

Люминесцентные свойства кристаллов трибората лития LiB_3O_5

© И.Н. Огородников, Е.А. Раджабов*, Л.И. Исаенко**, А.В. Кружалов

Уральский государственный технический университет,
620002 Екатеринбург, Россия

*Институт геохимии Сибирского отделения Российской академии наук,
664033 Иркутск, Россия

**Институт монокристаллов Сибирского отделения Российской академии наук,
630058 Новосибирск, Россия

E-mail: DGO@dpt.ustu.ru

(Поступила в Редакцию 4 июня 1998 г.)

Представлены результаты исследования люминесцентных свойств кристаллов трибората лития LiB_3O_5 (LBO). В результате изучения спектров возбуждения и фотолюминесценции номинально чистых ориентированных кристаллов LBO в широких спектральной (1.2 eV–10.5 eV) и температурной (8 K–500 K) областях в сочетании с оптической спектроскопией LBO в области длинноволнового края фундаментального поглощения установлено, что широкополосная люминесценция LBO в области 3.5–4.5 eV эффективно возбуждается фотонами с энергией выше 7.5 eV в рекомбинационных процессах и при облучении корпускулярным или рентгеновским излучениями. На основании комплекса экспериментальных данных сделан вывод о собственной природе люминесценции LBO и ее обусловленности излучательным распадом релаксированных электронных возбуждений.

Известно, что многие широкозонные диэлектрики характеризуются сильным электрон-фононным взаимодействием, обуславливающим значительную релаксацию решетки и создающим предпосылки для автолокализации электронных возбуждений (ЭВ). Различают два основных канала формирования автолокализованных экситонов (АЛЭ): через рекомбинационный процесс либо прямым возбуждением резонансного экситона с последующей его релаксацией. В кубических щелочно-галогенидных кристаллах оба механизма могут приводить к формированию одного и того же типа АЛЭ [1]. В кристаллах с пониженной симметрией (например, в BeO [2], Al_2O_3 , YAlO_3 , $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ [3]) наблюдается сосуществование двух типов АЛЭ, различающихся своими свойствами. Фундаментальные причины этого кроются в различном характере релаксации решетки для случая заряженных (рекомбинационный процесс) и электрически нейтральных ЭВ в кристаллах с низкой симметрией, когда автолокализация заряда на первой стадии формирования АЛЭ в рекомбинационном процессе существенно возмущает кулоновское поле кристалла, в отличие от процесса релаксации резонансного экситона. Сложная кристаллическая структура многих низкосимметричных диэлектриков предполагает существование большого числа различных путей релаксации решетки, что в ряде случаев ведет к стабилизации различных конечных состояний [4] и затрудняет установление природы релаксационных процессов в этих соединениях.

В последнее время появился заметный интерес к исследованию динамики электронных возбуждений в нелинейных кристаллах боратов некоторых щелочных металлов ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (ВВО), LiB_3O_5 (LBO), CsB_3O_5 (СВО) и $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), которые с практической точки зрения нашли широкое применение в современной нелинейной и интегральной оптике в качестве преобразующих и

волноводных оптических сред. В ряде кристаллов этой группы ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ [5], $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ [6]) обнаружена довольно интенсивная коротковолновая собственная люминесценция, приписанная излучательной аннигиляции автолокализованных электронных возбуждений или излучательному распаду релаксированных ЭВ на дефектах решетки. Люминесценция этих кристаллов имеет ряд общих черт: она эффективно возбуждается как фотонами вблизи длинноволнового края фундаментального поглощения (ДКФП), так и в рекомбинационных процессах. Кристаллы LBO до недавнего времени оставались совершенно неизученными с этой точки зрения, и восполнение этого пробела представляет значительный интерес для установления общих черт в динамике электронных возбуждений и люминесценции кристаллов данной группы и их взаимосвязи с таковыми для более изученных широкозонных диэлектриков.

Триборат лития LiB_3O_5 имеет комплексную орторомбическую ячейку, содержащую четыре формульные единицы. Пространственная группа $Pn2_1a$ с параметрами решетки $a = 8.46 \text{ \AA}$, $b = 5.13 \text{ \AA}$ и $c = 7.38 \text{ \AA}$. Два из трех неэквивалентных атомов бора имеют плоскую трехкоординатную структуру связей, схожую с B_2O_3 . Третий атом бора имеет тетраэдрическую четырехкоординированную структуру связей. Выделяют пять неэквивалентных атомов кислорода. Структура кристалла представляет собой боро-кислородный каркас с атомами лития, локализованными в открытых пустотах каркаса [7]. Полоса прозрачности LBO простирается от 159 до 3500 nm [8].

В [9] обнаружена УФ-люминесценция кристаллов LBO при возбуждении как рентгеновскими фотонами, так и электронным пучком с энергией $E_e = 0.15 \text{ MeV}$. Последующее изучение выявило особенности, в частности некоторую неэлементарность контура спектральной полосы люминесценции, участие основных точечных дефектов

в процессе рекомбинационного ее возбуждения и, в то же время, отсутствие явной связи с наличием в решетке LBO того или иного типа активаторов [10,11]. Это дало основание в [12] высказать предположение о собственном характере люминесценции LBO. Доказательство этого требует, однако, детального изучения спектров возбуждения и фотолюминесценции LBO, а также ДКФП.

Целью настоящей работы явилось исследование спектра возбуждения и фотолюминесценции номинально чистых кристаллов LiB_3O_5 в широких спектральной и температурной областях в сочетании с оптической спектроскопией LBO в области ДКФП.

1. Детали эксперимента

Кристаллы LiB_3O_5 были получены кристаллизацией с верхним положением затравки из раствор-расплава в системе $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{MoO}_3$. Исходные материалы квалификации ОСЧ загружались в платиновый тигель до 400 cm^3 , так что содержание LiB_3O_5 в системе составляло 30–35 wt%. После гомогенизации и выдержки при температурах 850–900°C расплав охлаждали до температуры насыщения и вводили на поверхность затравочный кристалл. Монокристаллы выращивали на затравку с ориентацией [010] при скорости охлаждения 0.1–0.2 K/h. Типичный вес выращенных кристаллов LBO составлял 70–120 g при цикле выращивания 15–20 дней.

В работе был использован набор из десяти номинально чистых кристаллов LBO высокого оптического качества, приготовленных в виде полированных плоскопараллельных пластинок $10 \times 10 \times 1.5\text{ mm}$ с плоскостью, перпендикулярной кристаллографическим осям X или Z. Для краткости эти образцы обозначены $\text{LBO} \perp \text{X}$ и $\text{LBO} \perp \text{Z}$ соответственно.

Люминесцентно-оптические измерения выполнены на экспериментальной установке, включающей в себя вакуумный монохроматор ВМР-2 со сферической решеткой 600 штрихов на мм; светосильный монохроматор МДР-2 с решеткой 1200 штрихов на мм; фотоэлектронные умножители ФЭУ-106 и ФЭУ-142, работающие в режиме счета фотонов; водородную лампу ВМФ-25 в качестве источника оптического излучения в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ); вакуумную оптическую камеру с окном из LiF, оборудованную малоинерционным криостатом со сменными узлами для работы в широкой температурной области от 8 до 600 K, и средства безмасляной откачки. При измерении спектров возбуждения люминесценцию регистрировали через фильтр УФС-2. Возбуждение рентгенолюминесценции (РЛ) осуществляли при помощи трубки БСВ-2 ($U_a = 30\text{ kV}$, $I_a = 10\text{ mA}$, Cu — антикатод). Для проведения измерений использована электронная измерительно-управляющая аппаратура в стандарте КАМАК, сопряженная с компьютером, осуществляющим управление модулями, сбор и обработку данных.

2. Результаты эксперимента

Измерение спектров оптического поглощения (ОП) LBO показало, что монотонный экспоненциальный рост ОП в необлученных кристаллах начинается в спектральной области выше 7.5 eV (рис. 1). При этом в области прозрачности LBO каких-либо полос ОП обнаружено не было. Установлено, что реальное положение ДКФП зависит как от температуры, так и от кристаллографической ориентации образца. Так, например, для всех исследованных кристаллов $\text{LBO} \perp \text{Z}$ положение ДКФП оказалось сдвинутым примерно на 150 meV в коротковолновую область спектра по сравнению с таковым для кристаллов $\text{LBO} \perp \text{X}$ (рис. 1). Изменение температуры кристаллов от комнатной до 80 K приводит во всех случаях к сдвигу ДКФП в коротковолновую область примерно на 100 meV (рис. 1). Облучение кристаллов LBO пучком электронов с энергией 150 keV приводит к формированию дефектов решетки нескольких типов. В работе [13] исследованы низкотемпературные дефекты, обуславливающие ОП в полосе прозрачности кристалла. В настоящей работе обнаружены высокотемпературные дефекты решетки LBO, сохраняющиеся при нагреве выше 650 K и проявляющиеся в спектрах ОП вблизи ДКФП (рис. 2). Природа высокотемпературных дефектов до сих пор не установлена. Для данной работы важным

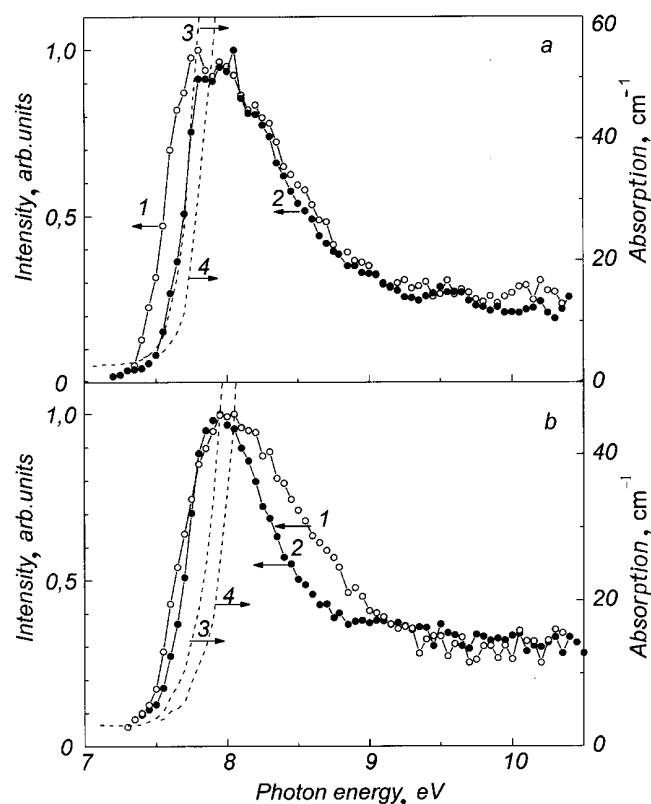


Рис. 1. Спектры возбуждения люминесценции (1, 2) и оптического поглощения (3, 4) кристаллов $\text{LBO} \perp \text{X}$ — (a) и $\text{LBO} \perp \text{Z}$ — (b) при 290 K (1, 3) и 80 K (2, 4).

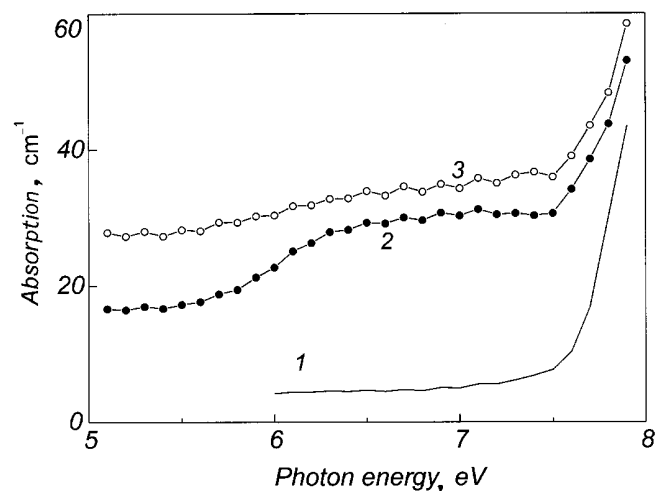


Рис. 2. Спектры оптического поглощения кристалла LBO при 300 К: 1 — до облучения; 2 — после облучения пучком электронов с энергией 150 кэВ; 3 — после отжига облученного образца на воздухе при 650 К.

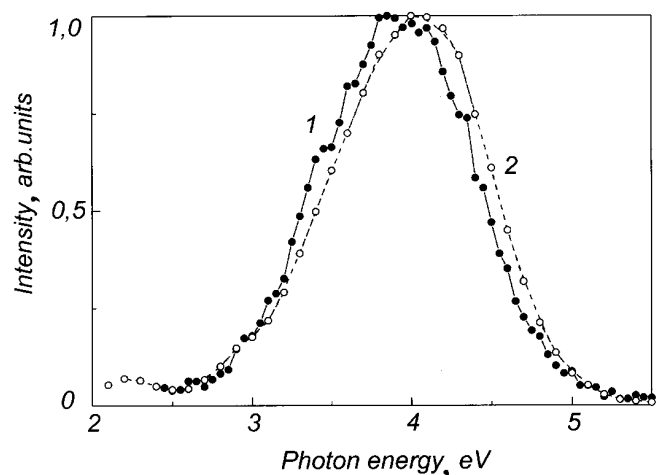


Рис. 3. Спектры люминесценции кристаллов LBO при 290 К при возбуждении фотонами с энергией $E_{ex} = 7.7$ эВ (1) и рентгеновскими фотонами (2).

обстоятельством является следующее: при оптическом возбуждении в полосе ОП как низкотемпературных, так и высокотемпературных дефектов LBO фотолюминесценция не наблюдается.

Напротив, возбуждение необлученных кристаллов LBO фотонами с энергией выше 7.5 эВ приводит к появлению широкополосной фотолюминесценции (ФЛ) в спектральной области 2.5–4.5 эВ (рис. 3). Спектр возбуждения люминесценции представлен ярко выраженной полосой с максимумом вблизи 7.9–8.0 эВ. Длинноволновая граница спектра возбуждения представлена кривой, круто возрастающей в области 7.5–8.0 эВ до максимального значения. Далее наблюдается пологий спад, который переходит в постоянный уровень 20–25%

от максимального, сохраняющийся почти постоянным в спектральной области 9.5–10.5 эВ (рис. 1). Из рис. 1 следует, что контур полосы возбуждения зависит как от температуры, так и от кристаллографической ориентации образца. Так, например, при 80 К спектральные контуры полосы возбуждения для кристаллов $\text{LBO} \perp \mathbf{X}$ и $\text{LBO} \perp \mathbf{Z}$ довольно хорошо совпадают и представлены полосой с максимумом при 8.0 эВ и FWHM около 0.8 эВ, тогда как при 290 К наблюдается их уширение. При этом в кристаллах $\text{LBO} \perp \mathbf{Z}$ уширение примерно на 200 meV происходит в области коротковолнового ската полосы возбуждения при почти неизменном длинноволновом скате, тогда как в кристаллах $\text{LBO} \perp \mathbf{X}$ ситуация выглядит иначе — аналогичное уширение полосы возбуждения происходит лишь со стороны длинноволнового ската (рис. 1).

Основной спектральный состав ФЛ сосредоточен в полосе гауссовой формы с максимумом при 4.0 эВ и шириной на полувысоте 1.2 эВ (рис. 3). Контур спектральной полосы люминесценции LBO при возбуждении в различных точках спектрального диапазона 7.7–10.5 эВ остается неизменным. На рис. 3 представлен также спектр рентгенолюминесценции LBO, который весьма близок по форме к спектру ФЛ.

Помимо этого, следует отметить, что спектр люминесценции содержит некоторые особенности в виде слабых ”плеч”, наложенных на основной контур спектральной полосы (рис. 3). Интенсивность и положение этих особенностей варьируются от образца к образцу, зависят от температурного режима и других условий эксперимента. Так, охлаждение до 77 К приводит к возникновению заметного свечения в области 2.5–4.5 эВ, проявляющегося без какого-либо внешнего облучения и совпадающего в основном со спектром ФЛ. После нескольких часов пребывания кристалла LBO в вакууме при 80 К самопроизвольное свечение полностью затухает. Следует отметить, что нагрев образца в области 80–200 К со скоростью более 5 Ks^{-1} также приводит к возникновению самопроизвольного свечения в необлученном образце, интенсивность которого зависит от скорости нагрева и может превышать интенсивность фотолюминесценции на 1–2 порядка. Выше 200 К подобное свечение отмечено не было. Интересно, что в необлученных образцах это приводит к генерации носителей заряда, их локализации на более высокотемпературных центрах захвата и последующей термостимулированной люминесценции (ТСЛ) в температурной области известного пика ТСЛ при 240 К (рис. 4). Подобные термоиндуцированные вспышки света характерны для многих пирозлектрических кристаллов, в частности для тетрабората лития [6]. Рассмотрение природы этого свечения требует отдельного исследования с привлечением данных по динамике решетки. Сосредоточим обсуждение на основной части спектра ФЛ, которая не подвержена упомянутым неизотермическим эффектам.

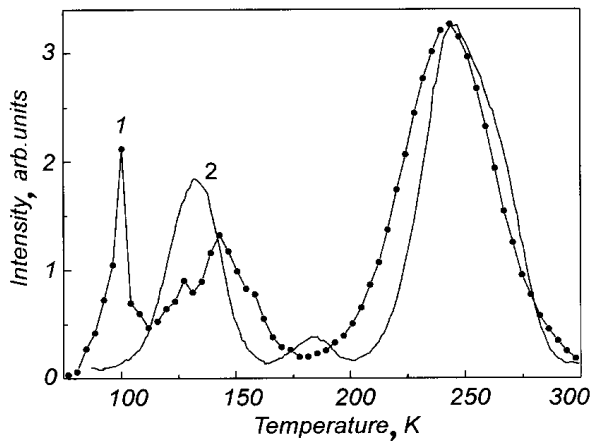


Рис. 4. Свечение необлученного образца при нагреве в вакууме со скоростью $5 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ (1) и кривая термостимулированной люминесценции кристалла LBO, облученного рентгеновским излучением при 77 К (2).

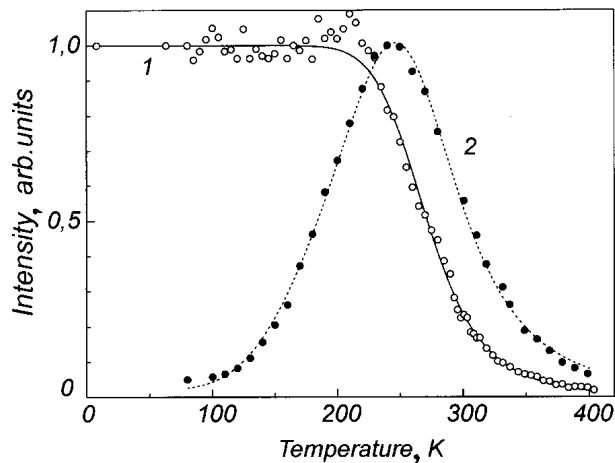


Рис. 5. Температурные зависимости фотолюминесценции необлученных образцов LBO при $E_{ex} = 7.7 \text{ eV}$ — (1) и рентгенолюминесценции — (2). Точки — экспериментальные значения; линии — предполагаемые теоретические зависимости.

Для их устранения при проведении измерений температурной зависимости ФЛ были использованы скорости нагрева и охлаждения менее 0.05 Ks^{-1} . Спектр ФЛ, измеренный при 8 и 80 К, совпадает по форме с таковым для комнатной температуры (рис. 3). Характерно, что интенсивность ФЛ при 77 К в два раза превышает таковую для комнатной температуры. На рис. 5 приведена температурная зависимость интенсивности ФЛ в области 8–400 К, которая подчиняется закону Мотта с параметрами $E_a = 290 \text{ meV}$, $\omega = 2.4 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$. Температурное тушение люминесценции происходит при температурах выше 240 К. С учетом температурного сдвига полосы возбуждения ФЛ температурная зависимость ФЛ оказалась одинаковой для различных энергий возбуждающих фотонов.

Температурная зависимость рентгенолюминесценции носит несколько иной характер. Для нее проявление термоиндуцированных вспышек света нехарактерно. При температурах выше 240 К она испытывает термическое тушение, совпадающее с таковым для ФЛ, в то время как при охлаждении от 240 до 80 К интенсивность РЛ падает в 20–25 раз (рис. 5). Это обусловлено локализацией носителей заряда на электронных V^{2+} и дырочных O^- центрах захвата, имеющих характерные температуры делокализации носителей заряда 130 и 240 К соответственно.

3. Обсуждение результатов

При анализе экспериментальных результатов в первую очередь обращают на себя внимание большой стоксов сдвиг фотолюминесценции LBO, достигающий 4 eV, и наблюдаемое соответствие между резким возрастанием оптической плотности кристалла при энергии фотонов выше 7.5 eV и профилем длинноволновой границы спектра возбуждения ФЛ (рис. 1). Возрастание ОП LBO при энергии фотонов выше 7.5 eV следует считать обусловленным фундаментальным поглощением. Действительно, несмотря на то, что точное значение E_g для LBO до сих пор является предметом дискуссий, экспериментальные и теоретические оценки E_g по положению края фундаментального поглощения LBO дают значения 7.75–7.80 eV [8,14,15]. В то же время по данным [16] зонный расчет электронной структуры LBO предсказывает $E_g = 7.37 \text{ eV}$ в направлении $\Gamma-\Gamma$. Этому не противоречат результаты исследования спектров отражения LBO, выполненные в области 6–12 eV, и проведенные на их основе расчеты [17,18], согласно которым энергия орбитали $4a_2$, отнесенной к нижней зоне проводимости (ЗП), составляет 7.3 eV.

В этой связи из данных эксперимента (рис. 1) можно заключить, что наиболее длинноволновый пик фундаментального поглощения кристаллов LBO размещен в области энергий выше 7.7 или 7.9 eV в зависимости от кристаллографической ориентации образца. Это вполне согласуется со значением 7.78 eV, полученным ранее для неориентированных образцов LBO и принятым в качестве оценки E_g [8]. Следует особо отметить, что оптическое поглощение LBO резко возрастает непосредственно около края запрещенной зоны, что существенно отличается от ситуации в некоторых других боратах (BBO, CBO), где межзонные переходы в экстремальных точках запрещены по симметрии и фундаментальное оптическое поглощение становится наблюдаемым при энергиях несколько превышающих E_g [8]. Более детальное рассмотрение края фундаментального поглощения при различных температурах (рис. 1) свидетельствует, что он может быть достаточно хорошо аппроксимирован лоренцевой кривой. Приближенная оценка величины оптической плотности в максимуме данной полосы поглощения составляет около 10^4 cm^{-1} , что

является сравнительно большой величиной. Подобные свойства могут свидетельствовать о наличии вблизи края фундаментального поглощения LBO экситоноподобных электронных возбуждений, которые, вероятно, перекрываются с межзонными переходами.

В то же время, в отличие от щелочно-галогидных кристаллов и некоторых бинарных оксидов (например, BeO [19]), исследование LBO в области температуры жидкого гелия, проведенное в данной работе, не выявило каких-либо люминесцентных проявлений этих состояний вблизи края фундаментального поглощения. Такая картина типична для некоторых простых оксидов (например, в MgO , Al_2O_3) и, по-видимому, имеет место в кристаллах ВВО [5] и $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ [20]. В пользу такой интерпретации говорит форма спектра возбуждения люминесценции LBO, возбуждаемой в области фундаментального поглощения кристалла, которая типична для кристаллов, имеющих экситонный характер свечения, его характерная температурная зависимость, большая ширина полосы эмиссии и значительный Stokes shift. В этой связи люминесценция LBO может быть отнесена к излучательной аннигиляции релаксированных экситоноподобных электронных возбуждений, как это имеет место в кристаллах ВВО [5] или $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ [20], или же к излучению релаксированных экситонов, локализованных на незначительных структурных искажениях [21]. В качестве дополнительных аргументов могут быть привлечены результаты изучения электронной структуры LBO и моделирования оптических характеристик боратов.

Результаты многочисленных зонных [8,14,16,22] и кластерных [15] расчетов электронной структуры LBO, а также данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии этого кристалла [8,23] однозначно свидетельствуют, что электронная структура валентной зоны (ВЗ) LBO формируется главным образом анионными состояниями. При этом ионы бора вносят лишь сравнительно небольшой вклад в формирование состояний ВЗ и ЗП, тогда как состояния ионов лития в формировании электронной структуры ВЗ LBO не участвуют. В этой связи электронные состояния LBO определяются локализованными боро-кислородными связями. Из расчетов следует также, что зоны LBO имеют небольшую дисперсию в K -пространстве и, в частности, ВЗ имеет минищели во всем диапазоне изменения волнового вектора. Вследствие этого эффективная масса носителей заряда достаточно велика и оценивается, например, в $0.73m_e$, $0.89m_e$ и $0.69m_e$ для направлений зоны проводимости (ЗП) $\Gamma-X$, $\Gamma-S$, $\Gamma-Z$ соответственно [16].

Анализ возможных электронных переходов из верхней валентной зоны в нижнюю зону проводимости показал, что они определяются электронной структурой боро-кислородных групп и эта ситуация типична для ряда кристаллов: LBO, СВО и ВВО. Недавний расчет электронной структуры всех кристаллов этой группы, зонным методом линеаризованных присоединенных плоских волн [22], показал, что вершина валентной зоны у них всех образована преимущественно кислородными

орбиталями при почти полном отсутствии вклада от ионов бора. При этом наиболее низкоэнергетический электронный переход в LBO происходит на состояния, образованные гибридованными орбиталями тригонально координированных ионов бора и кислорода, формирующими дно зоны проводимости. В отличие от этого в других боратах (СВО и ВВО) дно зоны проводимости формируется состояниями катиона и переходы из состояний ВЗ, образованных ионами кислорода, на чисто катионные состояния дна ЗП сравнительно малоэффективны. Более интенсивные переходы проявятся при энергиях примерно на 1 eV выше края поглощения, где смешанные боро-кислородные орбитали кристаллов СВО и ВВО вовлекаются в формирование конечного состояния межзонного перехода.

Принимая во внимание все упомянутые факты, а именно то, что спектр возбуждения находится в области фундаментального поглощения и более эффективен на его длинноволновом краю, термическую стимуляцию рекомбинационных процессов, температурные зависимости рентгено- и фотолюминесценции, следует констатировать, что люминесценция LBO является собственной люминесценцией кристалла, возникающей вследствие излучательной аннигиляции релаксированных экситоноподобных электронных возбуждений, которые могут формироваться либо путем прямого создания, либо в рекомбинационных процессах с участием основных дефектов решетки.

Таким образом, проведенные исследования фотолюминесценции и фотовозбуждения кристаллов LBO дают основания полагать, что широкополосная фотолюминесценция с максимумом при 3.75–3.8 eV обусловлена собственной люминесценцией кристалла LBO, возникающей в результате излучательной аннигиляции релаксированных экситоноподобных электронных возбуждений. С практической точки зрения данная люминесценция может быть использована для неразрушающего контроля качества оптических элементов из LBO, подвергающихся значительным лучевым нагрузкам в полях лазерного излучения.

Авторы О.И.Н. и К.А.В. признательны Ч.Б. Луцику за предоставление возможности проведения отдельных измерений в области гелиевых температур и критические замечания по некоторым аспектам работы.

Работа поддержана программой INCO-COPERNICUS (грант N 1C15-CT96-0721).

Список литературы

- [1] Ч.Б. Лущик, А.Ч. Лущик. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. Наука, М. (1989). 264 с.
- [2] И.Н. Огородников, В.Ю. Иванов, А.В. Кружалов. ФТТ **36**, 11, 3287 (1994).
- [3] А.И. Кузнецов, В.Н. Абрамов, В.В. Мюрк, Б.Р. Намозов. ФТТ **33**, 7, 2000 (1991).

- [4] V. Mürk, N. Yaroshevich. *J. Phys.: Condens. Matter.* **7**, 5857 (1995).
- [5] V. Kisand, R. Kink, J. Maksimov, M. Kirm, I. Martinson. *Phys. Scrip.* **54**, 542 (1996).
- [6] О.Т. Антоняк, Я.В. Бурак, И.Т. Лысейко, Н.С. Пидзырайло, З.А. Хапко. *Опт. и спектр.* **61**, 3, 550 (1986).
- [7] С.Ф. Радаев, Н.И. Сорокин, В.И. Симонов. *ФТТ* **33**, 12, 3597 (1991).
- [8] R.H. French, J.W. Ling, F.S. Ohuchi, C.T. Chen. *Phys. Rev.* **B44**, 16, 8496 (1991).
- [9] И.Н. Огородников, В.Ю. Иванов, А.Ю. Кузнецов, А.В. Кружалов, В.А. Маслов, Л.А. Ольховая. *Письма в ЖТФ* **19**, 2, 14 (1993).
- [10] I.N. Ogorodnikov, A.Yu. Kuznetsov, A.V. Kruzhalov, V.A. Maslov. *Radiat. Measurements* **24**, 4, 423 (1995).
- [11] I.N. Ogorodnikov, A.V. Porotnikov, V.A. Pustovarov, A.V. Kruzhalov. *J. Luminesc.* **72–74**, 703 (1997).
- [12] I.N. Ogorodnikov, V.A. Pustovarov, A.V. Porotnikov, A.V. Kruzhalov. *Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. (a)* **404**, 2–3, 339 (1995).
- [13] И.Н. Огородников, А.В. Поротников, С.В. Кудяков, А.В. Кружалов, В.Ю. Яковлев. *ФТТ* **39**, 9, 1535 (1997).
- [14] W.Y. Hsu, R.V. Kasowski. *J. Appl. Phys.* **73**, 8, 4101 (1993).
- [15] А.Б. Соболев, А.Ю. Кузнецов, И.Н. Огородников, А.В. Кружалов. *ФТТ* **36**, 5, 1517 (1994).
- [16] Yong-Niam Xu, W.Y. Ching. *Phys. Rev.* **B41**, 8, 5471 (1990).
- [17] Tian-Jie Chen, R.N. Zitter, R. Tao, W.R. Hunter, J.C. Rife. *Phys. Rev. B: Cond. Matter.* **52**, 19, 13703 (1995).
- [18] Tian-Jie Chen, R. Tao, J.C. Rife, W.R. Hunter. *J. Opt. Soc. Amer. B: Optical Phys.* **15**, 1, 47 (1998).
- [19] I.N. Ogorodnikov, A.V. Kruzhalov. *J. Lumin.* **72–74**, 701 (1997).
- [20] В.Н. Колобанов, Дж. Бекер, С. Доунс, Б.И. Заднепровский, И.А. Каменских, А. Карл, В.В. Михайлин, В.А. Нефедов, М. Рунне, Д. Тихан, И.Н. Шпиньков, Г. Циммерер. *Твердотельные детекторы ионизирующих излучений. Сб. тез. докл. 1-го всерос. симп. ТТД-97. Екатеринбург* (1997). С. 94–95.
- [21] D. Visser, G.C. Verschoor, D.J.W. Jido. *Acta Crystallogr.* **B36**, 28 (1980).
- [22] Jun Li, Chun-gang Duan, Zong-guan Gu, Ding-sheng Wang. *Phys. Rev. B: Condens. Matter and Mater. Phys.* **57**, 12, 6925 (1998).
- [23] А.Ю. Кузнецов, М.В. Кузнецов, И.Н. Огородников, А.В. Кружалов, В.А. Маслов. *ФТТ* **36**, 3, 726 (1993).