

## Разрушение легированного тетрабората лития под воздействием радиации и лазерного излучения

© Ю.Г. Вайнер<sup>1,2</sup>, Н.Ю. Верещагина<sup>3</sup>, М.И. Данилкин<sup>3</sup>, В.М. Коршунов<sup>3,4</sup>, Ю.А. Репеев<sup>1</sup>, А.С. Селюков<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup> Институт спектроскопии РАН,  
108840 Троицк, Москва, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский университет Высшая школа экономики,  
101000 Москва, Россия

<sup>3</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
119991 Москва, Россия

<sup>4</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005 Москва, Россия

<sup>5</sup> Московский физико-технический институт (Государственный университет),  
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

e-mail: vainer@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 25.02.2019 г.

В окончательной редакции 25.02.2019 г.

Принята к публикации 15.03.2019 г.

Представлены результаты изучения деградации термолюминесцентных материалов  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be} + \text{Mn}$  и  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn} + \text{Mn}$  под воздействием радиации (импульсный электронный пучок) и лазерного излучения. Обнаружено, что в результате воздействия высоких доз радиации структура изучаемых образцов частично приобретает аморфный характер, при этом в оптических свойствах эффект радиационного воздействия проявляется в возникновении зеленой люминесценции, обусловленной центрами марганца в тетраэдрическом окружении. При последующем облучении лазером с длиной волны излучения 350 нм происходит дальнейший распад центров люминесценции вследствие фотохимического окисления марганца  $\text{Mn}^{2+} \rightarrow \text{Mn}^{3+}$ . Показано, что материал  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be} + \text{Mn}$  имеет меньшую радиационную стойкость, чем  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn} + \text{Mn}$ .

**Ключевые слова:** тетраборат лития, термолюминесценция, радиационная аморфизация кристаллической структуры, лазерная деградация центров люминесценции

DOI: 10.21883/OS.2019.07.47938.109-19

### Введение

Тетраборат лития  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  используется в различных областях науки и техники. В частности, он применяется в качестве нелинейного кристалла для генерации гармоник и суммарных частот лазерного излучения [1–4], а также в качестве материала для тканезквивалентных термолюминесцентных детекторов радиации (в последнем случае тетраборат лития намеренно легируют различными примесями: Mn [5–21], Ag [8,15,22–30], Cu [15,18,27–37]). Радиационные дефекты в тетраборате лития достаточно хорошо изучены [38–45], но при этом не было попыток обобщения механизмов разрушения кристаллической структуры, в особенности при воздействии совершенно различных факторов — лазерного излучения и ионизирующей радиации. Нелегированные монокристаллы тетрабората лития обладают высокой радиационной стойкостью ко всем видам излучения [11,38]. Ситуация меняется, когда внесены примеси (например, для получения требуемых термолюминесцентных свойств). Дисбаланс центров захвата для носителей заряда различных знаков может играть существенную роль в снижении радиационной стойкости. Так, избыток центров захвата для электронов при недостатке дырочных ловушек может приводить к разрушению

кристаллической структуры под воздействием ионизирующего излучения [45]. Однако мы наблюдали деградацию радиационно-поврежденного материала также и под действием коротких (1.5 ps) лазерных импульсов, что заставило нас исследовать взаимосвязь механизмов разрушения кристаллической структуры при различных воздействиях.

### Материалы и техника эксперимента

В работе использовались образцы керамики тетрабората лития, последовательно легированные двумя примесями: бериллием и марганцем ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be} + \text{Mn}$ ) либо цинком и марганцем ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn} + \text{Mn}$ ). Количество введенных примесей было 0.2 mol.% для марганца и цинка и 0.3 mol.% для бериллия. Методика приготовления образцов способом последовательного легирования описана в работе [46] и в патенте [47]. Керамика состоит из небольших кристаллов тетрабората лития (характерный размер 0.010–0.025 mm), связанных в единое целое незначительным количеством стеклообразной фазы, содержащей диоксид кремния. Рентгеноструктурный анализ показывает, что при повышении температуры спекания керамики до примерно 1160–1170 K шири-

на рефлексов перестает уменьшаться, и кристаллы в составе керамики оказываются разупорядочены лишь незначительно [17].

Для измерения кривых термостимулированной люминесценции (ТСЛ), а также для изучения радиационной деградации образцы облучали импульсным источником ускоренных электронов РАДАН-ЭКСПЕРТ (энергия электронов 90–240 keV, длительность импульса 2 ns, флюэнс  $5 \cdot 10^{11}$  электронов за 1 импульс [48]). Кривые ТСЛ измеряли с помощью считывателя термолуминесцентных детекторов ДВГ-2М („Доза“). Считыватель доработали для измерений больших доз и спектров свечения. Для уменьшения нагрузки на ФЭУ (9924В, спектральный диапазон 290–650 nm) его диафрагмировали (примерно 1:50). Между ФЭУ и нагревателем установили вставку с кварцевой линзой, позволявшую отвести часть излучения через кварцевый световод на портативный спектрометр Ocean Optics Maya2000Pro. Спектрометр регистрировал спектральный состав пиков ТСЛ в диапазоне 230–1000 nm при скорости нагрева 2 K/s. Высокая скорость нагрева и большая доза радиации обеспечивали уровень интенсивности свечения, достаточный для уверенной регистрации спектров. Для измерения кривой ТСЛ, как правило, достаточно одного импульса электронного ускорителя ( $\sim 2 \text{ kGy/cm}^2$ ), а для измерения спектрального состава пиков ТСЛ требовалось до восьми таких импульсов.

Спектры фотолюминесценции измерялись на установке, состоящей из двойного монохроматора СДЛ-1 с ФЭУ Hamamatsu H8259-01. Для возбуждения использовалась 2 kW ксеноновая лампа и монохроматор МДР-23, с помощью которого сканировались спектры возбуждения люминесценции.

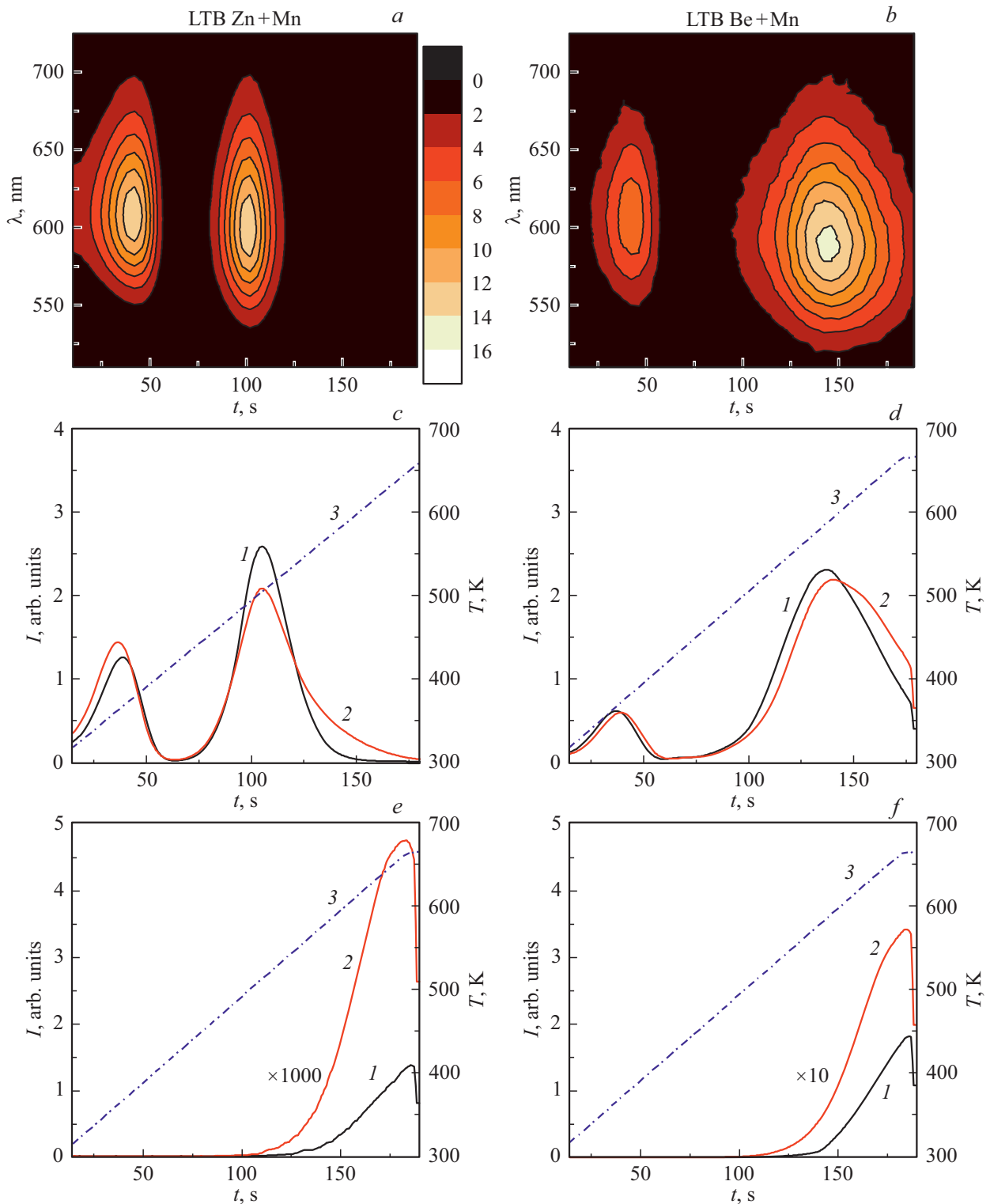
Для возбуждения люминесценции и исследования лазерного разрушения материала использовалось лазерное излучение (350 nm), полученное удвоением частоты лазера на титан-сапфире (700 nm) Mira 900-R. Длительность импульсов на полувысоте составляла  $\sim 2$  ps, для основного излучения и  $\sim 1.5$  ps для излучения удвоенной частоты. Излучение с длиной волны 350 nm фокусировалось на выбранный микрокристалл в керамическом образце микрообъективом с кратностью  $\times 40$  и с числовой апертурой  $N_A = 0.6$ . Мощность подаваемого на микрокристалл излучения составляла  $\sim 2 \text{ mW}$ , а диаметр пятна  $\sim 2 \mu\text{m}$ , что соответствует плотности мощности  $\sim 60 \text{ kW/cm}^2$  и почти на шесть порядков меньше порога прямого лазерного разрушения кристаллов тетрабората лития [11]. Флуоресцентное свечение микрокристалла собиралось этим же объективом и направлялось на входную щель светосильного спектрографа с компенсацией астигматизма IHR-550 (Horiba). Спектр регистрировался высокочувствительной ПЗС-камерой от Princeton Instruments: PyLoN Spec-10 2KBUV ( $2048 \times 512$  пикселей,  $\sim 7 \times 28 \text{ mm}$ ). Для контроля фокусировки излучения на выбранном микрокристалле выходное излучение временно переводилось зеркалом на цветную CMOS-камеру.

## Результаты и их обсуждение

Радиационная деградация тетрабората лития может быть легко обнаружена по кривым термолуминесценции. При этом разными авторами было отмечено, что облучение и последующее термоциклирование образцов, содержащих марганец, вызывает сдвиги дозиметрического пика ТСЛ как в сторону более высоких [11,45], так иногда и в сторону более низких температур [21]. Здесь переплетается целый ряд различных явлений. Во-первых, очень часто марганец распределен не только неоднородно, но и неравновесно, приходя в некое равновесие по мере облучения и термоциклирования. В этом случае как раз и может наблюдаться сдвиг дозиметрического пика ТСЛ в низкотемпературную область, поскольку среднее расстояние между электронными и дырочными центрами захвата может уменьшаться. Чаще всего неравновесное распределение примесей в монокристаллах связано с технологией их выращивания. Длительный отжиг образцов при температурах порядка 970 K мог бы улучшить распределение марганца, поскольку марганец может достаточно свободно перемещаться по кристаллической решетке [20]. Что касается высокотемпературного сдвига пика ТСЛ, то его можно объяснить вовлечением агломерированного марганца в процесс высвечивания запасенной энергии: чем больше доза, тем больший отрицательный заряд накапливается на границах положительно заряженных кластеров марганца, и отталкивание дырок перестает блокировать процесс рекомбинации. Тем не менее дыркам необходимо преодолеть дополнительный транспортный барьер, отчего пик ТСЛ сдвигается к более высоким температурам [17,45]. Этот случай обычно сопровождается сверхлинейной зависимостью пика ТСЛ от дозы радиации. При этом поведение керамики, подвергавшейся длительному спеканию, отличается обратимостью и воспроизводимостью, чем и пользуются в термолуминесцентной дозиметрии.

Наконец, существуют и необратимые изменения в кривой ТСЛ, и именно они указывают на радиационную деградацию материала. Об этих изменениях и пойдет речь.

На рисунке 1 показано формирование высокотемпературных пиков ТСЛ в процессе наращивания суммарной дозы облучения образцов. Последовательное многократное облучение и высвечивание запасенной энергии приводит к формированию новых дырочных центров захвата. Знак процесса может быть определен благодаря достаточно надежно идентифицированному методу ЭПР дырочному центру захвата на кислороде, расположенном вблизи бериллия, замещающего бор [49]. Основной пик ТСЛ при 580 K у  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be} + \text{Mn}$  хорошо совпадает с термическим распадом соответствующих дырочных ЭПР-центров [49]. При этом, как видно из верхнего ряда рис. 1, во всех процессах светит марганец, около которого, по-видимому, захвачен электрон. Что касается высокотемпературных плеч, формируемых под



**Рис. 1.** Термостимулированная люминесценция  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn}+\text{Mn}$  (a, c, e) и  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be}+\text{Mn}$  (b, d, f): карты изменения спектрального состава (a, b) ТСЛ; динамика ее интенсивности (c, d, кривые  $I$ , сплошная линия). Штрихпунктирная линия 3 показывает динамику нагревания (c-f). Кривые 2 (c, d) соответствуют ТСЛ образцов, неоднократно подвергавшихся радиационному облучению (суммарная плотность дозы от 20 до  $50 \text{ kGy/cm}^2$ ). Для лучшей визуализации высокотемпературных пиков на (e, f) показаны кривые, снятые повторно, без дополнительного облучения — до (1) и после (2) накопления большой суммарной дозы.

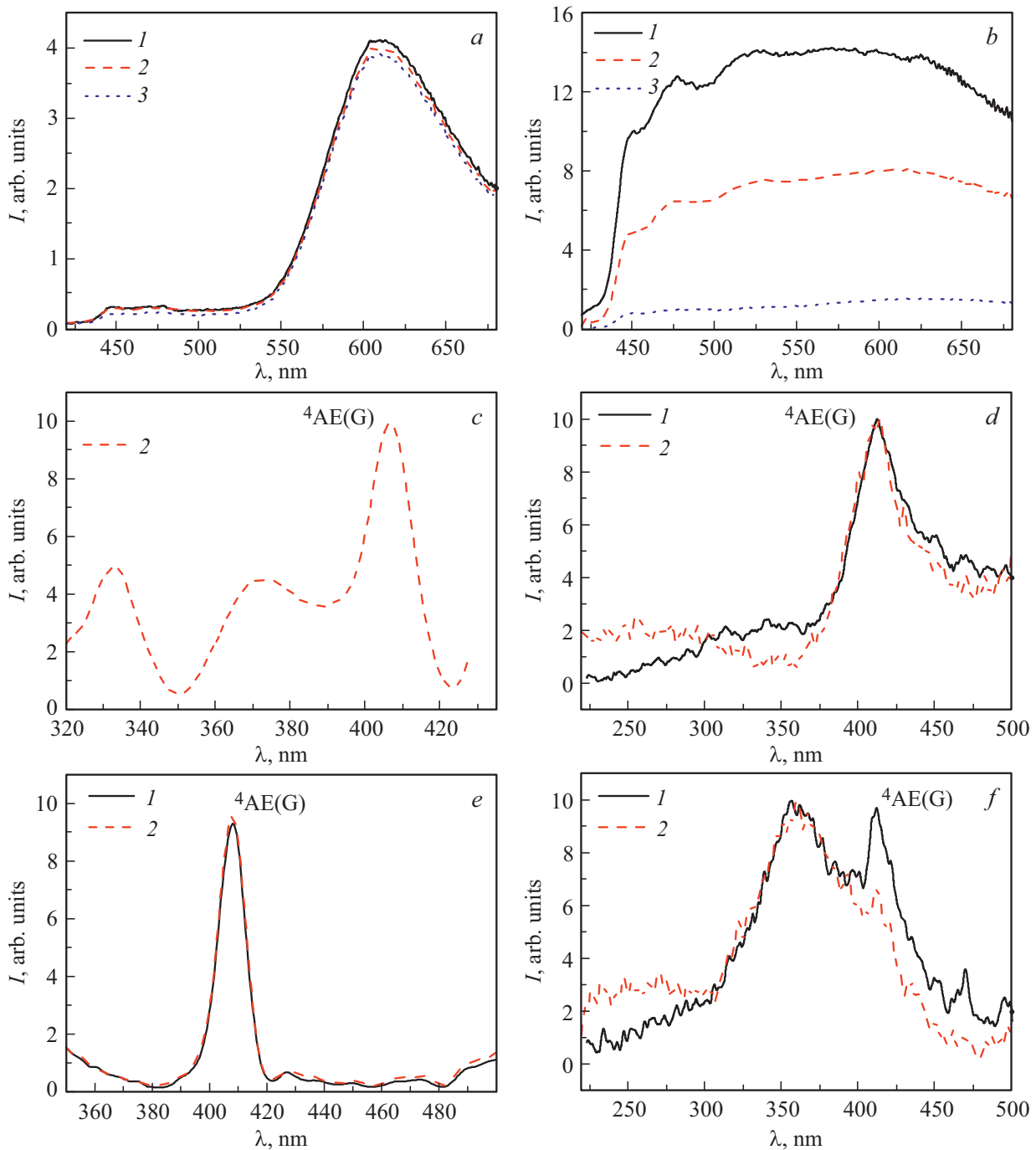
действием радиации и термоциклирования, то их природа, по предварительным данным ЭПР, тоже дырочная, но пока детально не изучена. Недавно была выяснена природа одного из самых высокотемпературных пиков, формируемого выше 600 К. Этому пику соответствует распад дырочного центра на пероксидном мостике [45]. Формирование пероксидного мостика на месте общей вершины двух борокислородных тетраэдров связано с радиационной деградацией материала. Кислород на общей вершине двух тетраэдров представляет собой слабое звено в каркасе [9]. Когда два тетраэдра  $\text{VO}_4$  теряют кислород, являющийся их общей вершиной, его захватывает соседняя группа из двух тетраэдров. На месте распавшейся группы происходит аморфизация структуры. Оказавшийся поблизости марганец приобретает при этом свойства, характерные для него в стеклах, что проявляется и в люминесценции. В разрушенной радиацией кристаллической решетке тетрабората лития формируются новые марганцевые центры, дающие яркую зеленую фотолюминесценцию. Такая фотолюминесценция наблюдалась ранее в поврежденных радиацией легированных марганцем монокристаллах [21]. Интересен тот факт, что излучение „зеленого“ марганца никогда не возбуждается в рекомбинационных процессах, а возникает только лишь при возбуждении светом в области запрещенных переходов марганца, которые дают в этом случае более размытый и более интенсивный спектр возбуждения [21].

В наших образцах, подвергнутых облучению электронным пучком, тоже возникла зеленая люминесценция, которая постоянно усиливалась после многократных радиационных воздействий с последующим термовысвечиванием запасенной энергии. На рис. 2 вверху показана люминесценция „оранжевого“ и „зеленого“ марганца при лазерном возбуждении, а также ее деградация во времени под воздействием лазерного излучения. Интересно, что у  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ve} + \text{Mn}$  зеленое излучение интенсивное, но и быстро деградирует, тогда как у  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn} + \text{Mn}$  зеленое излучение практически отсутствует, и деградация люминесценции при облучении лазером лишь незначительная. Это согласуется со степенью разрушения материала под действием импульсного электронного пучка: образец с бериллием разрушается значительно быстрее, если судить по формированию высокотемпературных дырочных пиков ТСЛ. Спектры возбуждения люминесценции (рис. 2, второй и третий ряды) показали то же самое — для образца  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn} + \text{Mn}$ , имеющего слабую радиационную деградацию, изменений в спектре возбуждения для  $\lambda_{\text{lum}} = 600 \text{ nm}$  практически не видно. Спектр возбуждения на  $\lambda_{\text{lum}} = 550 \text{ nm}$  для  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn} + \text{Mn}$  не имеет смысла, поскольку зеленая полоса люминесценции у него либо не видна совсем, либо выражена очень слабо, налагаясь на основную оранжевую люминесценцию. Что касается образца  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ve} + \text{Mn}$ , то в его спектрах возбуждения немного заметно перераспределение энергии возбуждения от разных переходов. Переход  ${}^6\text{A}_1(\text{S}) \rightarrow {}^4\text{A}_1(\text{G})$  виден во всех случаях, поскольку он

малочувствителен к кристаллическому полю и взаимодействию с лигандами [54]. Однако зеленая люминесценция возбуждается при этом переходе эффективнее, чем оранжевая, отчего у образца с интенсивной зеленой полосой люминесценции этот переход в спектре возбуждения оранжевой полосы менее выражен. И наоборот, максимум возбуждения около 350 nm оказывается эффективнее для оранжевой полосы, а в спектре возбуждения зеленой полосы в этом месте появляется небольшой провал. Такое взаимодействие может косвенно указывать на то, что разные центры марганца оказались рядом и способны конкурировать за энергию возбуждения.

Природу зеленого и оранжевого излучения марганца обычно связывают с силой кристаллического поля: тетраэдрическое окружение марганца дает более слабое поле и зеленую люминесценцию, а октаэдрическое — более сильное поле и оранжево-красную люминесценцию, хотя характер связей и расстояние до лигандов также вносят свой вклад [50,51]. Логично предположить, что в нашем случае зеленая люминесценция связана с переходом  ${}^4\text{T}_1(\text{G}) \rightarrow {}^6\text{A}_1(\text{S})$  у  $\text{Mn}^{2+}$  в тетраэдрическом окружении. Подобная люминесценция наблюдалась, например, в стеклах [52,53], где марганец при низких его концентрациях дает зеленую люминесценцию, а при высоких — оранжево-красную. Такое поведение объясняется тем, что оксид марганца в малых количествах может выступать в роли стеклообразователя наряду с оксидами кремния, бора или свинца. Поэтому в малых концентрациях марганец входит в стекла преимущественно в каркас, образуя тетраэдрические конфигурации с кислородом, а при высоких концентрациях ведет себя как модификатор, входя на типичные катионные позиции, у которых преобладает октаэдрическое окружение. При промежуточных концентрациях могут формироваться парные центры смешанного типа. Возникновение зеленой люминесценции, подобной той, что у марганца проявляется в стеклах, указывает на формирование в наших облученных образцах таких же центров  $\text{Mn}^{2+}$  в тетраэдрическом окружении, какие существуют в стеклах.

Стоит отметить два обстоятельства. Во-первых, не следует проводить параллели между тетраэдрическим  $\text{Mn}^{2+}$  в разрушенной решетке и тем  $\text{Mn}^{2+}$  на позиции бора, который предположительно существует в кристалле до его деградации [10,17–19]. Марганец на позиции бора должен являться акцептором электронов, образуя  $\sigma$ -связи с кислородом с участием  $4s$ - и  $4p$ -орбиталей, а дополнительные  $\pi$ -связи образуются с участием  $d$ -электронов. Электронные оболочки марганца в этом случае полностью заполнены. Такой марганцево-кислородный комплекс будет недоступен ни прямым люминесцентным, ни прямым ЭПР исследованиям. Обычный метод ЭПР обнаружит его разве только по сверхтонкому расщеплению сигналов каких-то близко расположенных центров (например, как пытались это сделать авторы работы [18]). Что касается возможной генетической связи между марганцем на месте бора



**Рис. 2.** Спектры люминесценции (*a, b*) и ее возбуждения (*c-f*) для образцов  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn} + \text{Mn}$  (*a, c, e*) и  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be} + \text{Mn}$  (*b, d, f*) в процессе радиационного и лазерного воздействия. (*a, b*) — деградация люминесценции поврежденных радиацией образцов под лазерным возбуждением 350 nm в течение 0 min (*1*); 2 min (*2*); 10 min (*3*). (*c-f*) — спектры возбуждения для  $\lambda_{\text{lum}} = 550$  nm (*c, d*) и 600 nm (*e, f*) до (*1*) и после (*2*) облучения большими дозами радиации.

до повреждения решетки и „зеленым“ тетраэдрическим марганцем после радиационного разрушения, то такая связь хотя и возможна, но далеко не обязательна. Второе важное обстоятельство заключается в низкой устойчивости тетраэдрического окружения марганца в разрушенной радиацией решетке тетрабората лития. Напомним, в правой части верхней панели рис. 2 показана

деградация свечения  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be} + \text{Mn}$  при возбуждении его лазером на длине волны 350 nm. Как зеленое, так и оранжевое свечение пропадают вместе, и только на последних стадиях деградации оранжевое становится чуть более заметным. Скорее всего, в случае зеленой люминесценции мы имеем дело с парными ионами  $\text{Mn}^{2+}$  в различном кислородном окружении, которые, будучи

возбуждены лазерным импульсом, имеют помимо излучательной релаксации и другой канал — фотохимическую реакцию с образованием  $Mn^{3+}$ . Окисление марганца может, например, быть результатом двухфотонного процесса фотоионизации. При этом люминесценция  $Mn^{2+}$  исчезает.

В пользу нашей модели говорит упомянутый в работе [21] факт, что зеленая люминесценция никогда не возбуждается по рекомбинационному механизму. Действительно, дырка будет не только отталкиваться от положительно заряженного марганцевого кластера, но и не сможет приблизиться к такому парному центру, возникшему в зоне поврежденной радиацией структуры с разрушенными химическими связями. Чтобы напрямую проверить, имеем ли мы дело с парными центрами марганца или все-таки с одиночными, следовало бы в дальнейшем измерить время затухания зеленой люминесценции, которое в случае парных центров должно оказаться более коротким.

Таким образом, в нашем случае лазер лишь „добивает“ поврежденную радиацией структуру легированного марганцем тетрабората лития. Роль же таких примесей, как бериллий или цинк, объясняется тем, что они усиливают кластеризацию марганца, а неоднородное распределение марганца провоцирует радиационную деградацию кристалла [45].

Для прямого лазерного разрушения кристалла требуются, на первый взгляд, гораздо большие удельные мощности. Тем не менее это не совсем так: легированный медью тетраборат лития эффективно разрушается в наших экспериментах и без предварительного радиационного воздействия, однако это тема отдельной работы.

## Заключение

Исследование деградации термолюминесцентных материалов  $Li_2B_4O_7:Be + Mn$  и  $Li_2B_4O_7:Zn + Mn$  при комбинированном воздействии импульсного электронного пучка и лазерного излучения 350 nm показало: 1) под действием высоких доз радиации происходит аморфизация структуры тетрабората лития, и при этом формируются центры марганца с зеленой люминесценцией; 2) дальнейший распад центров люминесценции предположительно происходит путем окисления марганца  $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{3+}$  под действием лазерного возбуждения при 350 nm. Самая низкая радиационная устойчивость оказалась у материала  $Li_2B_4O_7:Be + Mn$ .

Основной практический вклад данной работы связан с высоким интересом к считыванию радиационных детекторов путем оптической стимуляции вместо термической. При таком способе считывания как раз и возникают условия, подобные нашему случаю, хотя и не столь экстремальные как по дозе радиации, так и по мощности последующего облучения. Тем не менее важно знать, какие примеси могут снижать устойчивость материала и привести к дозиметрическим ошибкам.

## Благодарности

Александр Селюков благодарит за поддержку Российский фонд фундаментальных исследований (в рамках проекта № 18-02-00811 А).

## Финансирование

Финансирование работы осуществлялось частично в рамках Госзадания Института спектроскопии РАН и частично в рамках гранта РФФИ (проект № 18-02-00811 А).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Kwon T.Y., Ju J.J., Cha J.W., Kim J.N., Yun S.I. // Mater. Lett. 1994. V. 20 N 3–4 P. 211–215. doi 10.1016/0167-577X(94)90089-2
- [2] Kaminskii A.A., Bohatý L., Becker P., Liebertz J., Eichler H.J., Rhee H. // Laser Phys. Lett. 2006. V. 3. N 11. P. 519–530. doi 10.1002/lapl.200610053
- [3] Komatsu R., Sugawara T., Sassa K., Sarukura N., Liu Z., Izumida S., Segawa Y., Uda S., Fukuda T., Yamanouchi K. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. N 26. P. 3492–3494. doi 10.1063/1.119210
- [4] Petrov V., Rotermund F., Noack F., Komatsu R., Sugawara T., Uda S. // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. N 11. P. 5887–5892. doi 10.1063/1.368904
- [5] Kitiš G., Furetta C., Prokić M., Prokić V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. N 11. P. 1252–1262. doi 10.1088/0022-3727/33/11/302
- [6] Podgórska D., Kaczmarek S.M., Drozdowski W., Wabia M., Kwaśny M., Warchoł S., Rizak V.M. // Molecul. Phys. Rep. 2004. V. 39. P. 199–222.
- [7] Holovey V.M., Sidey V.I., Lyamayev V.I., Birov M.M. // J. Phys. Chem. Solids 2007. V. 68. N 7. P. 1305–1310. doi 10.1016/j.jpcs.2007.02.005
- [8] Kelemen A., Ignatovych M., Holovey V., Vidóczy T., Baranyai P. // Radiat. Phys. Chem. 2007. V. 76. N 8–9. P. 1531–1534. doi 10.1016/j.radphyschem.2007.02.067
- [9] Holovey V.M., Sidey V.I., Lyamayev V.I., Birov M.M. // J. Phys. Chem. Solids 2007. V. 68 N 7. P. 1305–1310. doi 10.1016/j.jpcs.2007.02.005
- [10] Danilkin M., Jaek I., Kerikmäe M., Lust A., Mändar H., Pung L., Ratas A., Seeman V., Klimonsky S., Kuznetsov V. // Radiat. Meas. 2010. V. 45. N 3–6. P. 562–565. doi 10.1016/j.radmeas.2010.01.045
- [11] Kar S., Verma S., Bartwal K.S. // Phys. B. 2010. V. 405. N 20. P. 4299–4302. doi 10.1016/j.physb.2010.07.030
- [12] Holovey V.M., Popovich K.P., Goyer D.B., Krasyllynets V.M., Gomonnai A.V. // Radiat. Eff. Defects Solids. 2011. V. 166. N 7. P. 522–528. doi 10.1080/10420150.2011.559235
- [13] Annalakshmi O., Jose M.T., Amarendra G. // Radiat. Meas. 2011. V. 46. N 8. P. 669–675. doi 10.1016/j.radmeas.2011.06.016
- [14] Kayhan M., Yilmaz A. // J. Alloys Compd. 2011. V. 509. N 30. P. 7819–7825. doi 10.1016/j.jallcom.2011.04.137

- [15] Ignatovych M., Fasoli M., Kelemen A. // Radiat. Phys. Chem. 2012. V. 81. N 9. P. 1528–1532. doi 10.1016/j.radphyschem.2012.01.042
- [16] Ozdemir A., Yegingil Z., Nur N., Kurt K., Tuken T., Depci T., Tansug G., Altunal V., Guckan V., Sigircik G., Yu Y., Karatasli M., Dolek Y. // J. Lumin. 2016. V. 173. P. 149–158. doi 10.1016/j.jlumin.2016.01.013
- [17] Ratas A., Danilkin M., Kerikmäe M., Lust A., Mändar H., Seeman V., Slavin G. // P. Est. Acad. Sci. 2012. V. 61. N 4. P. 279–295. doi 10.3176/proc.2012.4.03
- [18] Nagirnyi V., Aleksanyan E., Corradi G., Danilkin M., Feldbach E., Kerikmäe M., Kotlov A., Lust A., Polgár K., Ratas A., Romet I., Seeman V. // Radiat. Meas. 2013. V. 56. P. 192–195. doi 10.1016/j.radmeas.2013.02.005
- [19] Kelly T.D., Kong L., Buchanan D.A., Brant A.T., Petrosky J.C., McClory J.W., Adamiv V.T., Burak Ya.V., Dowben P.A. // Phys. Status Solidi B 2013. V. 250 N 7. P. 1376–1383. doi 10.1002/pssb.201349013
- [20] Dugan C., Hengehold R.L., McHale S.R., Colón Santana J.A., McClory J.W., Adamiv V.T., Burak Ya.V., Losovyj Ya.B., Dowben P.A. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. N 16. P. 161602. doi 10.1063/1.4802760
- [21] Romet I., Buryi M., Corradi G., Feldbach E., Laguta V., Tichy-Rács É., Nagirnyi V. // Opt. Mater. 2017. V. 70. P. 184–193. doi 10.1016/j.optmat.2017.05.032
- [22] Brant A.T., Kananan B.E., Murari M.K., McClory J.W., Petrosky J.C., Adamiv V.T., Burak Ya.V., Dowben P.A., Halliburton L.E. // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. N 9. P. 093719. doi 10.1063/1.3658264
- [23] Brant A.T., Buchanan D.A., McClory J.W., Adamiv V.T., Burak Ya.V., Halliburton L.E., Giles N.C. // J. Lumin. 2014. V. 153. P. 79–84. doi 10.1016/j.jlumin.2014.03.008
- [24] Buchanan D.A., Holston M.S., Brant A.T., McClory J.W., Adamiv V.T., Burak Ya.V., Halliburton L.E. // J. Phys. Chem. Solids 2014. V. 75. N 12. P. 1347–1353. doi 10.1016/j.jpcs.2014.07.014
- [25] Patra G.D., Singh S.G., Singh A.K., Tyagi M., Desai D.G., Tiwari B., Sen S., Gadkari S.C. // J. Lumin. 2015. V. 157. P. 333–337. doi 10.1016/j.jlumin.2014.09.017
- [26] Patra G.D., Singh S.G., Tiwari B., Singh A.K., Desai D.G., Tyagi M., Sen S., Gadkari S.C. // Radiat. Meas. 2016. V. 88. P. 14–19. doi 10.1016/j.radmeas.2016.03.002
- [27] Romet I., Aleksanyan E., Brik M.G., Corradi G., Kotlov A., Nagirnyi V., Polgár K. // J. Lumin. 2016. V. 177. P. 9–16. doi 10.1016/j.jlumin.2016.04.014
- [28] Celik M.G., Yilmaz A., Yazici A.N. // Radiat. Meas. 2017. V. 102. P. 16–26. doi 10.1016/j.radmeas.2017.06.002
- [29] Prokić M. // Radiat. Meas. 2001. V. 33. N 4. P. 393–396. doi 10.1016/S1350-4487(01)00039-7
- [30] Can N., Karali T., Townsend P.D., Yıldız F. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. N 10. P. 2038–2043. doi 10.1088/0022-3727/39/10/009
- [31] Corradi G., Watterich A., Polgár K., Nagirnyi V., Hofstaetter A., Rikitina L.G., Meyer M. // Phys. Status Solidi C. 2007. V. 4 N 3. P. 1276–1279. doi 10.1002/pssc.200673756
- [32] Corradi G., Nagirnyi V., Kotlov A., Watterich A., Kirm M., Polgár K., Hofstaetter A., Meyer M. // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. V. 20. N 2. P. 025216. doi 10.1088/0953-8984/20/02/025216
- [33] Corradi G., Nagirnyi V., Watterich A., Kotlov A., Polgár K. // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 249. N 1. P. 012008. doi 10.1088/1742-6596/249/1/012008
- [34] Huy B.T., Quang V.X., Ishii M. // J. Lumin. 2010. V. 130. N 11. P. 2142–2145. doi 10.1016/j.jlumin.2010.06.008
- [35] Kelemen A., Mesterházy D., Ignatovych M., Holovey V. // Radiat. Phys. Chem. 2012. V. 81. N 9. P. 1533–1535. doi 10.1016/j.radphyschem.2012.01.041
- [36] Brant A.T., Buchanan D.A., McClory J.W., Dowben P.A., Adamiv V.T., Burak Ya.V., Halliburton L.E. // J. Lumin. 2013. V. 139. P. 125–131. doi 10.1016/j.jlumin.2013.02.023
- [37] Aydın T., Demirtas H., Aydın S. // Radiat. Meas. 2013. V. 58. P. 24–32. doi 10.1016/j.radmeas.2013.07.010
- [38] Маловичко Г.И., Вутрук Л.Е., Юрченко Н.Ю., Бурак Я.В., Грачев В.Г., Матковский А.О., Сугак Д.Ю. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 2. С. 509–512.
- [39] Matkovskii A.O., Sugak D.Yu., Burak Ya.V., Malovichko G.I., Grachov V.G. // Radiat. Eff. Defects Solids. 1994. V. 132. N 4. P. 371–376. doi 10.1080/10420159408219989
- [40] Огородников И.Н., Яковлев В.Ю., Кружалов А.В., Исаенко Л.И. // ФТТ. 2002. Т. 44. № 6. С. 1039–1047; Ogorodnikov I.N., Yakovlev V.Y., Krushalov A.V., Isaenko L.I. // Phys. Solid State. 2002. V. 44. N 6. P. 1085–1092. doi 10.1134/1.1485012
- [41] Burak Ya.V., Padyak B.V., Shevel V.M. // Radiat. Eff. Defects Solids. 2002. V. 157. N 6–12. P. 1101–1109. doi 10.1080/10420150215791
- [42] Burak Ya.V., Padyak B.V., Shevel V.M. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2002. V. 191. N 1–4. P. 633–637. doi 10.1016/S0168-583X(02)00624-9
- [43] Swinney M.W., McClory J.W., Petrosky J.C., Yang Sh., Brant A.T., Adamiv V.T., Burak Ya.V., Dowben P.A., Halliburton L.E. // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. N 11. P. 113715. doi 10.1063/1.3392802
- [44] Ogorodnikov I.N., Poryvay N.E., Pustovarov V.A. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2010. V. 15. N 1. P. 012016. doi 10.1088/1757-899X/15/1/012016
- [45] Danilkin M.I., Koksharov Yu.A., Romet I., Seeman V.O., Vereschagina N.Yu., Zubov A.I., Selyukov A.S. // Radiat. Meas. 2019. doi 10.1016/j.radmeas.2019.106134.
- [46] Vereschagina N.Yu., Danilkin M.I., Kazaryan M.A., Ozol D.I., Sheshin E.P., Spassky D.A. // Proc. SPIE 2018. V. 10614. P. 106141F. doi 10.1117/12.2303579
- [47] Верецагина Н.Ю., Данилкин М.И. Патент РФ № 2660866 С1, 2018.
- [48] Афанасьев В.Н., Бычков В.В., Ларцев В.Д., Пудов В.П., Соломонов В.И., Шунайлов С.А., Генералова В.В., Громов А.А. // ПТЭ. 2005. № 5. С. 88–92; Afanas'ev V.N., Bychkov V.B., Lartsev V.D., Pudov V.P., Solomonov V.I., Shunailov S.A., Generalova V.V., Gromov A.A. // Instrum. Exp. Tech. 2005. V. 48 N 5. P. 641–645. doi 10.1007/s10786-005-0114-y
- [49] Kerikmäe M., Danilkin M., Lust A., Nagirnyi V., Pung L., Ratas A., Romet I., Seeman V. // Radiat. Meas. 2013. V. 56. P. 147–149. doi 10.1016/j.radmeas.2013.02.002
- [50] Lin H., Zhang R., Chen D., Yu Y., Yang A., Wang Y. // J. Mater. Chem. C. 2013. V. 1. N 9. P. 1804–1811. doi 10.1039/C2TC00658H
- [51] Shi L., Huang Y., Seo H.J. // J. Phys. Chem. A. 2010. V. 114. N 26. P. 6927–6934. doi 10.1021/jp101772z
- [52] Szöllösy L., Szörényi T., Szanka K. // Acta Phys. et Chem. Szeged. 1975. V. 21. P. 119–122.
- [53] Szöllösy L., Szörényi T., Szanka K. // Acta Phys. et Chem. Szeged. 1974. V. 20. P. 299–304.
- [54] Щербаков В.Д. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2015. Т. 157 № 4. С. 172–181.