

УДК 546:54.057

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-4-19-27>

## ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ОКСИДА ЭРБИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЛАНТАНОМ

**Е. Н. ПОДДЕНЕЖНЫЙ, Н. Е. ДРОБЫШЕВСКАЯ, А. А. БОЙКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**В. С. УРБАНОВИЧ**

*Государственное объединение «Научно-практический центр  
Национальной академии наук Беларуси  
по материаловедению», г. Минск*

**С. В. ГРИГОРЬЕВ**

*Научно-технологический парк «Политехник»  
Белорусского национального технического  
университета, г. Минск*

*Изучены особенности формирования нанокристаллических порошков оксида эрбия с добавкой оксида лантана методом термохимического синтеза (горения), предназначенных для получения высокоплотной керамики. Исходниками для синтеза являлись азотнокислые соли эрбия и лантана, а в качестве диспергирующего агента для разделения агломератов использовали поливиниловый спирт. Легирующую и спекающую добавку – оксид лантана  $La_2O_3$  – вводили в исходный состав в виде нитрата лантана. Исследования морфологических и структурных характеристик порошков с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа показали, что образцы порошков  $Er_2O_3 : La$ , прокаленные при 850 °С, имеют квазисферическую форму частиц с размерами 21–28 нм, а термическая обработка порошков при 1100 °С в воздушной атмосфере способствует росту частиц до 76–103 нм и их агломерации. Показано, что наноструктурированные порошки  $Er_2O_3 : La$ , полученные методом термохимических реакций и прокаленные при 850 °С, интенсивно люминесцируют в ИК-области с центром на 1533,6 нм при возбуждении на 519 нм, а спектр люминесценции имеет форму, типичную для кристаллической матрицы.*

**Ключевые слова:** лантаноиды, нанокристаллические порошки, оксид эрбия, легирование, лантан, термохимический синтез.

**Для цитирования.** Особенности термохимического синтеза нанокристаллических порошков оксида эрбия, легированного лантаном / Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 19–27. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-4-19-27>

## FEATURES OF THERMOCHEMICAL SYNTHESIS OF NANOCRYSTALLINE POWDERS OF LANTHANUM-ALLOYED ERBIUM OXIDE

**E. N. PODDENEZHNYI, N. E. DROBYSHEVSKAYA, A. A. BOIKA**

*Sukhoi State Technical University of GomeI,  
the Republic of Belarus*

**V. S. YRBA NOVICH**

State association “Scientific and Practical Center for Materials of National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk

**S. V. GRIGORIEV**

Science And Technology Park “Polytechnic” of Belarusian National Technical University, Minsk

The article describes the studied features of formation of nanocrystalline powders of erbium oxide with the addition of lanthanum oxide by the method of thermochemical synthesis (combustion), intended for obtaining high-density ceramics. The sources for synthesis were nitrate salts of erbium and lanthanum, and polyvinyl alcohol was used as a dispersing agent for separating agglomerates. The alloying and sintering additive – lanthanum oxide  $La_2O_3$  – was introduced into the initial composition in the form of lanthanum nitrate. Studies of the morphological and structural characteristics of the powders using scanning electron microscopy and X-ray phase analysis showed that the  $Er_2O_3 : La$  powder samples calcined at 850 °C have a quasi-spherical particle shape with sizes of 21–28 nm, and heat treatment of the powders at 1100 °C in an air atmosphere promotes particle growth to 76–103 nm and their agglomeration.

It is shown that nanostructured  $Er_2O_3 : La$  powders obtained by thermochemical reactions and calcined at 850 °C luminesce intensely in the IR-area centered at 1533.6 nm upon excitation at 519 nm, and the luminescence spectrum has a shape typical for a crystalline matrix.

**Keywords:** lanthanides, nanocrystalline powders, erbium oxide, alloying, lanthanum, thermochemical synthesis.

**For citation.** Poddenezhnyi E. N., Drobyshevskaya N. E., Boiko A. A., Urbanovich V. S., Grigoriev S. V. Features of thermochemical synthesis of nanocrystalline powders of lanthanum-alloyed erbium oxide. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 4 (99), pp. 19–27 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-4-19-27>

**Введение**

Оптически прозрачная керамика на основе оксидов лантаноидов, допированная ионами редкоземельных элементов, является перспективной для использования в качестве активной среды твердотельных лазеров, люминесцентных преобразователей, сцинтилляторов, благодаря высоким оптическим и термомеханическим характеристикам [1, 2].

Для получения эффективной генерации излучения, высокой квантовой эффективности люминесценции требуется высокое оптическое качество керамики и тонкая микроструктура, которую может обеспечить применение наноразмерных порошков оксидов лантаноидов [3].

Размер частиц таких порошков должен быть не более 100 нм, распределение по размерам близко к монодисперсному, не допускается присутствие жестких агломератов. Важным требованием к порошкам для спекания оптической керамики является также их высокая чистота и однородность [4, 5].

Оксид эрбия является перспективной матрицей для создания лазеров и волоконных оптических усилителей путем введения активных ионов лантаноидов в связи с наличием у него отличных физических свойств, таких как оптическая прозрачность в широком диапазоне спектра, высокая температура плавления (2380 °C), большая ширина запрещенной зоны, высокая теплопроводность [6, 7].

Большинство известных способов получения наноразмерных легированных порошков оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ), в том числе оксида эрбия, основано на процессах осаждения карбонатных или оксалатных прекурсоров из водных растворов солей, отделения осадка от маточного раствора, промывки, сушки в воздушной среде и прокаливания при высоких температурах [8, 9].

В работе [10] описаны люминесцентные свойства прозрачной керамики  $Er_2O_3$ , сформированной из наноразмерных порошков, полученных методом осаждения из слоистых прекурсоров. Был установлен эффект ап-конверсии при облучении лазерным диодом на длине волны 980 нм в излучение на 684 нм. Однако вследствие пористости керамики не

была достигнута максимальная прозрачность в ближней ИК-области спектра (73 % на 1100 нм). Такие особенности методов осаждения, как большие объемы используемых осадителей и промывочных жидкостей, многократные промывки приводят к загрязнению получаемых люминофоров нежелательными примесями, кроме того, порошки содержат гидратированные комплексы с молекулами воды и гидроксильными группами, которые снижают эффективность люминесценции.

Получение наноразмерного порошка оксида эрбия золь-гель методом, несмотря на свою простоту, имеет и недостатки [11]. Сущность метода заключается в следующем. Нитрат эрбия растворяют в этаноле и осаждают гидратированный оксид смесью аммиака и этанола при доведении рН смеси до нейтрального значения. Затем смесь нагревают до 50 °С до полного высушивания и выдерживают 24 ч в эксикаторе, осадок обжигают при температуре 600 °С, далее порошок размалывают для применения в формовании керамики под высоким давлением. В этом варианте имеется необходимость операции дробления спекшегося порошка, что приводит к загрязнению конечного продукта нежелательными примесями.

Перспективным методом получения нанопорошков оксидов РЗЭ является метод термохимических реакций (метод горения) [12, 13]. Преимущество этого варианта состоит в простоте технологического оснащения, вариабельности состава прекурсоров, а в перспективе – возможности промышленного производства. Сущность метода – термическое инициирование химической реакции в смеси нитратов металлов (окислитель) с «топливом» (органические кислоты, мочевины, глицин и пр.), в результате чего смесь воспламеняется, образуя твердую пену, состоящую из наноразмерных частиц [13].

Одним из эффективных способов получения высокоплотной оптической керамики, в частности, для применения в лазерной технике, является вакуумное спекание нанодисперсных порошков оксидов лантаноидов с использованием добавок, иницирующих процесс консолидации частиц. Эффективной примесью, не влияющей на оптические и физико-механические характеристики керамики из оксида эрбия, является оксид лантана.

Известно несколько вариантов введения примеси лантана в состав оксида эрбия, например, в патенте [14] описан способ получения оксидов системы Er–Y–La, заключающийся в том, что оксиды эрбия, иттрия и лантана размалывают совместно в шаровой мельнице в среде спирта в течение 5 ч, затем полученный прекурсор высушивают и подвергают прокаливанию при температуре 1200 °С в течение 10 ч, далее повторно размалывают в графитовом контейнере и просеивают через сито с ячейкой 40 мкм. Недостатками такого способа является невозможность получения наноразмерных порошков, а также необходимость проведения нескольких операций размола, что может приводить к загрязнению конечного продукта.

В работе [15] описана методика получения прозрачной керамики на основе оксида эрбия из субмикронных порошков, синтезируемых термохимическим методом с использованием нитратов и глицина ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ ) в качестве горючего (восстановителя). Для иницирования спекания частиц керамики использовали оксид лантана разной концентрации ( $\text{Er}_{1-x}\text{La}_x$ )<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (где  $x = 0; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1$ ). Вначале азотнокислые соли эрбия и лантана были получены путем растворения соответствующих оксидов в стехиометрических количествах в разбавленной азотной кислоте при нагревании. Осадки были затем прокалены при 1100 °С, растворены в воде и смешаны с соответствующим количеством глицина в молярном соотношении 1:1. Глицин-нитратная смесь далее загружалась в кварцевый стакан и помещалась в печь, нагретую до 300 °С. При нагреве в стакане иницируется окислительно-восстановительная реакция и в результате формируется тонкодисперсный порошок розового цвета. Процесс горения сопровождается интенсивным выделением газов. Для достижения полного окисления, удаления органических продуктов и воды смесь в стакане нагревается при температуре 900 °С в течение 30 мин. В ре-

зультате были получены порошки различных составов: 3 % La : Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5 % La : Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 7 % La : Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 10 % La : Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Прозрачная керамика была получена методом вакуумного спекания предварительно уплотненных дисковых заготовок диаметром 15 мм при давлении 300 МПа. Спекание проводили в вакууме 10<sup>-2</sup> Па при температуре 1780 °С со скоростью подъема 10 °С в мин и с выдержкой 3 ч при максимальной температуре. Наилучшие образцы керамики получены для состава 5 % La : Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, для которых оптическое пропускание составило 81,3 % на длине волны 1,8 мкм для образцов толщиной 1 мм, микротвердость – 8,6 GPa, модуль упругости – 190 GPa, а теплопроводность – 6 Вт/м · К при 298 К.

Цель настоящего исследования – разработка нового метода термохимического синтеза наноразмерных кристаллических порошков оксидов лантаноидов, в частности, оксида эрбия Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, легированного оксидом лантана La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, – добавкой, предназначенной для активации процесса спекания при формовании прозрачной керамики.

### Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов использовали следующие соли: эрбий азотнокислый 5-водный (ТУ 6-09-4676-78, х. ч., РФ), лантан азотнокислый 6-водный (ТУ 6-09-4676-83, х. ч., РФ). Окислителем служила уксусная кислота ледяная CH<sub>3</sub>COOH (ГОСТ 61-75, х. ч., РФ), а гелеобразующим и диспергирующим агентом – поливиниловый спирт (ПВС) марки 16/1 (ГОСТ 10779-78, РФ).

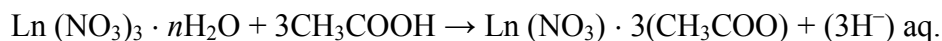
Для исследования фазового состава композитов использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-7 с излучением CuK<sub>α</sub>. Электронно-микроскопические исследования проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа S-4800 Hitachi (Япония). Спектры люминесценции снимали на спектрофлуориметре Fluorolog-3 (HORIBA Scientific, USA).

Процесс получения наноразмерного оксида эрбия, легированного лантаном, осуществляют следующим образом.

Ингредиенты в соотношении: 5,0 г Er(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 5H<sub>2</sub>O; 0,3 г La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O; 7,0 мл уксусной кислоты ледяной CH<sub>3</sub>COOH; 0,2 г ПВС 16/1 перемешивают и выливают смесь в термостойкую неметаллическую емкость – выпарительную чашку № 4 фарфоровую, сушку производят в сушильном шкафу СНОЛ-3,5 при температуре 75–85 °С в течение 60–90 мин при помешивании. Концентрируют раствор до состояния вязкого геля (1,5 ч). Затем выпарительную чашку с гелем помещают в муфельную печь СНОЛ1.6.2.5.1/13 и поднимают температуру до 850 °С со скоростью 250 град/ч. В печи под воздействием быстрого нагрева проходит термохимическая реакция синтеза и сгорание ПВС, полученный продукт (прекурсор) выдерживается в чаше при температуре 850 °С в течение 1 ч. За время выдержки удаляются остаточные молекулы воды, выгорают органические остатки.

### Обсуждение результатов

В результате химической реакции при нагреве смеси солей эрбия и лантана и уксусной кислоты образуются хелатные ацетатонитратные комплексы лантаноидов (Ln) [16]:



При температуре 85–95 °С, формируется гелеобразный прекурсор, при нагреве которого в печи происходит инициирование окислительно-восстановительных реакций между нитратными и ацетатными группами, что приводит к воспламенению ацетатонитратов с образованием гидратированных оксидов эрбия и лантана. Таким образом, при горении смеси нитратов, уксусной кислоты и ПВС развивается температура, достаточная для синтеза соединения Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и вхождения ионов лантана в решетку оксида эрбия.

В результате получают рассыпчатый тонкодисперсный порошок оксида эрбия, легированный лантаном, розового цвета с размерами первичных частиц от 21 до 28 нм, не тре-

бующий дополнительного размола (рис. 1, а). Длительность всего процесса получения наноразмерного порошка составляет около 8 ч. Далее полученный порошок прокаливают в печи при температуре 1100 °С со скоростью 250 град/ч и выдерживают образец в течение 1 ч.

Из анализа СЭМ-изображения прокаленного порошка видно, что термическая обработка вызывает спекание отдельных частиц (агломерацию) и укрупнение частиц до 76–103 нм (рис. 1, б).

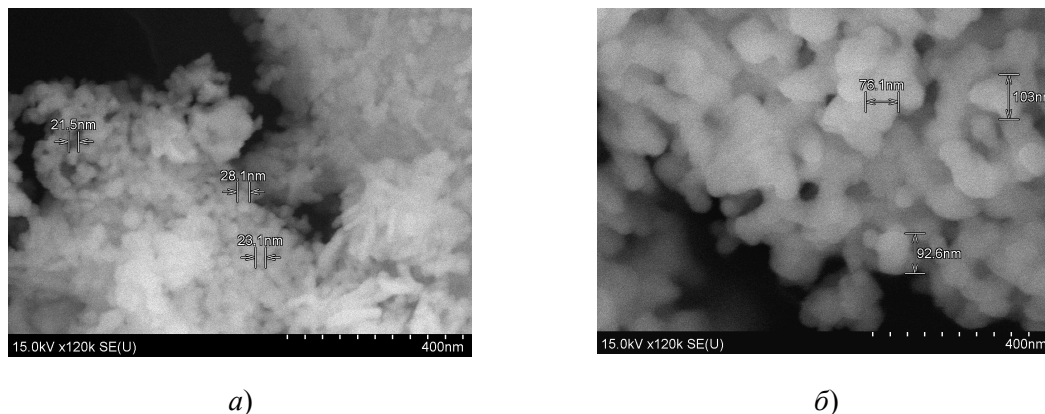


Рис. 1. Морфология порошков  $\text{Er}_2\text{O}_3 : \text{La}$ :  
а – прокаленных при 850 °С; б – прокаленных при 1100 °С

Рентгенофазовый анализ (РФА) применяли с целью определения фазового состава исследуемых образцов. Дифрактограммы образцов порошка  $\text{Er}_2\text{O}_3 : \text{La}$ , полученного горением в смеси нитрата эрбия, лантана, уксусной кислоты и ПВС при температурах прокаливания 850 и 1100 °С, приведены на рис. 2.

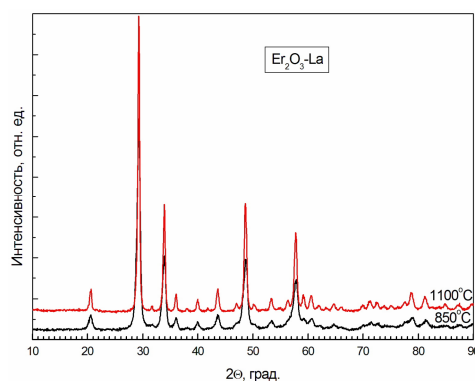


Рис. 2. Дифрактограмма порошков  $\text{Er}_2\text{O}_3 : \text{La}$ , полученных методом горения и прокаленных при 850 и 1100 °С

Данные анализа РФА-спектров подтверждают, что в процессе горения формируется основная фаза –  $\text{Er}_2\text{O}_3$  в соответствии с международной порошковой базой данных JCPDF (карточка № 77-0777), но с уширенными рефлексами, соответствующими наноразмерному состоянию кристаллической структуры. Из рассмотрения рис. 2 видно, что наноразмерные порошки, прокаленные при температурах 850 и 1100 °С, имеют идентичные рефлексы, однако интенсивность пиков образцов, полученных после дополнительной термообработки, выше примерно на 20 %. Этот эффект связан с более высокой кристаллическостью прокаленных порошков, увеличением размеров кристаллитов. Структура синтезированных наноструктурированных порошков  $\text{Er}_2\text{O}_3 : \text{La}$ , полученных методом

термохимических реакций, соответствует кристаллической фазе порошков, получаемых методом осаждения [5] (рис. 3). Рефлексы, соответствующие формированию кристаллической фазы  $\text{La}_2\text{O}_3$ , на дифрактограммах не фиксируются вследствие малой концентрации примеси.

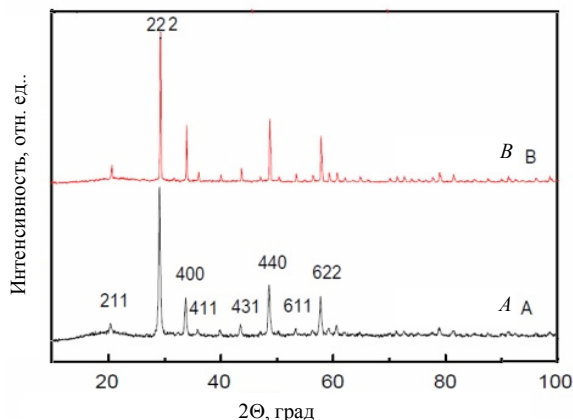


Рис. 3. Дифрактограммы наноразмерных порошков  $\text{Er}_2\text{O}_3$  со средними размерами частиц 26 (А) и 56 нм (В) по литературным данным [5]

Спектрально-люминесцентные исследования порошков  $\text{Er}_2\text{O}_3 : \text{La}$ , прокаленных при температуре 850 °С, проводились при возбуждении в видимой области спектра ( $\lambda_{\text{возб}} = 519 \text{ нм}$ ) при комнатной температуре. Из рис. 4 видно, что образцы  $\text{Er}_2\text{O}_3 : \text{La}$  люминесцируют в ИК-области с центром на 1533,6 нм. График демонстрирует спектр люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  в переходе  $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  при возбуждении в полосе  $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^2\text{H}_{11/2}$ . Спектр люминесценции наноразмерных порошков  $\text{Er}_2\text{O}_3 : \text{La}$  имеет форму, типичную для кристаллической матрицы.

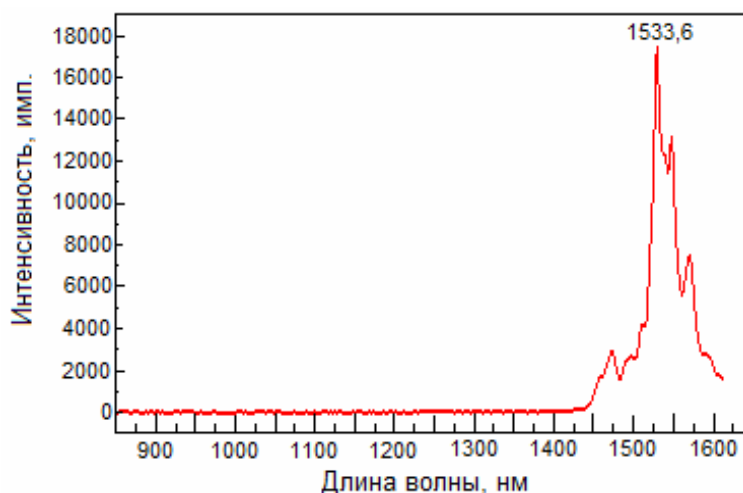


Рис. 4. Спектр люминесценции порошков  $\text{Er}_2\text{O}_3 : \text{La}$ , при возбуждении на длине волны 519 нм

Таким образом, при использовании смеси нитратов эрбия, лантана, уксусной кислоты и ПВС в процессе термохимического синтеза формируются дезагломерированные наноразмерные порошки оксида эрбия, легированного лантаном, что позволяет исключить операцию размола, снизить температуру прокаливания, уменьшить длительность процесса получения оксидов лантаноидов с заданными характеристиками [17].

### Заключение

В результате обобщения вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. С использованием метода горения получены нанокристаллические порошки оксида эрбия, легированные лантаном. Уксусная кислота применялась в качестве горючего, а ПВС – в качестве химического диспергирующего агента.

2. На основе анализа СЭМ и РФА полученных материалов показано, что образцы оксида эрбия, легированного лантаном, представляют собой дезагломерированные порошки с размерами первичных частиц в диапазоне 21–28 нм (850 °С), а прокаливание при 1100 °С приводит к укрупнению частиц до 76–103 нм.

3. Установлено, что образцы, синтезированные методом горения нитратов в уксусной кислоте в смеси с ПВС, люминесцируют в ИК-области при возбуждении на 519 нм, причем спектр излучения для образцов, прокаленных при 850 °С, имеет форму, типичную для кристаллической матрицы.

*Исследования проведены в рамках выполнения задания 2.8 Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 гг. в Республике Беларусь.*

### Литература

1. Transparent Ceramics / L. B. Kong, Y. Huang, W. Que [et al.] // Springer International Publishing, Switzerland, 2015. – 734 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18956-7>
2. Materials development and potential applications of transparent ceramics / Z. Xiao, S. Yu, Y. Li [et al.] // Materials Science & Engineering R. – 2020. – Vol. 139. – P. 1–66. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2019.100518>
3. Submicro-grained Yb : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics with lasing quality / D. Yin, J. Ma, P. Liu [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. – 2019. – Vol. 102 (5). – P. 2587–2592. – <https://doi.org/10.1111/jace.16105>
4. Прозрачная керамика на основе оксида иттрия с добавкой оксида эрбия для лазерной техники / Н. А. Макаров, Д. О. Лемешев, К. И. Иконников, Л. Ф. Макаревич // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – Т. 25, № 6. – С. 28–31.
5. Состав и магнитные свойства наноструктурированных оксидов эрбия / М. Н. Абдусалямова, Х. Б. Кабгов, Ф. С. Шаропов, Ю. М. Шульга // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2012. – N 08 (112). – С. 66–70.
6. Pressure-Induced Cubic to Monoclinic Phase Transformation in Erbium Sesquioxide Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Q. Guo, Y. Zhao, C. Jiang [et al.] // Inorg. Chem. – 2007. – Vol. 46, N 15. – P. 6164–6169. <https://doi.org/10.1021/ic070154g>
7. Урбанович, В. С. Получение керамики на основе оксидов эрбия и иттербия спеканием под высоким давлением / В. С. Урбанович, С. В. Леончик, В. Д. Живулько [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2023. – № 4 (95). – С. 61–69.
8. Characterization and Electrical Conductivity of Nano-Crystalline Erbium Sesquioxide by the Precipitation Method and Subsequent Calcination / M. A-Z. Bahaa, A. M. Asiri, M. A. Hussein // Int. J. Electrochem. Sci. – 2016. – Vol. 11. – P. 7182–7197.
9. Properties of Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles synthesized by a modified co-precipitation method / J. Castaneda-Contreras, A. Meneses, H. P. L. Guevara, V. Marañon // Revista Mexicana de Fisica. – 2015. – Vol. 61, № 34. – P. 127–131.
10. Fabrication and upconversion luminescence of novel transparent Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics / L. Wang, B. Lu, X. Liu [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. – 2020. – Vol. 40, N 4. – P. 1767–1772. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.048>
11. Azad, F. Fabrication, Structural Characterization, Dielectric and Electrical Parameters of the Synthesized Nano-Crystalline Erbium Oxide / F. Azad, A. Maqsood // Electron. Mater. Lett. – 2014. – Vol. 10, N 3. – P. 557–563. <https://doi.org/10.1007/s13391-013-3195-y>

12. Mukasyan, A. S. Solution combustion synthesis of nanomaterials / A. S. Mukasyan, P. Epstein, P. Dinka // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – Vol. 31, N 2. – P. 1789–1795.
13. Elif Emil-Kaya, Srečko Stopić, Sebahattin Gurmen and Bernd Friedrich Production of rare earth element oxide powders by solution combustion: a new approach for recycling of NdFeB magnets // *RSC Advances*. – 2022. – N 12 (48). – P. 31478–31488. <https://doi.org/10.1039/D2RA05876F>
14. Patent CN № 101113009A, Int.Cl. C01F 17/00. Preparation method of rare earth oxide nanoparticles: publ. date 30.01.2008.
15. Fabrication and characterizations of erbium oxide based optical ceramics / S. S. Balabanov, M. Ivanov, S. Filofeev [et al.] // *Optical Materials*. – 2020. – Vol. 101. – Article 109732. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109732>
16. Получение наноразмерных порошков оксида иттрия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / С. С. Балабанов, В. В. Дроботенко, Е. М. Гавришук, Д. А. Пермин // *Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского*. – 2011. – № 2. – С. 91–97.
17. Патент 24201 Респ. Беларусь, МПК С 09К 11/78, В22F9/20, В 82У 40. Способ получения наноразмерного порошка оксида эрбия, легированного лантаном : № а20220050 : заявл. 2022.03.09 : опубл. 28.02.2024 / Бойко А. А., Подденежный Е. Н., Дробышевская Н. Е. ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого.

### References

1. Kong L. B., Huang Y., Que W., Zhang T., Li S., Zhili D., Tang D. Transparent Ceramics. *Springer International Publishing Switzerland*, 2015, 734 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18956-7>
2. Xiao Z., Yu S., Li Y., Ruan S., Kong L. B., Huang Q., Huang Z., Zhou K., Su H., Yao Z., Que W., Liu Y., Zhang T., Wang J., Liu P., Shen D., Allix M., Zhang J., Tang D. Materials development and potential applications of transparent ceramics. *Materials Science & Engineering R*, 2020, vol. 139, pp. 1–66. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2019.100518>
3. Yin D., Ma J., Liu P., Yao B., Wang J., Dong Z., Kong L. B., Tang D. Submicron-grained Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics with lasing quality. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, vol. 102 (5), pp. 2587–2592. <http://doi.org/10.1111/jace.16105>
4. Makarov N. A., Lemeshev D. O., Ikonnikov K. I., Makarevich L. F. Prozrachnaya keramika na osnove oksida ittriya s dobavkoi oksida erbiya dlya lazernoi tehniky. *Uspehi v himii i himicheskoi tehnologii = Advances in chemistry and chemical technology*, 2011, vol. 25, no. 6, pp. 28–31 (in Russian).
5. Abdusalomova M. N., Kabov H. B., Sharapov F. S., Shulga Y. M. Sostav i magnitnie svoystva nanostrukturirovannykh oksidov erbiya. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2012, no. 08 (112), pp. 66–70 (in Russian).
6. Guo Q., Zhao Y., Jiang C., Mao W. L., Wang Z., Zhang J., and Wang Y. Pressure-Induced Cubic to Monoclinic Phase Transformation in Erbium Sesquioxide Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Inorganic chemistry*, 2007, vol. 46, no. 15, pp. 6164–6169. <https://doi.org/10.1021/ic070154g>
7. Urbanovich V. S., Leonchik S. V., Jivulko V. D., Shloma E. N., Grigorev S. V., Poddenejnyi E. N., Lavish E. O., Niss V. S. Poluchenie keramiki na osnove oksidov erbiya i itterbiya spekaniem pod vysokim davleniem. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta imeni P. O. Suhogo*, 2023, no. 4, pp. 61–69 (in Russian).
8. Bahaa M. A-Z., Aspirin A. M., Hussein M. A. Characterization and Electrical Conductivity of Nano-Crystalline Erbium Sesquioxide by the Precipitation Method and Subsequent Calcination. *International Journal of Electrochemical Science*, 2016, vol. 11, pp. 7182–7197.
9. Castaneda-Contreras J., Meneses A., Guevara H. P. L., Marañón V. Properties of Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles synthesized by a modified co-precipitation method. *Revista Mexicana de Física*, 2015, vol. 61, no. 3/4, pp. 127–131.



10. Wang L., Lu B., Liu X., Shi Y., Li J., Liu Y. Fabrication and upconversion luminescence of novel transparent Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40 (4), pp. 1767–1772. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.048>.
11. Azad F., Maqsood A. Fabrication, Structural Characterization, Dielectric and Electrical Parameters of the Synthesized Nano-Crystalline Erbium Oxide. *Electron. Mater. Lett.* 2014, vol. 10, no. 3. pp. 557–563. <https://doi.org/10.1007/s13391-013-3195-y>.
12. Mukasyan A. S., Epstein P., Dinka P. Solution combustion synthesis of nanomaterials. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, vol. 31, no. 2, pp. 1789–1795.
13. Emil-Kaya E., Stopic S., Sand G., Friedrich B. Production of rare earth element oxide powders by solution combustion: a new approach for recycling of NdFeB magnets. *RSC Advances*, 2022, vol. 12, no. 48, pp. 31478–31488. <https://doi.org/10.1039/D2RA05876F>
14. *Preparation method of rare earth oxide nanoparticles*. Patent CN no. 101113009A. Publ. date 30 January 2008.
15. Balabanov S., Filofeev S., Ivanov M., Kaigorodov A., Krugovykh A., Kuznetsov D., Permin D., Popov P., Rostokina E. Fabrication and characterizations of erbium oxide based optical ceramics. *Optical Materials*, 2020, vol. 101, pp. 109732–109738. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109732>
16. Balabanov S. S., Drobotenko V. V., Gavrischuk E. M., Permin D. A. Poluchenie nanorazmernih poroshkov oksida ittriya metodom samoracprostranyayuschegosya visokotemperaturnogo sinteza. *Vestnik Nijegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo = Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky*, 2011, no 2, pp. 91–97 (in Russian).
17. Boiko A. A., Poddeneznyi E. N., Drobyshevskaya N. E. *Sposob polucheniya nanorazmernogo poroshka oksida erbiya legirovannogo lantanom*. Patent Respublika Belarus' no. 24201. Publ. date 28 February 2024 (in Russian).

Поступила 15.10.2024