

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-5-919-925

УДК 535.37

Механизмы люминесценции в Tb- и Dy-легированных образцах тетрабората магния

Иван Александрович Захарчук✉

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация
zakharchukwork@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>

Аннотация

Введение. Исследованы люминесцентные свойства термолюминесцентных детекторов на основе тетрабората магния, легированного тербием или диспрозием и натрием. Анализ полученных результатов позволяет подтвердить данные о зарядовом состоянии легирующей примеси. **Метод.** Тетраборат магния получен методом твердофазной реакции между борной кислотой и карбонатом или оксидом магния. После измельчения шихту сушили при 333–353 К, обезвоживали при 473 К и отжигали в две стадии при 1023 К и 1143 К соответственно. Примеси диспрозия, тербия и натрия вводились перед последним отжигом. Сигнал фотолюминесценции регистрировался при помощи спектрометра с двойным монохроматором. В качестве источника возбуждения использовалась ксеноновая лампа, длину волны возбуждения задавали монохроматором. Сигнал катодолюминесценции регистрировался спектрометром с матричным фотоприемником при возбуждении электронным пучком. Кинетика фотолюминесценции регистрировалась фотоэлектронным умножителем при лазерном возбуждении, кинетика катодолюминесценции — при помощи фотоэлектронного умножителя и осциллографа. **Основные результаты.** Получены спектры фотолюминесценции, возбуждения фотолюминесценции, катодолюминесценции, а также кривые затухания фото- и катодолюминесценции для образцов тетрабората магния, легированного тербием или диспрозием и натрием. Установлено, что фотолюминесценция диспрозия отсутствует в необлученном образце и проявляется только после возбуждения электронным пучком. Это указывает на изменения зарядового состояния материала. Термически стимулированная люминесценция образцов связана с излучательными переходами тербия и диспрозия в зарядовом состоянии 3+. Показано, что зарядовое состояние примеси определяет способ возбуждения центра свечения при нагреве. Установлено, что в исследованных образцах диспрозий преимущественно находится в зарядовом состоянии 2+, тогда как тербий присутствует в зарядовом состоянии 3+ изначально. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы при выборе редкоземельных примесей для создания термолюминесцентных материалов на их основе. Установленная связь между зарядовым состоянием примеси и механизмом термолюминесценции позволяет учитывать влияние состава материала на форму кривой высвечивания, положение основного максимума и интенсивность термолюминесцентного отклика.

Ключевые слова

тетраборат магния, легирование, люминесценция, зарядовое состояние, центры свечения, центры захвата

Ссылка для цитирования: Захарчук И.А. Механизмы люминесценции в Tb- и Dy-легированных образцах тетрабората магния // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 5. С. 919–925. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-5-919-925

Luminescence mechanisms in Tb- and Dy-doped magnesium tetraborate samples

Ivan A. Zakharchuk✉

Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation

zakharchukwork@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>

Abstract

The luminescent properties of thermoluminescent detectors based on magnesium tetraborate doped with terbium or dysprosium and sodium were studied. Analysis of the obtained results allows verifying the charge state of the dopant ions. Magnesium tetraborate was prepared by a solid-state reaction between boric acid and magnesium carbonate or magnesium oxide. After grinding, the reaction mixture was dried at 333–353 K, dehydrated at 473 K, and annealed in two stages at 1023 K and 1143 K, respectively. Dysprosium, terbium, and sodium impurities were introduced before the final annealing step. The photoluminescence signal was recorded using a spectrometer based on a double monochromator under monochromatically selected excitation from a xenon lamp. Cathodoluminescence was recorded with a CCD spectrometer under electron-beam excitation. Photoluminescence decay kinetics were measured with a photomultiplier tube under laser excitation, whereas cathodoluminescence decay kinetics were recorded using a photomultiplier tube and an oscilloscope. Photoluminescence, photoluminescence excitation, and cathodoluminescence spectra, as well as photo- and cathodoluminescence decay curves, were obtained for magnesium tetraborate samples doped with terbium or dysprosium and sodium. Dysprosium photoluminescence was absent in the non-irradiated sample and appeared only after electron-beam excitation. This indicates a change in the charge state of the dysprosium dopant. Thermally stimulated luminescence of the samples is associated with radiative transitions of terbium and dysprosium in the 3+ charge state. The dopant charge state determines the excitation pathway of the luminescence center during heating. In the studied samples, dysprosium predominantly occurs in the 2+ charge state, whereas terbium is initially present in the 3+ charge state. The obtained results can be used when selecting rare-earth dopants for the development of magnesium-tetraborate-based thermoluminescent materials. The established relationship between the dopant charge state and the thermoluminescence mechanism provides a basis for targeted control of the practical properties of these materials.

Keywords

magnesium tetraborate, doping, luminescence, charge state, luminescence centers, trapping centers

For citation: Zakharchuk I.A. Luminescence mechanisms in Tb- and Dy-doped magnesium tetraborate samples. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 5, pp. 919–925 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-5-919-925

Введение

С середины прошлого века материалы на основе боратов заняли место в области термолюминесцентной дозиметрии [1, 2]. Причиной этому является уникальный набор свойств этих материалов. Помимо таких базовых характеристик, как линейность отклика, низкий фединг и простая форма кривой термовысвечивания, тетрабораты обладают тканеэквивалентностью [3–5]. Кроме того, легированные тетрабораты оказались пригодными для более перспективного метода получения дозовой информации — оптически стимулированной люминесценции [6–8]. Исходя из этого, развитие тканеэквивалентных детекторов на основе тетрабората для персональной люминесцентной дозиметрии остается актуальной задачей. Однако при таком обширном использовании исследуемых материалов, детального описания механизмов и моделей люминесценции представлено крайне мало. В научных публикациях фрагментарно представлена информация о зарядовых состояниях некоторых редкоземельных элементов в матрице тетрабората магния (MgB_4O_7). В работах [9–11] описаны результаты исследований свойств для тербия (Tb) и церия (Ce). Одним из наиболее изученных детекторов на основе MgB_4O_7 является ТЛД-580 (ТЛД-580н), представляющий собой легированный диспрозием (Dy) или ду и натрием (Na) [12, 13]. При этом зарядовое состояние Dy в матрице MgB_4O_7 не имеет однозначной интерпретации и может зависеть от множества факторов [14, 15]. Недостаточное понимание физики процессов накопления и высвобождения дозовой информации

в MgB_4O_7 приводит к тому, что разработка детекторов на его основе остается эмпирической: изменения в составе и условиях синтеза не всегда удается напрямую связать с перестройкой дефектной структуры, распределением ловушек и механизмами возбуждения центров свечения. Более направленное создание практически применимых детекторов требует понимания того, в каком зарядовом состоянии находится редкоземельная примесь, какие ловушки участвуют в накоплении энергии и каким образом происходит возбуждение центра свечения при термической или оптической стимуляции.

В результате сопоставление Dy- и Tb-содержащих образцов представляет особый интерес, поскольку эти примеси могут реализовывать разные сценарии возбуждения центра свечения при высвобождении носителей заряда из ловушек. В настоящей работе рассматривается связь между зарядовым состоянием редкоземельной примеси, спектральными характеристиками люминесценции, кинетикой затухания и формой кривых термолюминесценции в MgB_4O_7 , легированном Dy, Tb и Na.

Техника эксперимента

Исходный MgB_4O_7 получен методом твердофазной реакции между борной кислотой и оксидом или карбонатом магния [16–18]. Полученная шихта измельчалась и подвергалась двухстадийной сушке и обезвоживанию: в вакууме при 333–353 K в течение 3 ч, а затем при 473 K в течение 2 ч. Затем происходил предварительный отжиг при температуре 1023 K в течение 2 ч и финальный отжиг при 1073–1143 K в течение несколь-

ких десятков часов. Примеси Dy, Tb и Na вводились непосредственно перед финальной стадией отжига путем пропитки шихты соответствующими растворами.

Спектры люминесценции были получены при возбуждении ксеноновой лампой при комнатной температуре. Необходимый диапазон излучения выделялся при помощи монохроматора МДР-23 с компьютерным управлением. Регистрация спектров люминесценции и возбуждения люминесценции осуществлялась спектрометром СДЛ-1 [19, 20]. Установка была оснащена двумя дифракционными решетками с плотностью 600 штрихов на миллиметр и фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) Hamamatsu H6240-01, работавшим в режиме счета фотонов в спектральном диапазоне 300–850 нм. Кинетика фотолюминесценции регистрировалась с помощью монохроматора спектрометра СДЛ-1 и ФЭУ-79 при лазерном возбуждении (источник Lotis TII-2134UTF, длина волны 355 нм, длительность импульса 6 нс).

Спектры катодолюминесценции были получены при возбуждении импульсным электронным пучком с использованием портативного ускорителя РАДАН-ЭКСПЕРТ. Длительность импульса составляла 2 нс, средняя энергия электронов — 160 кэВ. Регистрация спектров катодолюминесценции осуществлялась спектрометром Ocean Optics Maya 2000Pro [21]. Для измерения кинетики катодолюминесценции излучение от образца передавалось на ФЭУ-100 с помощью квар-

цевого световода через монохроматор МДР-3. Сигнал записывался осциллографом GDS-72302.

Кривые термически стимулированной люминесценции после возбуждения электронным пучком регистрировались с использованием установки ДОЗА-ТЛД (рабочий диапазон 300–600 К).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции, возбуждения фотолюминесценции и кривые затухания фотолюминесценции для образцов $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$ и $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb,Na}$. Спектры образцов $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$ и $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb,Na}$ были зарегистрированы при энергиях возбуждающего излучения 2,80 и 3,35 эВ соответственно. Кинетики фотолюминесценции регистрировались в спектральных окнах, соответствующих энергиям 2,16 и 2,25 эВ для $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$ и $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb,Na}$ соответственно.

В спектре люминесценции образца $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$ наблюдается узкая полоса в области 2,05–2,25 эВ, соответствующая переходу $\text{Dy}^{3+} {}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ [22, 23]. Важно отметить, что спектр люминесценции был зарегистрирован только после предварительного возбуждения электронным пучком и частичного отжига, что свидетельствует об изначальном нахождении Dy в зарядовом состоянии $2+$. В спектре люминесценции образца $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb,Na}$ заметно несколько узких

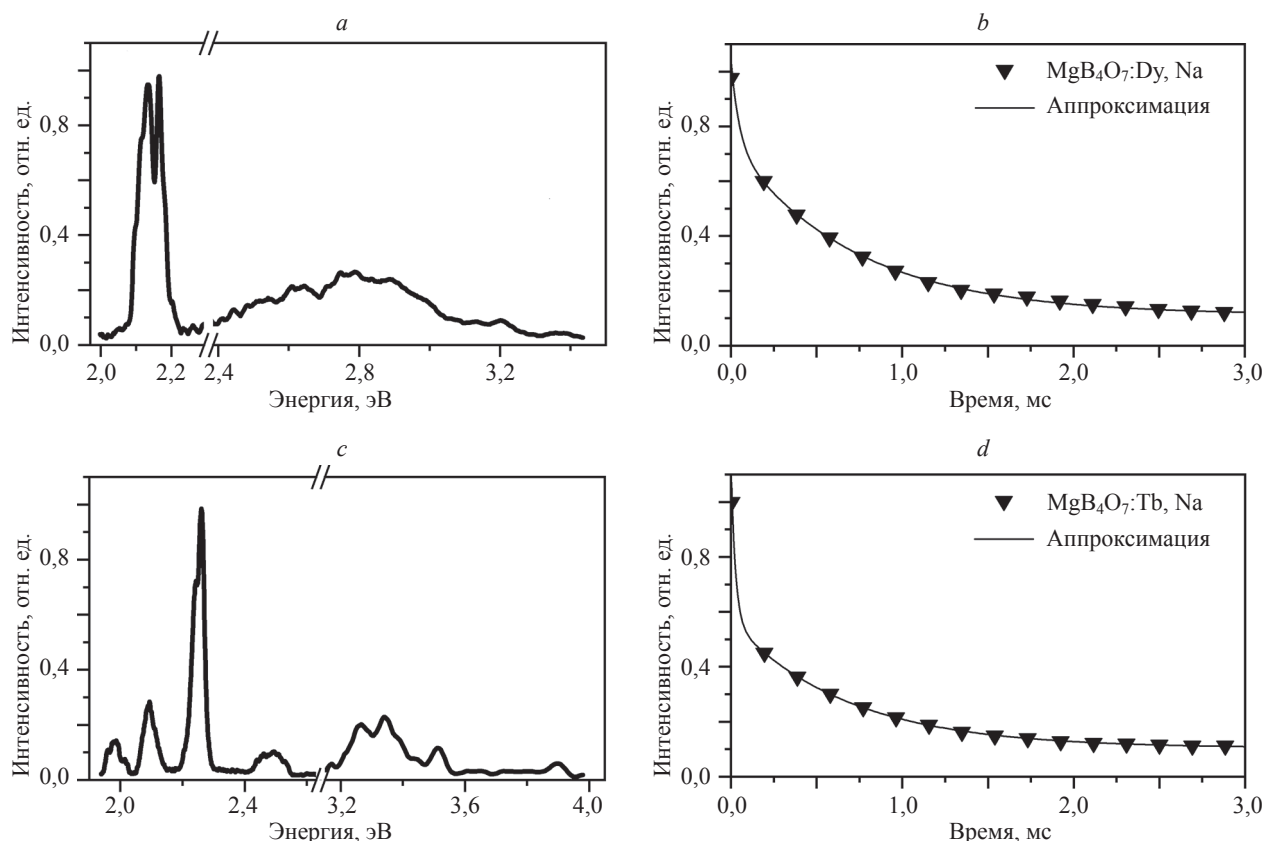


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции, возбуждения фотолюминесценции (a, c) и кинетика затухания фотолюминесценции (b, d) исследуемых образцов $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$ и $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb,Na}$ соответственно

Fig. 1. Photoluminescence and photoluminescence excitation spectra (a, c), and photoluminescence decay kinetics (b, d) of the studied $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$ and $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb,Na}$ samples, respectively

полос в области 1,7–2,55 эВ, соответствующих переходам Tb^{3+} : $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$, $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$, $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$, $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$ [24, 25]. Таким образом, в обоих случаях спектры фотолюминесценции после соответствующей предварительной обработки образцов определяются характерными 4f-4f переходами трехзарядных ионов Tb и Dy. Кинетики фотолюминесценции имеют не чисто экспоненциальный характер и описываются моделью, представленной в [26, 27]. Характерные времена затухания составили $\tau_1 = 1,95$ мс и $\tau_2 = 1,73$ мс для $MgB_4O_7:Dy,Na$ и $MgB_4O_7:Tb,Na$ соответственно. Миллисекундные времена затухания связаны с внутрицентровыми 4f-4f-переходами редкоземельных ионов, для которых характерны относительно малые вероятности излучательных переходов. Отклонение от простой экспоненты возникает из-за переноса энергии между редкоземельными центрами. После возбуждения лазерным импульсом энергия может передаваться от одного иона к другому без испускания фотона. Вероятность такого процесса зависит от расстояния между центрами. В связи с этим разные возбужденные ионы имеют разное локальное окружение и разные скорости дезактивации, а суммарная кинетика представляет собой не один экспоненциальный спад, а суперпозицию вкладов с различными эффективными временами затухания.

На рис. 2 представлены нормированные на максимальное значение спектры катодолюминесценции и кривые затухания катодолюминесценции для образцов $MgB_4O_7:Dy,Na$ и $MgB_4O_7:Tb,Na$.

В спектре катодолюминесценции образца $MgB_4O_7:Dy,Na$ наблюдается несколько узких полос в области 1,58–2,70 эВ, соответствующих переходам Dy^{3+} $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$, $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$, $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{11/2}$ [24, 25]. В спектре катодолюминесценции образца $MgB_4O_7:Tb,Na$ видно несколько узких полос в области 1,92–2,60 эВ, соответствующих переходам $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$, $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$, $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$, $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$ [26, 27]. Такое соответствие спектральных полос характерным 4f-4f-переходам показывает, что при электронно-лучевом возбуждении излучение в обоих образцах формируется трехзарядными редкоземельными центрами Dy^{3+} и Tb^{3+} . Кинетика катодолюминесценции значительно отличается от кинетики люминесценции. Она описывается моноэкспоненциальной функцией с характерными наносекундными временами: $\tau_1 = 4,73$ нс и $\tau_2 = 7,34$ нс для $MgB_4O_7:Dy,Na$ и $MgB_4O_7:Tb,Na$ соответственно. Это указывает на то, что при катодолюминесценции возбуждение центров свечения, связанных с редкоземельными элементами, происходит по механизму, отличного от оптического возбуждения. При электронно-лучевом возбуждении в матрице тетрабората образуются электронно-дырочные пары и экситоны, энергия которых затем передается центрам свечения.

На рис. 3 представлены кривые термовысвечивания для образцов $MgB_4O_7:Dy,Na$ и $MgB_4O_7:Tb,Na$. Результаты термолюминесцентных измерений логически дополняют данные фотолюминесценции и катодолюминесценции.

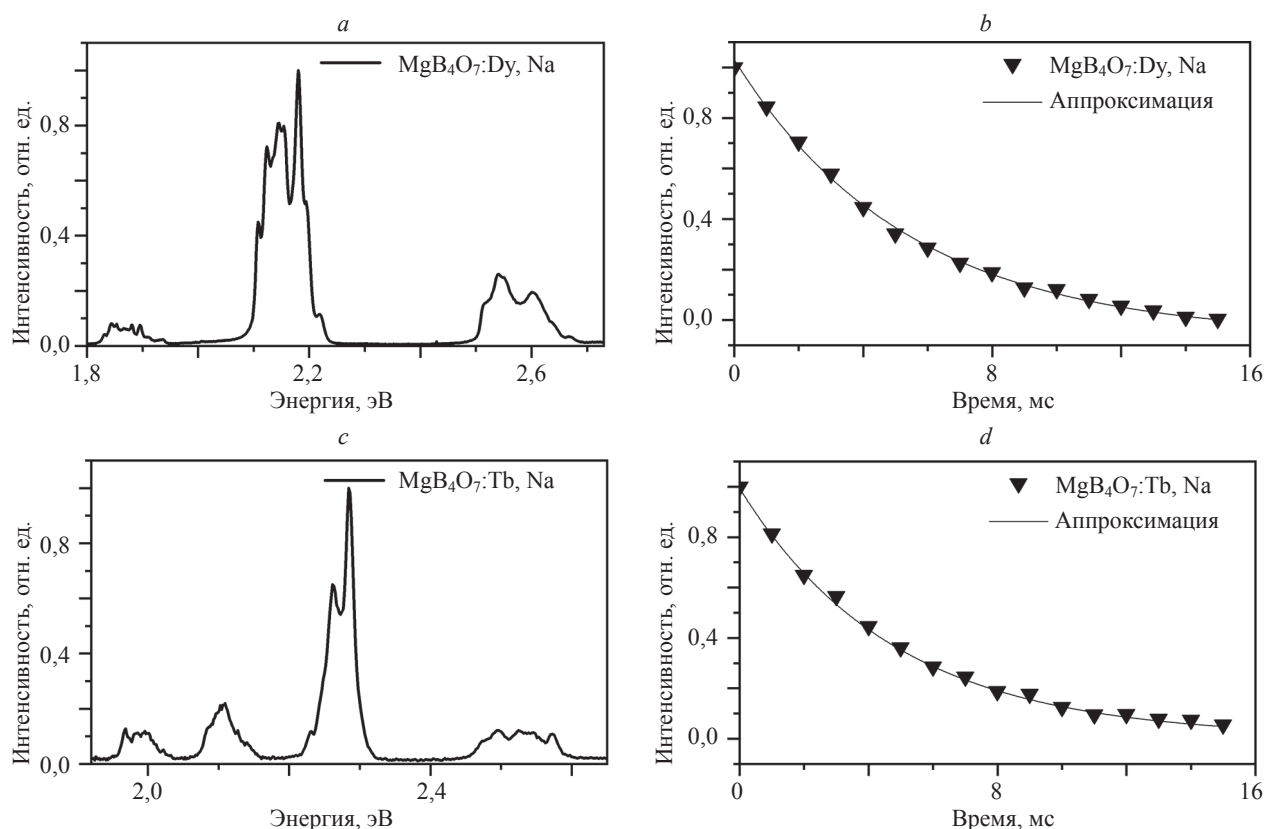


Рис. 2. Спектры катодолюминесценции (a, c) и кинетика затухания катодолюминесценции (b, d) исследуемых образцов $MgB_4O_7:Dy,Na$ и $MgB_4O_7:Tb,Na$ соответственно

Fig. 2. Cathodoluminescence spectra (a, c) and cathodoluminescence decay kinetics (b, d) of the studied $MgB_4O_7:Dy,Na$ and $MgB_4O_7:Tb,Na$ samples, respectively

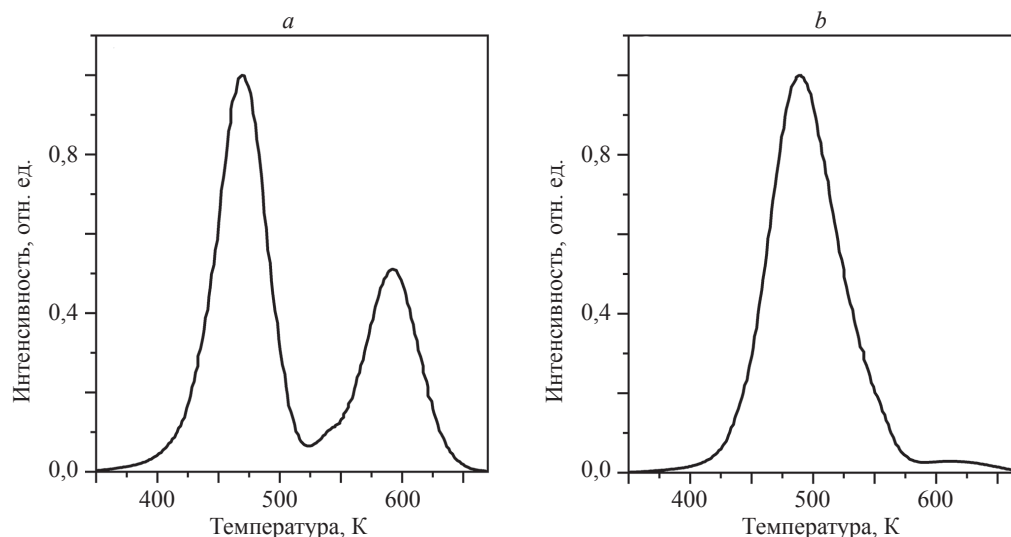


Рис. 3. Кривые термовысвечивания исследуемых образцов $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$ (a) и $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb,Na}$ (b)
 Fig. 3. Thermoluminescence glow curves of the studied $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$ (a) and $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb,Na}$ (b) samples

Кривые термовысвечивания образца, легированного Dy и Na имеет низкотемпературный (470 K) и высокотемпературный (590 K) максимумы [5, 13]. Второй максимум связан с участием более глубоких по энергии дырочных ловушек. Часть дырок, высвобождающихся при прохождении основного максимума, захватывается Dy^{2+} с образованием возбужденных центров Dy^{3+} , тогда как другая часть может быть повторно захвачена глубокими ловушками и высвободиться при более высоких температурах. Поэтому появление фотолюминесценции Dy^{3+} после частичного отжига и наличие выраженного термолюминесцентного максимума имеют общую природу и связаны с термически стимулированным высвобождением дырок. Кривые термовысвечивания образца, легированного Tb и Na, имеет преимущественно один доминирующий максимум в области 490 K [11]. Такая форма указывает на более узкое распределение ловушек по энергиям и на преобладание одного типа дырочных ловушек. Tb заведомо находится в зарядовом состоянии $3+$, поэтому высвобожденная дырка не может напрямую перезарядить центр по аналогии с Dy^{2+} . Возбуждение Tb^{3+} требует рекомбинации дырки с электроном, предварительно захваченным вблизи Tb^{3+} , с последующей передачей энергии на центр свечения. Введение соактиватора в виде Na приводит к тому, что основные максимумы обоих образцов становятся более выраженными и имеют более простую форму. Вероятно, это связано с тем, что Na, замещая Mg, выступает как локальный зарядово-компенсирующий дефект и стабилизирует дырочные центры BO_3^{2-} [28]. В результате этого распределение дырочных ловушек по энергиям становится менее размытым, а термолюминесцентный отклик концентрируется преимущественно в области основного максимума.

Заключение

Проведенное сопоставление люминесцентных характеристик исследуемых образцов $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$

и $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Tb,Na}$ показало, что зарядовое состояние редкоземельной примеси является ключевым фактором, определяющим механизм возбуждения центра свечения. Спектры фотолюминесценции, возбуждения фотолюминесценции и катодолюминесценции подтверждают, что излучение в обоих случаях связано с переходами трехзарядных ионов диспрозия Dy^{3+} и тербия Tb^{3+} , однако условия формирования этих центров различаются. Для образца легированного диспрозием и натрием характерная фотолюминесценция появляется только после электронного возбуждения и частичного отжига, что указывает на исходное присутствие диспрозия преимущественно в зарядовом состоянии $2+$. Тербий, напротив, показывает свойства устойчивого зарядового состояния $3+$ изначально. Кинетические измерения также демонстрируют различие механизмов возбуждения при оптическом и электронном возбуждениях. Фотолюминесценция характеризуется миллисекундным затуханием, связанным с переносом энергии между редкоземельными центрами. Катодолюминесценция характеризуется наносекундным затуханием, что указывает на иной способ заселения излучательных состояний редкоземельных ионов. Кривые термовысвечивания связывают эти спектральные наблюдения с процессами накопления и высвобождения носителей заряда. В образце, легированном диспрозием и натрием, дырочные носители заряда захватываются Dy^{2+} с образованием возбужденных состояний Dy^{3+} , что объясняет связь между появлением фотолюминесценции Dy^{3+} после частичного отжига и термолюминесцентным откликом. В образце, легированном тербием и натрием, возбуждение Tb^{3+} требует рекомбинации высвобожденной дырки с электроном, предварительно захваченным вблизи Tb^{3+} . Полученные результаты показывают, что различия между Dy- и Tb-содержащими образцами определяются не только природой редкоземельного иона, но и его исходным зарядовым состоянием, а также способом термического высвобождения носителей заряда из дырочных ловушек.

Литература

References

- Schulman J.H., Kirk R.D., West E.J. Use of lithium borate for thermoluminescence dosimetry // *Proc. of the International Conference on Luminescence Dosimetry*. 1967. P. 113–118.
- Almond P.R., McCray K., Espejo D. A lithium borate thermoluminescent dosimetry system for radiologic physics dosimetry // *American Journal of Roentgenology, Radium Therapy, and Nuclear Medicine*. 1970. V. 108. N 1. P. 197–200. doi: 10.2214/ajr.108.1.197
- Furetta C., Prokić M., Salamon R., Prokić V., Kitis G. Dosimetric characteristics of tissue equivalent thermoluminescent solid TL detectors based on lithium borate // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2001. V. 456. N 3. P. 411–417. doi: 10.1016/S0168-9002(00)00585-4
- Prokić M. Dosimetric characteristics of Li₂B₄O₇:Cu,Ag,P solid TL detectors // *Radiation Protection Dosimetry*. 2002. V. 100. N 1-4. P. 265–268. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a005863
- Legorreta-Alba O., Cruz-Zaragoza E., Diaz D., Marcuzzo J. Synthesis of MgB₄O₇:Dy³⁺ and thermoluminescent characteristics at low doses of beta radiation // *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*. 2018. V. 6. N 1. P. 71–76. doi: 10.15415/jnp.2018.61012
- Aydın T., Demirtaş H., Aydın S. TL/OSL studies of Li₂B₄O₇:Cu dosimetric phosphors // *Radiation Measurements*. 2013. V. 58. P. 24–32. doi: 10.1016/j.radmeas.2013.07.010
- Bossin L., Plokhikh I., Christensen J.B., Gawryluk D.J., Kitagawa Y., Leblans P., et al. Addressing current challenges in OSL dosimetry using MgB₄O₇:Ce,Li: state of the art, limitations and avenues of research // *Materials*. 2023. V. 16. N 8. P. 3051. doi: 10.3390/ma16083051
- Özdemir A., Can N., Kurt K., Yegingil Z. Optically stimulated luminescence (OSL) dosimetric properties of Li₂B₄O₇:Ag,Gd and its relationship with thermoluminescence (TL) glow-curves // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. V. 751. P. 159–169. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.04.078
- Souza L.F., Novais A.L., Antonio P.L., Caldas L.V.E., Souza D.N. Luminescent properties of MgB₄O₇:Ce,Li to be applied in radiation dosimetry // *Radiation Physics and Chemistry*. 2019. V. 164. P. 108353. doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108353
- Gustafson T.D., Milliken E.D., Jacobsohn L.G., Yukihara E.G. Progress and challenges towards the development of a new optically stimulated luminescence (OSL) material based on MgB₄O₇:Ce,Li // *Journal of Luminescence*. 2019. V. 212. P. 242–249. doi: 10.1016/j.jlumin.2019.04.028
- Kawashima Y.S., Gugliotti C.F., Yee M., Tatumi S.H., Mittani J.C.R. Thermoluminescence features of MgB₄O₇:Tb phosphor // *Radiation Physics and Chemistry*. 2014. V. 95. P. 91–93. doi: 10.1016/j.radphyschem.2012.12.033
- Subanakov A.K., Bazarova Zh.G., Nepomnyshchikh A.I., Perevalov A.V., Bazarov B.G. Synthesis and characterization of dysprosium-doped magnesium tetraborate // *Inorganic Materials*. 2014. V. 50. N 5. P. 485–488. doi: 10.1134/S0020168514050185
- Pagonis V., Brown N., Polymeris G.S., Kitis G. Comprehensive analysis of thermoluminescence signals in MgB₄O₇:Dy,Na dosimeter // *Journal of Luminescence*. 2019. V. 213. P. 334–342. doi: 10.1016/j.jlumin.2019.05.044
- Lochab S.P., Pandey A., Sahare P.D., Chauhan R.S., Salah N., Ranjan R. Nanocrystalline Mg B₄O₇:Dy for high dose measurement of gamma radiation // *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*. 2007. V. 204. N 7. P. 2416–2425. doi: 10.1002/pssa.200622487
- Bahl S., Pandey A., Lochab S.P., Aleynikov V.E., Molokanov A.G., Kumar P. Synthesis and thermoluminescence characteristics of gamma and proton irradiated nanocrystalline MgB₄O₇:Dy,Na // *Journal of Luminescence*. 2013. V. 134. P. 691–698. doi: 10.1016/j.jlumin.2012.07.008
- İflazoğlu S., Kafadar V.E., Yılmaz A. Synthesis and thermoluminescence characterization of β-irradiated MgB₄O₇ phosphor co-doped with Dy and Na // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2025. V. 197. P. 112450. doi: 10.1016/j.jpcs.2024.112450
- de Souza L.F., Caldas L.V.E., Junot D.O., Silva A.M.B., Souza D.N. Thermal and structural properties of magnesium tetraborate produced by solid state synthesis and precipitation for use in thermoluminescent
- Schulman J.H., Kirk R.D., West E.J. Use of lithium borate for thermoluminescence dosimetry. *Proc. of the International Conference on Luminescence Dosimetry*, 1967. pp. 113–118.
- Almond P.R., McCray K., Espejo D. A lithium borate thermoluminescent dosimetry system for radiologic physics dosimetry. *American Journal of Roentgenology, Radium Therapy, and Nuclear Medicine*, 1970, vol. 108, no. 1, pp. 197–200. doi: 10.2214/ajr.108.1.197
- Furetta C., Prokić M., Salamon R., Prokić V., Kitis G. Dosimetric characteristics of tissue equivalent thermoluminescent solid TL detectors based on lithium borate. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, vol. 456, no. 3, pp. 411–417. doi: 10.1016/S0168-9002(00)00585-4
- Prokić M. Dosimetric characteristics of Li₂B₄O₇:Cu,Ag,P solid TL detectors. *Radiation Protection Dosimetry*, 2002, vol. 100, no. 1-4, pp. 265–268. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a005863
- Legorreta-Alba O., Cruz-Zaragoza E., Diaz D., Marcuzzo J. Synthesis of MgB₄O₇:Dy³⁺ and thermoluminescent characteristics at low doses of beta radiation. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 71–76. doi: 10.15415/jnp.2018.61012
- Aydın T., Demirtaş H., Aydın S. TL/OSL studies of Li₂B₄O₇:Cu dosimetric phosphors. *Radiation Measurements*, 2013, vol. 58, pp. 24–32. doi: 10.1016/j.radmeas.2013.07.010
- Bossin L., Plokhikh I., Christensen J.B., Gawryluk D.J., Kitagawa Y., Leblans P., et al. Addressing current challenges in OSL dosimetry using MgB₄O₇:Ce,Li: state of the art, limitations and avenues of research. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 8, pp. 3051. doi: 10.3390/ma16083051
- Özdemir A., Can N., Kurt K., Yegingil Z. Optically stimulated luminescence (OSL) dosimetric properties of Li₂B₄O₇:Ag,Gd and its relationship with thermoluminescence (TL) glow-curves. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 751, pp. 159–169. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.04.078
- Souza L.F., Novais A.L., Antonio P.L., Caldas L.V.E., Souza D.N. Luminescent properties of MgB₄O₇:Ce,Li to be applied in radiation dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, vol. 164, pp. 108353. doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108353
- Gustafson T.D., Milliken E.D., Jacobsohn L.G., Yukihara E.G. Progress and challenges towards the development of a new optically stimulated luminescence (OSL) material based on MgB₄O₇:Ce,Li. *Journal of Luminescence*, 2019, vol. 212, pp. 242–249. doi: 10.1016/j.jlumin.2019.04.028
- Kawashima Y.S., Gugliotti C.F., Yee M., Tatumi S.H., Mittani J.C.R. Thermoluminescence features of MgB₄O₇:Tb phosphor. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 95, pp. 91–93. doi: 10.1016/j.radphyschem.2012.12.033
- Subanakov A.K., Bazarova Zh.G., Nepomnyshchikh A.I., Perevalov A.V., Bazarov B.G. Synthesis and characterization of dysprosium-doped magnesium tetraborate. *Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 485–488. doi: 10.1134/S0020168514050185
- Pagonis V., Brown N., Polymeris G.S., Kitis G. Comprehensive analysis of thermoluminescence signals in MgB₄O₇:Dy,Na dosimeter. *Journal of Luminescence*, 2019, vol. 213, pp. 334–342. doi: 10.1016/j.jlumin.2019.05.044
- Lochab S.P., Pandey A., Sahare P.D., Chauhan R.S., Salah N., Ranjan R. Nanocrystalline Mg B₄O₇:Dy for high dose measurement of gamma radiation. *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*, 2007, vol. 204, no. 7, pp. 2416–2425. doi: 10.1002/pssa.200622487
- Bahl S., Pandey A., Lochab S.P., Aleynikov V.E., Molokanov A.G., Kumar P. Synthesis and thermoluminescence characteristics of gamma and proton irradiated nanocrystalline MgB₄O₇:Dy,Na. *Journal of Luminescence*, 2013, vol. 134, pp. 691–698. doi: 10.1016/j.jlumin.2012.07.008
- İflazoğlu S., Kafadar V.E., Yılmaz A. Synthesis and thermoluminescence characterization of β-irradiated MgB₄O₇ phosphor co-doped with Dy and Na. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2025, vol. 197, pp. 112450. doi: 10.1016/j.jpcs.2024.112450
- de Souza L.F., Caldas L.V.E., Junot D.O., Silva A.M.B., Souza D.N. Thermal and structural properties of magnesium tetraborate produced by solid state synthesis and precipitation for use in thermoluminescent

- dosimetry // *Radiation Physics and Chemistry*. 2019. V. 164. P. 108382. doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108382
18. Torres-Cortés C.O., Hernández-Adame L., Baltazar-Raigosa A., Vega-Carrillo H.R., Rodríguez-López J.L., Pérez-Arrieta M.L. Synthesis and thermoluminescent response to γ -rays and neutrons of $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy}$ and $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$ // *Applied Radiation and Isotopes*. 2019. V. 147. P. 159–164. doi: 10.1016/j.apradiso.2019.03.001
 19. Bazarov B.G., Shendrik R.Yu., Tushinova Yu.L., Sofich D.O., Bazarova J.G. Spectral-luminescent properties of terbium-containing zirconomolybdates // *Condensed Matter and Interphases*. 2020. V. 22. N 2. P. 197–203. doi: 10.17308/kcmf.2020.22/2831
 20. Osadchenko A.V., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Vashchenko A.A., Daibaga D.S., Ryzhov A.V., Pevcov D.N., Pevcov H.B., Seliukov A.S. Электролюминесценция новых координационных соединений ионов европия с β -дикетонами, уксусной и масляной кислотами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 4. С. 570–576. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-570-576
 21. Daibaga D.S., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Osadchenko A.V., et al. Temporal dynamics of exciton and recombination luminescence in CdTe/SiO_2 (core/shell) quantum dots // *Inorganic Materials*. 2024. V. 60. N 11. P. 1307–1312. doi: 10.1134/s0020168525700049
 22. Oza A., Ojha V., Dhale S.A., Dhoble S.J. Photoluminescence and thermoluminescence in Dy^{3+} -, Ce^{3+} -, and Tb^{3+} -activated MgB_4O_7 phosphor for dosimetry application // *Luminescence*. 2022. V. 37. N 9. P. 1563–1574. doi: 10.1002/bio.4332
 23. Cavalli E. Optical spectroscopy of Dy^{3+} in crystalline hosts: general aspects, personal considerations and some news // *Optical Materials: X*. 2019. V. 1. P. 100014. doi: 10.1016/j.omx.2019.100014
 24. Zhang X., Zhang Z., Seo H.J. Photoluminescence and time-resolved luminescence spectroscopy of novel $\text{NaBa}_4(\text{BO}_3)_3:\text{Tb}^{3+}$ phosphor // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. V. 509. N 14. P. 4875–4877. doi: 10.1016/j.jallcom.2011.01.195
 25. Kuboniwa S., Hoshina T. Luminescent properties of Tb^{3+} in oxygen-dominated compounds // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1972. V. 32. N 4. P. 1059–1068. doi: 10.1143/JPSJ.32.1059
 26. Grigorjevaite J., Ezerskyte E., Páterek J., Saitzek S., Zabaliute-Karaliune A., Vitta P., et al. Luminescence and luminescence quenching of $\text{K}_2\text{Bi}(\text{PO}_4)(\text{MoO}_4):\text{Sm}^{3+}$ phosphors for horticultural and general lighting applications // *Materials Advances*. 2020. V. 1. N 5. P. 1427–1436. doi: 10.1039/D0MA00369G
 27. Pisarska J., Softys M., Żur L., Pisarski W.A., Jayasankar C.K. Excitation and luminescence of rare earth-doped lead phosphate glasses // *Applied Physics B*. 2014. V. 116. N 4. P. 837–845. doi: 10.1007/s00340-014-5770-9
 28. Porwal N.K., Kadam R.M., Seshagiri T.K., Natarajan V., Dhobale A.R., Page A.G. EPR and TSL studies on MgB_4O_7 doped with Tm: role of BO_3^{2-} in TSL glow peak at 470K // *Radiation Measurements*. 2005. V. 40. N 1. P. 69–75. doi: 10.1016/j.radmeas.2005.04.007
 - dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, vol. 164, pp. 108382. doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108382
 18. Torres-Cortés C.O., Hernández-Adame L., Baltazar-Raigosa A., Vega-Carrillo H.R., Rodríguez-López J.L., Pérez-Arrieta M.L. Synthesis and thermoluminescent response to γ -rays and neutrons of $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy}$ and $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy,Na}$. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, vol. 147, pp. 159–164. doi: 10.1016/j.apradiso.2019.03.001
 19. Bazarov B.G., Shendrik R.Yu., Tushinova Yu.L., Sofich D.O., Bazarova J.G. Spectral-luminescent properties of terbium-containing zirconomolybdates. *Condensed Matter and Interphases*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 197–203. doi: 10.17308/kcmf.2020.22/2831
 20. Osadchenko A.V., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Vashchenko A.A., Daibaga D.S., Ryzhov A.V., et al. Electroluminescence of new coordination compounds of europium ions with β -diketones, acetic and butyric acids. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 570–576. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-570-576
 21. Daibaga D.S., Ovchinnikov O.V., Smirnov M.S., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Osadchenko A.V., et al. Temporal dynamics of exciton and recombination luminescence in CdTe/SiO_2 (core/shell) quantum dots. *Inorganic Materials*, 2024, vol. 60, no. 11, pp. 1307–1312. doi: 10.1134/s0020168525700049
 22. Oza A., Ojha V., Dhale S.A., Dhoble S.J. Photoluminescence and thermoluminescence in Dy^{3+} -, Ce^{3+} -, and Tb^{3+} -activated MgB_4O_7 phosphor for dosimetry application. *Luminescence*, 2022, vol. 37, no. 9, pp. 1563–1574. doi: 10.1002/bio.4332
 23. Cavalli E. Optical spectroscopy of Dy^{3+} in crystalline hosts: general aspects, personal considerations and some news. *Optical Materials: X*, 2019, vol. 1, pp. 100014. doi: 10.1016/j.omx.2019.100014
 24. Zhang X., Zhang Z., Seo H.J. Photoluminescence and time-resolved luminescence spectroscopy of novel $\text{NaBa}_4(\text{BO}_3)_3:\text{Tb}^{3+}$ phosphor. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, no. 14, pp. 4875–4877. doi: 10.1016/j.jallcom.2011.01.195
 25. Kuboniwa S., Hoshina T. Luminescent properties of Tb^{3+} in oxygen-dominated compounds. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1972, vol. 32, no. 4, pp. 1059–1068. doi: 10.1143/JPSJ.32.1059
 26. Grigorjevaite J., Ezerskyte E., Páterek J., Saitzek S., Zabaliute-Karaliune A., Vitta P., et al. Luminescence and luminescence quenching of $\text{K}_2\text{Bi}(\text{PO}_4)(\text{MoO}_4):\text{Sm}^{3+}$ phosphors for horticultural and general lighting applications. *Materials Advances*, 2020, vol. 1, no. 5, pp. 1427–1436. doi: 10.1039/D0MA00369G
 27. Pisarska J., Softys M., Żur L., Pisarski W.A., Jayasankar C.K. Excitation and luminescence of rare earth-doped lead phosphate glasses. *Applied Physics B*, 2014, vol. 116, no. 4, pp. 837–845. doi: 10.1007/s00340-014-5770-9
 28. Porwal N.K., Kadam R.M., Seshagiri T.K., Natarajan V., Dhobale A.R., Page A.G. EPR and TSL studies on MgB_4O_7 doped with Tm: role of BO_3^{2-} in TSL glow peak at 470K. *Radiation Measurements*, 2005, vol. 40, no. 1, pp. 69–75. doi: 10.1016/j.radmeas.2005.04.007

Автор

Захарчук Иван Александрович — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, zakharchukwork@mail.ru

Author

Ivan A. Zakharchuk — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, zakharchukwork@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.06.2026
Одобрена после рецензирования 31.07.2026
Принята к печати 24.09.2026

Received 22.06.2026
Approved after reviewing 31.07.2026
Accepted 24.09.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»