_1$  наблюдается перегиб, смещенный относительно максимума на 1,7 мэВ (рис. 2). Эта величина совпадает с величиной расщепления линии люминесценции с участием этого же фонона в спектре ЭПК 1<sub>1</sub> [4]. Наличие перегиба, а также большая полуширина линии ( $\approx 4 мэВ$ ) по сравнению с полушириной остальных ( $2,2 мэВ$ ) свидетельствует о ее сложной структуре. Для выяснения возможной причины проявления в спектре такой особенности были проанализировали различные модели. Учитывалась возможность расщепления как основного экситонного состояния, так взаимодействующего с переходом фонона. В модели двумерных [5] и трехмерных экситонных зон были проведены расчеты спектров люминесценции при различных температурах. Учитывалось неоднородное уширение- $\gamma$ , величина которого выбиралась из сравнения расчетного контура с экспериментальным. Наилучшее согласие было получено в модели трехмерных экситонных [6] зон для одиночного экситонного состояния, взаимодействующего двумя фононами при  $\gamma = 1 мэВ$ . Величина расщепления  $1 мэВ$ . Предложенная модель хорошо описывает и температурное поведение линии. По расчетам сдвиг максимума в температурном интервале 8-15К должен отсутствовать, что и наблюдается на опыте. При  $T > 15K$  максимум полосы смещается с ростом температуры в коротковолновую область спектра быстрее, чем ступеньки экситонного поглощения. Это может быть связано с температурным заселением экситонной зоны. Для проверки этого предположения был проведен расчет энергий экситон-фононный переход при  $T = 15K$  и  $T = 38K$ . Их положения отмечены стрелками на рисунке 2. Оказалось, что энергический сдвиг совпадает с величиной сдвига экситонной зоны. Хорошее согласие с опытом, полученное в модели трехмерных [6] экситонных зон не исключает возможность описания спектров в модели сильно анизотропных состояний. К сожалению, мы не смогли провести соответствующие расчеты из-за отсутствия аналитических выражений для распределения плотности экситонных состояний [7].

При вычислении частот фононов возникли трудности, связанные с определением энергии образования свободного экситона. В коротковолновой области спектра люминесценции наблюдается две близко расположенные линии  $V_0$  и  $V_1$ . Если в качестве бесфононной выбрать самую коротковолновую линию, как это делалось при анализе спектров люминесценции ЭПК 1<sub>1</sub>, энергии фононов оказывается больше соответствующих энергий, определенных спектров ЭПК 1<sub>1</sub>. Хорошее согласие получается, если частоты отсчитывать от линии  $V_0$ . (табл. 1). Выбор этой линии в качестве бесфононной не противоречит результатам, полученных из спектров непрямого экситонного поглощения.

Таблица 1

Энергии и интерпретация линий в спектрах люминесценции кристаллов РвО при различных температурах

№ полоса	T=12K		T=77K		
	Интерпретация	E, эВ	Энергия фона	E, эВ	№ полоса
1	$\nu_1$	1,9812			
2	$h\nu_0$	1,9789			
3	$h\nu_0 - \hbar\omega_6$	1,9722	6,7	1,9632	3
4	$h\nu_0 - \hbar\omega_1^1$	1,9331	25,5	1,9288	4,5
5	$h\nu_0 - \hbar\omega_1^2$	1,9316	27,0		
6	$h\nu_0 - \hbar\omega_2$	1,9172	61,4	1,9066	6
7	$h\nu_0 - \hbar\omega_1 - \hbar\omega_r$	1,8969	57,2	1,8639	7
8	$h\nu_0 - \hbar\omega_2 - \hbar\omega_r$	1,8627	57,2		

Основной результат, полученных при анализе спектров люминесценции свободного и связанного [8] экситонов-отсутствие дублетной структуры всех линий фоновых повторений, за исключением переходов с участием фона  $\hbar\omega_1$ .

Из этого можно сделать вывод, что дублетность соответствующих порогов в поглощении связана с расщеплением основного экситонного состояния.

I. отн. ед

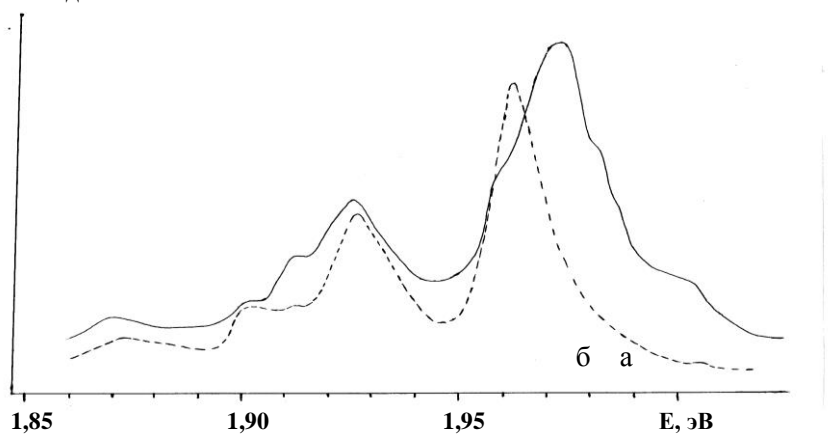
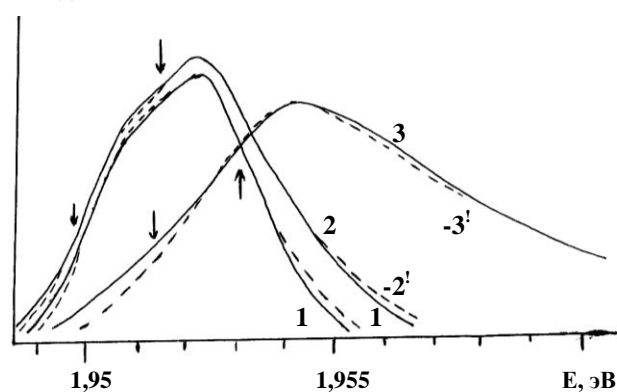


Рис. 1. Спектры люминесценции свободного экситонна при 77 К в поляризации:

а)  $E \perp C$ , б)  $E \parallel C$ .  $\lambda_{возб} = 441,6 \text{ нм}$ .

I. отн. ед



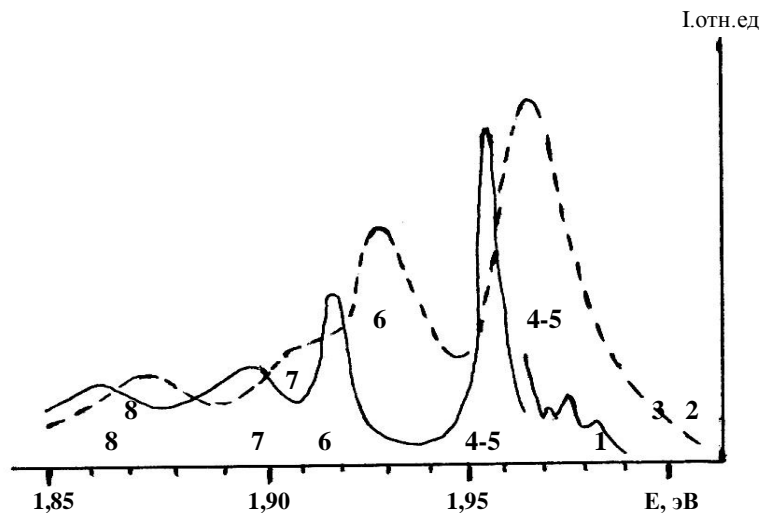


Рис. 2. Спектры люминесценции свободного экситона в поляризации при различных температурах. Сплошная кривая-12К, пунктирная-77К.

На вставке показан участок спектра люминесценции в области линии излучения с участием фонона. Сплошная кривая-экспериментальный спектр, пунктирная-расчетный. 1-8К, 2-15К и 3-38К вертикальные стрелки указывают положение энергий переходов с участием фононов.

#### Литература:

1. Кузнецов В.А., Лобачев А.И. Гидротермальный метод выращивания кристаллов. Кристаллография, 1972. - Т.17. - С.904.
2. Акбеков Т.М., Оскомбаева З.А., Кубатаалы кызы Гулзар. Коргошундун катмарлуу монокычкыл тетрагоналдык кристаллын өстүрүү жана анын өндүрүштө колдонулушу. Горный журнал. - Бишкек, 2021. - Т.2(2). - С. 30-33.
3. Извозчиков В.А., Тимофеева О.А. Фотопроводящие окислы свинца в электронике. - Л.1979. - С. 140-142.
4. Акбеков Т.М. Люминесценция слоистого кристалла тетрагональной моноокиси свинца. Вестник ИСИТО. - Б., 2011. - С. 35-37.
5. Акбеков Т.М., Осмоналиев К., Хайдаров К. Двумерная модель экситонных зон слоистого кристалла тетрагональной моноокиси свинца. Наука и новые технологии. - Бишкек, 2005. - №2. - С. 10-15.
6. Elliot R. Intensity of optical absorption by Excitons. Phys.Rev. - 1957. - V.108. - N.6. - P. 1384-1389.
7. Doran N.I., Harper P.G. Numerical behavior of transmissions and derivative traces due to direct electronic transitions near Van Hove singularities. Phys.st.sol. (b). 1971. - V.48. - N.1. - P. 223-230.
8. Акбеков Т.М., Гайсин В.А., Леденева Т.А., Турусбекова Э.А. Люминесценция связанного экситона РвО<sub>т</sub>. Вестник технологического университета Дастан, 1998. - С.203-205.
9. Усаров А.С. Люминесценция QUOTE 12GE2+П...С-"> - центров в кристаллах. I.KCl-GE. / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2013. № 1. С. 3-5.
10. Усаров А.С. Люминесценция QUOTE 12GE2+П...С-"> - центров в кристаллах. II. KBr-GE. / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2013. № 1. С. 9-10