

УДК 546:54.057

DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-39-49

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$ И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СТРУКТУРНЫХ, МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

**Е. Н. ПОДДЕНЕЖНЫЙ, Н. Е. ДРОБЫШЕВСКАЯ,  
А. А. БОЙКО, О. С. НЕВЗОРОВА**

*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*

*Наноструктурированные порошки оксида лютеция, легированного ионами эрбия, получены методом термохимического синтеза (горения) и являются перспективными для формирования лазерной керамики и сцинтилляторов. Источниками для синтеза были взяты азотнокислые соли лютеция и эрбия, полученные путем растворения оксидов лютеция и эрбия в азотной кислоте. В качестве комплексообразователя и горючего-восстановителя использована уксусная кислота, а диспергирующим агентом, применяемым для разделения агломератов, – поливиниловый спирт. Исследования морфологических и структурных характеристик с использованием методов сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показали, что образцы порошков  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$ , прокаленных при 850 °С, имеют квазисферическую форму частиц с размерами 48–86 нм. Показано, что полученные порошки проявляют интенсивную люминесценцию в видимой и ИК-областях спектра с центрами на 560 и 1530 нм при возбуждении на длине волны 378 нм.*

**Ключевые слова:** лантаноиды, наноструктурированные порошки, оксид лютеция, легирование, ионы эрбия, термохимический синтез.

**Для цитирования.** Получение наноструктурированных порошков  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$  и изучение их структурных, морфологических и спектрально-люминесцентных характеристик / Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 1 (104). – С. 39–49. – DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-39-49

## OBTAINING NANOSTRUCTURED POWDERS $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$ AND STUDYING THEIR STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL AND SPECTRAL-LUMINESCENT CHARACTERISTICS

**E. N. PODDENEZHNY, N. E. DROBYSHEVSKAYA,  
A. A. BOIKA, O. S. NEVZOROVA**

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

**V. S. URBANOVICH**

*State Scientific and Production Association “Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk*

*Nanostructured lutetium oxide powders doped with erbium ions were obtained by thermochemical synthesis (combustion) and are promising for the formation of laser ceramics and scintillators. The starting materials for the synthesis were nitrate salts of lutetium and erbium, obtained by dissolving lutetium and erbium oxides in nitric acid. Acetic acid was used as a complexing agent and a combustible-reducing agent, and polyvinyl alcohol was used as a dispersing agent for separating agglomerates. Studies of the morphological and structural characteristics using scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis, and energy-dispersive X-ray spectroscopy showed that  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$  powder samples calcined at 850 °C, have a quasi-spherical particle shape with sizes of 48–86 nm. It was shown that the obtained powders exhibit intense luminescence in the visible and IR spectral regions with centers at 560 and 1530 nm with excitation at the wavelength of 378 nm.*

**Keywords:** lanthanides, nanostructured powders, lutetium oxide, doping, erbium ions, thermochemical synthesis.

**For citation.** Poddenezhny E. N., Drobyshevskaya N. E., Boyka A. A., Nevzorova O. S., Urbanovich V. S. Obtaining nanostructured powders  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$  and studying their structural, morphological and spectral-luminescent characteristics. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 1 (104), pp. 39–49 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-39-49

**Введение**

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

По сравнению с традиционными лазерными материалами, такими как монокристаллы, прозрачная керамика, легированная ионами РЗЭ, обладает высокой концентрацией легирующей добавки. Кроме того, в соответствии с существующими технологиями могут быть получены крупноразмерные заготовки и достигнута высокая мощность лазерного излучения [3–5].

Оксид лютеция  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  имеет кубическую кристаллическую структуру биксбиита, которая принадлежит к пространственной группе  $Ia\bar{3}$ , имеет большую ширину запрещенной зоны (около 6,5 эВ), что обеспечивает высокий уровень излучения различных видов активных легирующих ионов и, таким образом, является хорошим люминесцентным материалом-носителем. Теплопроводность  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  составляет 12,5 Вт/мК, и, следовательно, матрица обладает высокой устойчивостью к тепловому удару. В то же время по сравнению с широко используемой лазерной керамикой на основе иттрий-алюминиевого граната (YAG) керамика на основе  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  имеет более низкий коэффициент теплового расширения, более высокую эффективность преобразования света, короткое время сцинтилляционного отклика и большую плотность, что позволяет ей выдерживать высокоэнергетическое излучение. Кроме того, оптическая керамика на основе  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  обладает более широким диапазоном областей применения, что делает ее идеальным материалом для сцинтилляторов, мощных лазеров и короткоимпульсных лазеров со средним коэффициентом усиления [6–9].

Традиционные методы получения лазерных монокристаллов оксида лютеция сопряжены со значительными сложностями, прежде всего из-за высокой температуры плавления  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  (2450 °C). Использование керамического подхода к получению оптических материалов на основе  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  позволяет существенно снизить температуру

термообработки, управлять составом матрицы, увеличивать концентрацию легирующего компонента в материале и создавать образцы с заданным концентрационным профилем [10–12].

В статье [14] сообщается о получении аналогичной керамики, легированной ионами  $\text{Er}^{3+}$  с концентрациями 5, 10, 11 и 15 ат. %, приводится оценка ее оптических свойств и генерационных характеристик. В результате показано, что для керамического лазера с концентрацией  $\text{Er}^{3+}$  11 ат. %, был достигнут коэффициент полезного действия 29 % и мощность 2,3 Вт.

Несмотря на ряд достигнутых результатов по получению и исследованию лазерных свойств таких керамических материалов, до настоящего времени не удается изготавливать высококачественные заготовки на основе оксида лютеция по керамической технологии. Это связано с отсутствием систематических исследований процессов, протекающих как при синтезе исходных порошковых материалов, так и при их спекании.

Для получения эффективной генерации излучения, высокой квантовой эффективности люминесценции требуется хорошее оптическое качество керамики и тонкая микроструктура, которую может обеспечить применение наноструктурированных порошков оксидов лантаноидов [15, 16].

Большинство известных способов получения ультрадисперсных легированных порошков оксидов РЗЭ, в том числе оксида лютеция, основано на процессах осаждения карбонатных или карбамидных прекурсоров из водных растворов солей, отделения осадка от маточного раствора, промывки, сушки в воздушной среде и прокаливания при высоких температурах [17–19].

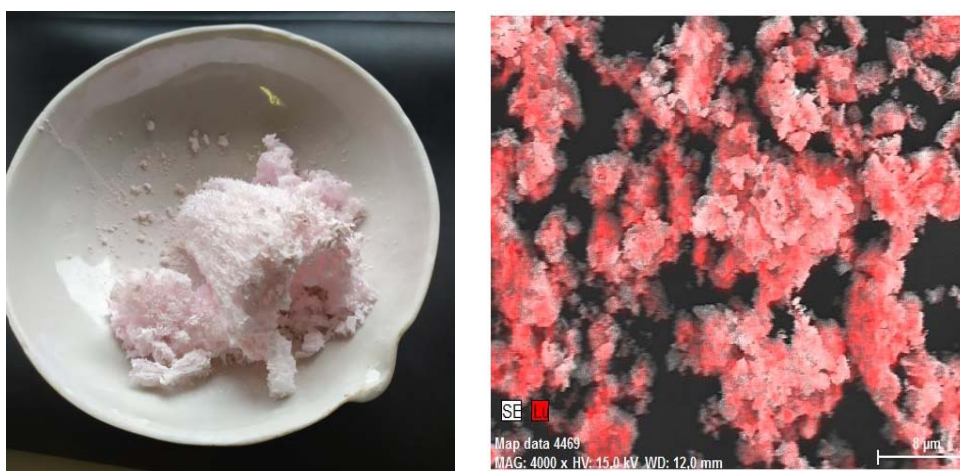
Перспективным направлением синтеза наноструктурированных порошков оксидов РЗЭ является применение термохимических реакций (метод «золь – гель – горение», самораспространяющийся высокотемпературный синтез – СВС) [20–26]. Преимущество этого направления состоит в простоте технологического оснащения, вариативности состава исходных компонентов, а в перспективе – возможности промышленного производства. Сущность его – 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 оксидных частиц.

Цель настоящей работы состоит в изучении нового метода термохимического синтеза наноструктурированных порошков оксида лютеция, легированного ионами эрбия, и исследовании их структурных, морфологических и спектрально-люминесцентных характеристик.

### **Материалы и методы исследования**

Для получения наноструктурированного оксида лютеция, легированного ионами эрбия, используют микрокристаллические порошки  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ , х. ч. и  $\text{Er}_2\text{O}_3$ . Комплексообразователем и восстановителем служила уксусная кислота ледяная  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (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  $\text{Cu}_{K\alpha}$ . Электронно-микроскопические исследования и элементный анализ (EDX) проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа S-4800 Hitachi (Япония). Спектры люминесценции снимали на спектрофлуориметре Fluorolog-3 (HORIBA Scientific, USA).

Процесс синтеза оксида лютеция, легированного эрбием ( $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$ ), осуществляют следующим образом. Взвешивают ингредиенты: 5,0 г  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ , 0,2 г  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , 20 мл  $\text{HNO}_3$  (концентрированная азотная кислота ГОСТ 11125-84, ОСЧ). Засыпают порошки в термостойкий стеклянный стакан, заливают кислотой, перемешивают и нагревают до 90–100 °С. После растворения оксидов смесь выливают в фарфоровую чашку, ставят в термошкаф и при температуре 110 °С удаляют остаточную воду. Далее чашку остужают, заливают 5,0 мл уксусной кислоты; далее засыпают 0,2 г порошка ПВС и, перемешивая смесь, упаривают ее при температуре 75–85 °С до состояния геля. Затем проводят термообработку геля в муфельной печи СНОЛ1.6.2.5.1/13 на воздухе при температуре 850 °С в течение 2 часов при скорости подъема температуры 250 °С /час. Под воздействием быстрого нагрева проходит термохимическая реакция синтеза легированного оксида лютеция и в результате получают вспененный порошкообразный продукт розового цвета (рис. 1, а).



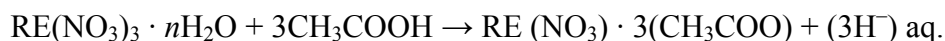
а)

б)

Рис. 1. Полученный вспененный продукт после прокаливания геля при 850 °С (2 часа):  
а – общий вид; б – СЭМ-изображение

### Обсуждение результатов

В результате химической реакции при нагреве смеси солей лютеция, эрбия и уксусной кислоты вначале образуются хелатные ацетатонитратные комплексы лантаноидов ( $\text{RE: Lu, Er}$ ) [27]:



Затем при 85–95 °С с помощью ПВС формируется гелеобразный прекурсор, при нагреве которого в муфельной печи происходит инициирование окислительно-восстановительных реакций между нитратными и ацетатными группами, что приводит к воспламенению ацетатонитратов с образованием гидратированных оксидов лютеция и эрбия. Таким образом, при горении смеси нитратов, уксусной кислоты и ПВС развивается температура, достаточная для синтеза соединения  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  и вхождения ионов эрбия в решетку оксида лютеция. Рассыпчатый агломерированный порошок не требует дополнительного размола и рассева (рис. 1, б). Длительность всего процесса получения наноструктурированного порошка составляет 8 часов.

На основе анализа данных РФА полученных порошков можно сделать заключение, что образцы, прокаленные при 850 °С, являются наноструктурированными, с четко выраженными рефlekсами, соответствующими кубической кристаллической структуре биксбиита состава  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  (каталог JCPDS № 86-2475) (рис. 2, а). Это также подтверждается литературными данными [24] для нанокристаллических порошков, на основе матрицы оксида лютетия –  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Yb}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ , полученных золь-гель методом (рис. 2, б). Средний размер области когерентного рассеяния (ОКР) первичных частиц порошка, синтезируемого в результате процесса горения с последующим прокаливанием при 850 °С (условный диаметр  $D$ ), определяется по величине уширения рентгенографического максимума для самой интенсивной полосы по формуле Шеррера [28] и составляет  $70 \pm 3$  нм.

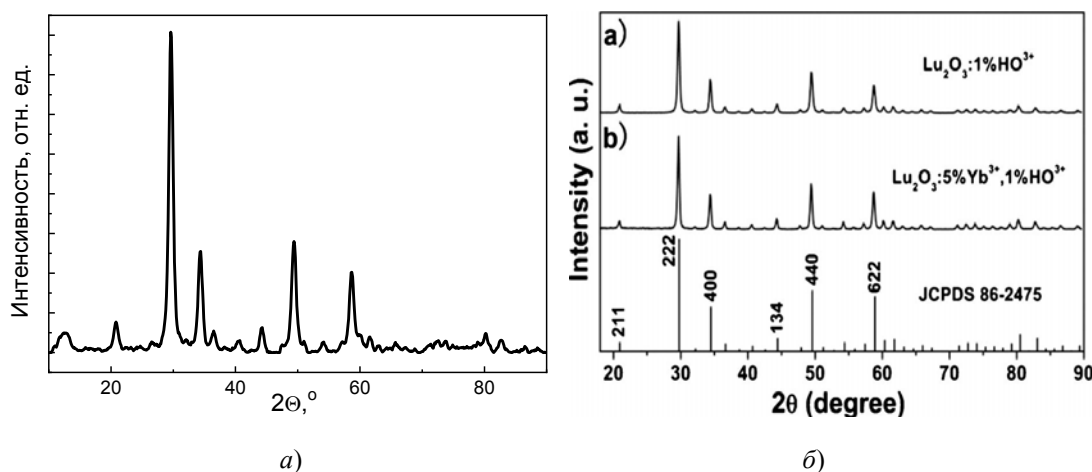


Рис. 2. Дифрактограмма полученного наноструктурированного порошка  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$  (а); дифрактограммы нанокристаллических порошков  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$  и  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Yb}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$  (б), по литературным данным [24]

Рефлексы, соответствующие легирующей примеси  $\text{Er}_2\text{O}_3$  на рентгенограмме, не фиксируются, по-видимому, в связи с ее малой концентрацией в структуре матрицы и формированием твердого раствора.

Исследования морфологии порошков с использованием метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показали, что порошки  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$ , прокаленные на воздухе, имеют квазисферическую форму частиц и являются агломерированными (рис. 3). Размеры первичных частиц порошка, получаемого в результате процесса горения с последующим прокаливанием при 850 °С, находятся в пределах 48–86 нм.

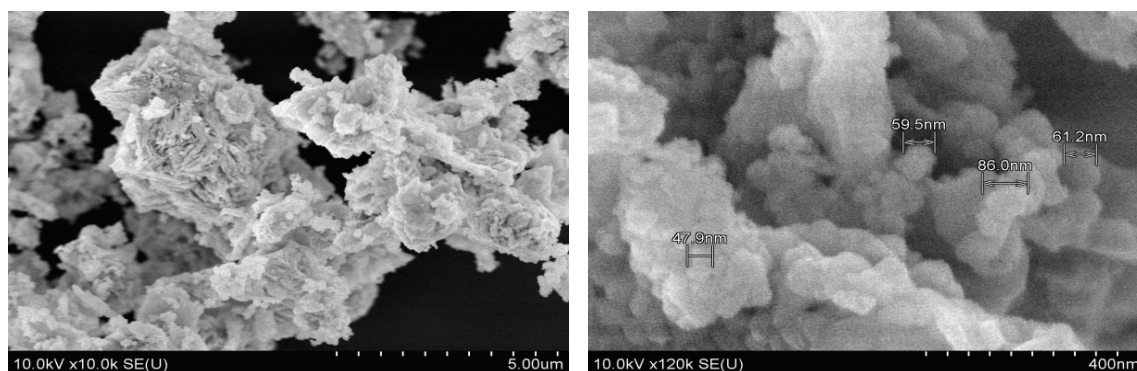


Рис. 3. СЭМ-изображение полученного наноструктурированного порошка  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$  при разном увеличении

Изучение полученных порошков методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), применяемым для определения локального химического состава фаз (рис. 4), показало наличие атомов лютеция, эрбия и кислорода в соотношении, приведенном в таблице. На основании данных EDX определена формула химического состава порошка оксида лютеция, легированного эрбием:  $(Lu_{0,98} Er_{0,2})_2O_3$ . Других примесных фаз в составе образцов не обнаружено.

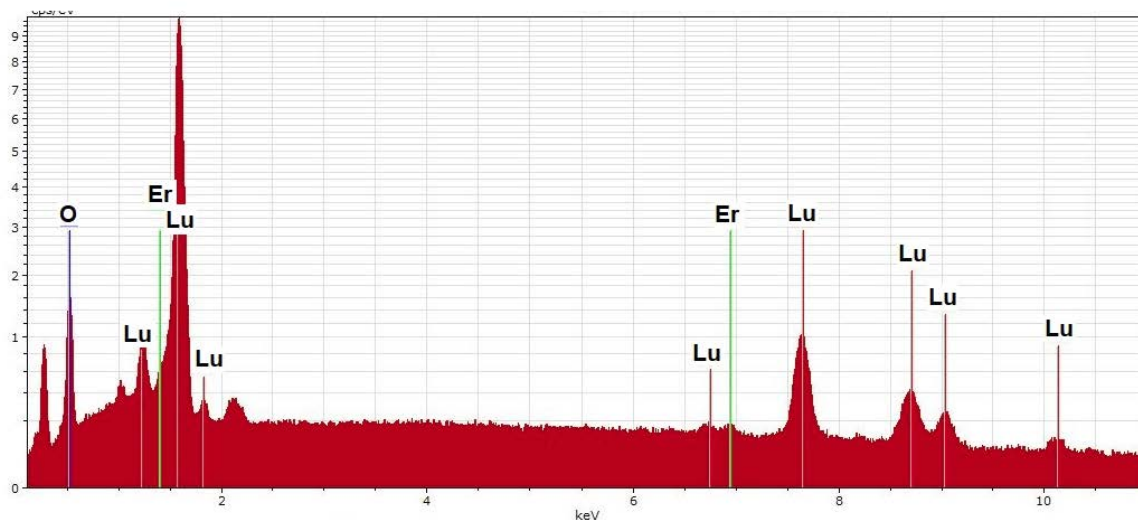


Рис. 4. Элементный состав (EDX) наноструктурированного порошка  $Lu_2O_3 : Er^{3+}$

#### Элементный состав полученных порошков

Элемент	Атомный номер	Мас. %	Мас. % (нормированный)	Ат. %
Кислород O	8	9,84	11,25	58,06
Лютеций Lu	71	75,75	86,58	40,87
Эрбий Er	68	1,90	2,17	1,07
Общее содержание %	–	97,49	100	100

Спектрально-люминесцентные исследования порошков  $Lu_2O_3 : Er$ , прокаленных при температуре 850 °С, проводились при возбуждении в УФ-области спектра ( $\lambda_{возб} = 378$  нм) при комнатной температуре. Из рассмотрения рис. 5 и 6 видно, что образцы  $Lu_2O_3 : Er^{3+}$  люминесцируют как в видимой области спектра с центром на 560 нм, так и в ИК-области с центром на 1530 нм. Люминесценция при возбуждении ионов  $Er^{3+}$  на длине волны 378 нм осуществляется в состоянии  $^4G_{11/2}$ , которое находится выше метастабильных уровней  $^4S_{3/2}$ ,  $^4F_{9/2}$ ,  $^4I_{11/2}$  и  $^4I_{13/2}$ . В случае близкого расположения энергетических состояний возбуждения релаксируют ступенчатым образом, а при достижении метастабильного уровня часть возбуждений излучается, а остальные переходят на более низкие уровни. В результате наблюдается люминесценция в разных частях спектра.

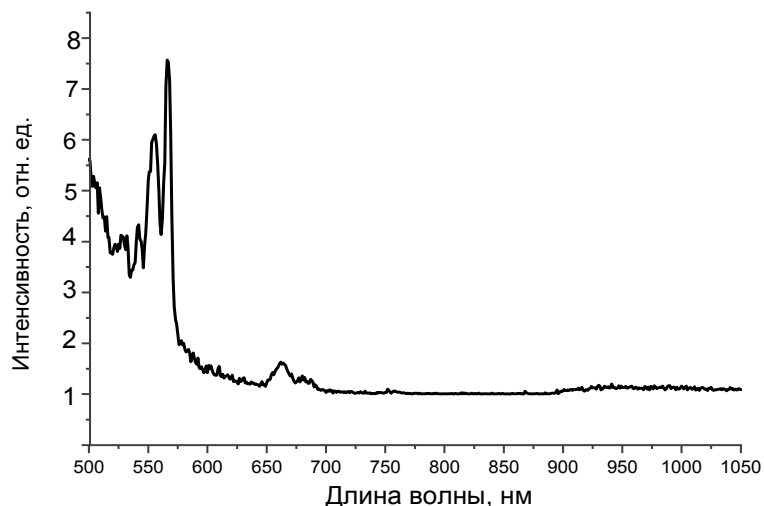


Рис. 5. Спектр люминесценции порошков  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$  в видимой области при возбуждении на длине волны 378 нм

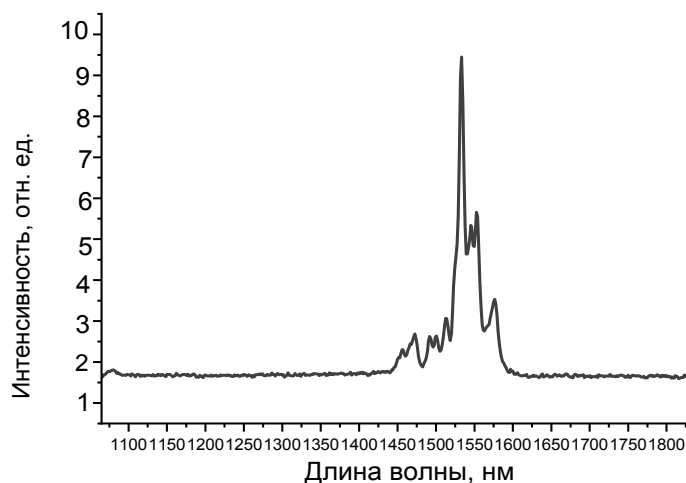


Рис. 6. Спектр люминесценции порошков  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$  в ИК-области при возбуждении на длине волны 378 нм

При возбуждении ионов  $\text{Er}^{3+}$  на длине волны 378 нм фиксируется люминесценция в зеленой области спектра с центром при 560 нм, которая обусловлена полосой  $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ , а при 660 нм – полосой  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ , едва заметная широкая полоса при 950 нм может принадлежать переходу  $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ . Люминесценция в ИК-области спектра с центром при 1530 нм принадлежит полосе  $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ .

Таким образом, можно констатировать, что полученные наноструктурированные порошки  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$  перспективны для формирования лазерной керамики как видимого, так и ИК-диапазона спектра [4–6].

### Заключение

В результате обобщения вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Изучен метод получения наноструктурированных порошков оксида лютетия, легированного ионами эрбия термохимическим синтезом (горением) с использованием уксусной кислоты в качестве комплексообразователя – горючего и ПВС в качестве химического диспергирующего агента.

2. Азотнокислые соли лютеция и эрбия, полученные взаимодействием оксидов лютеция и эрбия с концентрированной азотной кислотой, растворяют в жидкой уксусной кислоте, затем добавляют в состав поливиниловый спирт, упаривают смесь до состояния геля, нагрев которого осуществляют до начала термохимической реакции в муфельной печи, а реакцию синтеза и прокаливание производят при температурах 850 °С.

3. На основе РФА и СЭМ полученных материалов показано, что образцы оксида лютеция, легированного эрбием, представляют собой дезагломерированные наноструктурированные порошки с кристаллической структурой биксбиита и размерами первичных частиц 48,0–86,0 нм.

4. Изучение синтезированных порошков методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), применяемой для определения локального химического состава фаз, показало наличие атомов лютеция, эрбия и кислорода в соотношении, соответствующем формуле  $(\text{Lu}_{0,98}\text{Er}_{0,2})_2\text{O}_3$ . Других примесных фаз в составе образцов не обнаружено.

5. Показано, что образцы  $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Er}^{3+}$  при возбуждении на длине волны 378 нм люминесцируют как в видимой области спектра (с центром на 560 нм – зеленое излучение), так и в ИК-области с центром 1530 нм. Полученные порошки перспективны для формирования лазерной керамики как видимого, так и ИК-диапазона спектра.

*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. Materials development and potential applications of transparent ceramics / Z. Xiao, S. Yu, Y. Li [et al.] // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2020. – Vol. 139. – P. 1–66. – DOI 10.1016/j.mser.2019.100518
2. Transparent ceramics / L. B. Kong, Y. Huang, W. Que [et al.]. – Switzerland : Springer International Publishing, 2015. – 734 p. – DOI 10.1007/978-3-319-18956-7
3. Fabrication and properties of  $\text{Eu} : \text{Lu}_2\text{O}_3$  transparent ceramics for X-ray radiation detectors / W. Xie, X. Zhang, P. Wang [et al.] // Optical Materials. – 2018. – Vol. 80. – P. 22–29. – DOI 10.1016/j.optmat.2018.04.029
4. Patent CN102674837A China, IPC C04B 35/50, C04B 35/622.  $\text{Er}^{3+} : \text{Lu}_2\text{O}_3$  transparent ceramics / N. Wang, X. Zhang, P. Wang. – 2012 : publ. date 26.09.2012.
5.  $\text{Er} : \text{Lu}_2\text{O}_3$  – laser-related spectroscopy / L. D. Merkle, N. Ter-Gabrielyan, N. J. Kacik [et al.] // Optical Materials Express. – 2013. – Vol. 3, N 11. – P. 1992–2002. – DOI 10.1364/OME.3.001992
6. Chaika, M. Optical spectra and gain properties of  $\text{Er}^{3+} : \text{Lu}_2\text{O}_3$  ceramics for eye-safe 1.5  $\mu\text{m}$  lasers / M. Chaika, S. Balabanov, D. Permin // Optical Materials. – 2021. – Vol. 112. – Art. 110785. – DOI 10.1016/j.optmat.2020.110785
7. Fabrication, optical properties and LD-pumped 2.7  $\mu\text{m}$  laser performance of low  $\text{Er}^{3+}$  concentration doped  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  transparent ceramics / X. Qiao, H. Huang, Y. Yang [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 640. – P. 51–55. – DOI 10.1016/j.jallcom.2015.03.190
8. Wang, N. L. Fabrication and spectroscopic characterization of  $\text{Er}^{3+} : \text{Lu}_2\text{O}_3$  transparent ceramics / N. L. Wang, X. Y. Zhang, P. H. Wang // Materials Letters. – 2013. – Vol. 94. – P. 5–7. – DOI 10.1016/j.matlet.2012.12.025
9. Optimization of laser emission at 2.8  $\mu\text{m}$  by  $\text{Er} : \text{Lu}_2\text{O}_3$  ceramics / H. Uehara, S. Tokita, J. Kawanaka [et al.] // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, N 3. – P. 3498–3507. – DOI 10.1364/OE.26.003497

10. Stimulated-emission cross-sections of trivalent erbium ions in the cubic sesquioxides  $Y_2O_3$ ,  $Lu_2O_3$ , and  $Sc_2O_3$  / A. Uvarova, P. Loiko, S. Kalusniak [et al.] // *Optical Materials Express*. – 2023. – Vol. 13, N 5. – P. 1385–1399. – DOI 10.1364/OME.487909
11. Diode-pumped high power 2.7  $\mu m$  Er :  $Y_2O_3$  ceramic laser at room temperature / L. Wang, H. T. Huang, D. Y. Shen [et al.] // *Optical Materials*. – 2017. – Vol. 71. – P. 70–73. – DOI 10.1016/j.optmat.2016.06.014
12. LD-pumped 2.8  $\mu m$  Er :  $Lu_2O_3$  ceramic laser with 6.7 W output power and > 30 % slope efficiency / W. Yao, H. Uehara, S. Tokita [et al.] // *Applied Physics Express*. – 2020. – Vol. 14, N 1. – Art. 012001. – DOI 10.35848/1882-0786/abce9a
13. Highly stable self-pulsed operation of an Er :  $Lu_2O_3$  ceramic laser at 2.7  $\mu m$  / L. Wang, H. Huang, D. Shen [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2017. – Vol. 14, N 4. – Art. 045803. – DOI 10.1088/1612-202X/aa5ced
14. Efficient continuous wave and quasi-continuous wave operation of a 2.8  $\mu m$  Er :  $Lu_2O_3$  ceramic laser / H. Uehara, R. Yasuhara, S. Tokita [et al.] // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, N 16. – P. 18677–18684. – DOI 10.1364/OE.25.018677
15. Fabrication and VUV luminescence of  $Lu_2O_3 : Eu^{3+}$  (5 at. %) nanopowders and transparent ceramics / N. A. Safronova, R. P. Yavetskiy, O. S. Kryzhanovska [et al.] // *Optical Materials*. – 2020. – Vol. 101. – Art. 109730. – DOI 10.1016/j.optmat.2020.110785
16.  $Eu^{3+}$ ,  $Bi^{3+}$  codoped  $Lu_2O_3$  nanopowders: synthesis and luminescent properties / A. M. Ramírez, J. Castaneda-Contreras, M. A. Meneses-Nava [et al.] // *Journal of Materials Research*. – 2013. – Vol. 28, N 10. – P. 1365–1371. – DOI 10.1557/jmr.2013.91
17. Properties of  $Er_2O_3$  nanoparticles synthesized by a modified co-precipitation method / J. Castaneda-Contreras, A. Meneses, H. P. L. Guevara [et al.] // *Revista Mexicana de Física*. – 2015. – Vol. 61. – P. 127–131. – URL: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v61n2/v61n2a8.pdf>.
18. Wang, N. Synthesis of  $Er^{3+} : Lu_2O_3$  nanopowders by carbonate co-precipitation process and fabrication of transparent ceramics / N. Wang, X. Zhang, P. Wang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 652. – P. 281–286. – DOI 10.1016/j.jallcom.2015.08.232
19. Controllable synthesis and size-dependent upconversion luminescence properties of  $Lu_2O_3 : Yb^{3+}/Er^{3+}$  nanospheres / K. Zheng, W. Song, C. Lv [et al.] // *CrystEngComm*. – 2014. – Vol. 16. – P. 4329–4337. – DOI 10.1039/C4CE00036F
20. 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. – DOI:10.1016/j.proci.2006.07.052
21. Self-propagating high-temperature synthesis of  $Lu_2O_3$  powders for optical ceramics / D. A. Permina, A. V. Novikova, E. M. Gavrishchuk [et al.] // *Inorganic Materials*. – 2017. – Vol. 53, N 12. – P. 1330–1335. – DOI 10.1134/S0020168517120123
22. A modified solution combustion method to superfine  $Gd_2O_3 : Eu^{3+}$  phosphor: preparation, phase transformation and optical properties / X. Ye, W. Gao, L. Xia [et al.] // *Journal of Rare Earths*. – 2010. – Vol. 28, N 3. – P. 345–350. – DOI 10.1016/S1002-0721(09)60109-5
23. Characterization and photoluminescence of  $Lu_2O_3-Eu^{3+}$  nano-phosphor prepared by modified solution combustion method / L. Wang, S. Liu, K. Huang [et al.] // *Journal of Rare Earths*. – 2011. – Vol. 29, N 11. – P. 1049–1052. – DOI 10.1016/S1002-0721(10)60596-0
24. Yang, J. Sol-gel synthesis of nanocrystalline  $Yb^{3+}/Ho^{3+}$ -doped  $Lu_2O_3$  as an efficient green phosphor / J. Yang, J. Lin // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2010. – Vol. 157, N 12. – P. K273–K278. – DOI 10.1149/1.3496669
25. High-purity nanopowders for laser applications / D. Ganta, G. Venugopal, A. T. Hunt [et al.] // *International Scholarly Research Notices*. – 2012. – Vol. 2012. – Art. 608756. – DOI 10.5402/2012/608756

26. Патент ВУ 24201, МПК С 09К 11/78, В22F9/20, В 82У 40. Способ получения наноразмерного порошка оксида эрбия, легированного лантаном : № а 20220050 : заявлено 09.03.2022 : опубл. 28.02.2024 / Бойко А. А., Подденежный Е. Н., Дробышевская Н. Е. ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого.
27. Получение наноразмерных порошков оксида иттрия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / С. С. Балабанов, В. В. Дроботенко, Е. М. Гаврищук [и др.] // Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 2. – С. 91–97. – URL: [http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/99999999\\_West\\_2011\\_2/12.pdf](http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/99999999_West_2011_2/12.pdf).
28. Klug, H. P. X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials / H. P. Klug, L. E. Alexander. – New York : Wiley, 1973. – 687 p.

### References

1. 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 and Engineering: R: Reports*, 2020, vol. 139, pp. 1–66. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2019.100518>
2. Kong L. B., Huang Y., Que W., Zhang T., Li S., Tang D. *Transparent ceramics*. Switzerland, Springer International Publishing Publ., 2015. 734 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18956-7>
3. Xie W., Zhang X., Wang P., Zhou Z., Li J., Liu J., Jiang H., Jiang B. Fabrication and properties of Eu : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics for X-ray radiation detectors. *Optical Materials*, 2018, vol. 80, pp. 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.04.029>
4. Wang N., Zhang X., Wang P. Er<sup>3+</sup> : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics. Patent China. no. 102674837A, 2012.
5. Merkle L. D., Ter-Gabrielyan N., Kacik N. J., Sanamyan T., Zhang H., Yu H., Wang J., Dubinskii M. Er : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – laser-related spectroscopy. *Optical Materials Express*, 2013, vol. 3, no. 11, pp. 1992–2002. <https://doi.org/10.1364/OME.3.001992>
6. Chaika M., Balabanov S., Permin D. Optical spectra and gain properties of Er<sup>3+</sup> : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics for eye-safe 1.5 μm lasers. *Optical Materials*, 2021, vol. 112, Art. 110785. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110785>
7. Qiao X., Huang H., Yang H., Zhang L., Zhang J., Wang J., Wang Y., Dong C., Dai J., Chen D. Fabrication, optical properties and LD-pumped 2.7 μm laser performance of low Er<sup>3+</sup> concentration doped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 640, pp. 51–55. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.03.190>
8. Wang N. L., Zhang X. Y., Wang P. H. Fabrication and spectroscopic characterization of Er<sup>3+</sup> : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics. *Materials Letters*, 2013, vol. 94, pp. 5–7. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.12.025>
9. Uehara H., Tokita S., Kawanaka J., Kawashima S., Higashiguchi T., Yasuhara R. Optimization of laser emission at 2.8 μm by Er : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 3498–3507. <https://doi.org/10.1364/OE.26.003497>
10. Uvarova A., Loiko P., Kalusniak S., Dunina E., Fomicheva L., Kornienko A., Balabanov S., Braud A., Camy P., Kränkel C. Stimulated-emission cross-sections of trivalent erbium ions in the cubic sesquioxides Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Optical Materials Express*, 2023, vol. 13, no. 5, pp. 1385–1399. <https://doi.org/10.1364/OME.487909>
11. Wang L., Huang H. T., Shen D. Y., Zhang J., Chen H., Tang D. Y. Diode-pumped high power 2.7 μm Er : Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser at room temperature. *Optical Materials*, 2017, vol. 71, pp. 70–73. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.06.014>
12. Yao W., Uehara H., Tokita S., Chen H., Konishi D., Murakami M., Yasuhara R. LD-pumped 2.8 μm Er : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser with 6.7 W output power and > 30 % slope efficiency. *Applied Physics Express*, 2020, vol. 14, no. 1, Art. 012001. <https://doi.org/10.35848/1882-0786/abce9a>

13. Wang L., Huang H., Shen D., Zhang J., Chen H., Tang D. Highly stable self-pulsed operation of an Er : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser at 2.7 μm. *Laser Physics Letters*, 2017, vol. 14, no. 4, Art. 045803. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aa5ced>
14. Uehara H., Yasuhara R., Tokita S., Kawashima S., Higashiguchi T., Kawanaka J. Efficient continuous wave and quasi-continuous wave operation of a 2.8 μm Er : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 16, pp. 18677–18684. <https://doi.org/10.1364/OE.25.018677>
15. Safronova N. A., Yavetskiy R. P., Kryzhanovska O. S., Parkhomenko S. V., Doroshenko A. G., Dobrotvorska M. V., Tolmachev A. V., Boulesteix R., Maître A., Zorenko T., Zorenko Yu. Fabrication and VUV luminescence of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Eu<sup>3+</sup> (5 at. %) nanopowders and transparent ceramics. *Optical Materials*, 2020, vol. 101, Art. 109730. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110785>
16. Ramírez A. M., Castaneda-Contreras J., Meneses-Nava M. A., Chávez-Rivas F., Pérez-Ladrón de Guevara H., García-Hipólito M., Guzman-Mendoza J., Falcony C. Eu<sup>3+</sup>, Bi<sup>3+</sup> codoped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopowders: synthesis and luminescent properties. *Journal of Materials Research*, 2013, vol. 28, no. 10, pp. 1365–1371. <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.91>
17. Castaneda-Contreras J., Meneses A., Guevara H. P. L., Maranon 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, pp. 127–131. Available at: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v61n2/v61n2a8.pdf>.
18. Wang N., Zhang X., Wang P. Synthesis of Er<sup>3+</sup> : Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopowders by carbonate co-precipitation process and fabrication of transparent ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 652, pp. 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.232>
19. Zheng K., Song W., Lv C., Liu Z., Jin W. Controllable synthesis and size-dependent upconversion luminescence properties of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> nanospheres. *CrystEngComm*, 2014, vol. 16, pp. 4329–4337. <https://doi.org/10.1039/C4CE00036F>
20. 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. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.052>
21. Permin D. A., Novikova A. V., Gavrishchuk E. M., Balabanov S. S., Sorokin A. A. Self-propagating high-temperature synthesis of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders for optical ceramics. *Inorganic Materials*, 2017, vol. 53, no. 12, pp. 1330–1335. <https://doi.org/10.1134/S0020168517120123>
22. Ye X., Gao W., Xia L., Nie H., Zhuang W. A modified solution combustion method to superfine Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Eu<sup>3+</sup> phosphor: preparation, phase transformation and optical properties. *Journal of Rare Earths*, 2010, vol. 28, no. 3, pp. 345–350. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(09\)60109-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(09)60109-5)
23. Wang L., Liu S., Huang K., Ye X., Yang Y., Zhou Z. Characterization and photoluminescence of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Eu<sup>3+</sup> nano-phosphor prepared by modified solution combustion method. *Journal of Rare Earths*, 2011, vol. 29, no. 11, pp. 1049–1052. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60596-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60596-0)
24. Yang J., Lin J. Sol-gel synthesis of nanocrystalline Yb<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup>-doped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as an efficient green phosphor. *Journal of the Electrochemical Society*, 2010, vol. 157, no. 12, pp. K273–K278. <https://doi.org/10.1149/1.3496669>
25. Ganta D., Venugopal G., Hunt A. T., Sapp M. High-purity nanopowders for laser applications. *International Scholarly Research Notices*, 2012, vol. 2012, Art. 608756. <https://doi.org/10.5402/2012/608756>
26. Boika A. A., Poddenezhny E. N., Drobyshevskaya N. E. *Method for producing nano-sized erbium oxide powder doped with lanthanum*. Patent BY. no. 24201 (in Russian). 28.02.2024.
27. Balabanov S. S., Drobotenko V. V., Gavrischuk E. M., Permin D. A. Production of nanosized yttrium oxide powders by self-propagating high-temperature synthesis. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo*, 2011, no. 2, pp. 91–97. Available at: [http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/99999999\\_West\\_2011\\_2/12.pdf](http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/99999999_West_2011_2/12.pdf). (in Russian).
28. Klug H. P., Alexander L. E. *X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials*. New York, Wiley Publ., 1973. 687 p.