

УДК 546.666

DOI 10.62595/1819-5245-2026-2-36-47

СИНТЕЗ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДА ЛЮТЕЦИЯ С ГОЛЬМИЕМ И НЕОДИМОМ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ

**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, активированного ионами гольмия и неодима, получены методом соосаждения из щелочных растворов. Источниками для синтеза в первом случае были взяты хлористые соли лютеция и гольмия, а во втором – азотнокислые соли лютеция и неодима. В качестве осадителей использовали смесь перекиси водорода с аммиаком и перекиси водорода и бикарбонатом аммония соответственно. Процессы осаждения проводили при температуре 10 °С с целью предотвращения процесса разложения перекиси. Исследования морфологических и структурных характеристик порошков с использованием методов сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показали, что образцы порошков $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$, прокаленные при 850 °С агломерированы, состоят из квазисферических частиц с размерами 14–23 нм, в свою очередь, порошки $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ имеют подобную форму частиц, но с размерами в пределах 19–44 нм. Показано, что наноструктурированные порошки $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$, полученные методом соосаждения и прокаленные при 850 °С, при возбуждении на длине волны 445 нм интенсивно люминесцируют в видимой области спектра с центром на 520 нм (зеленое излучение), а $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ при возбуждении на 595 нм – в ИК-области спектра (900 нм). Полученные порошки являются перспективными для создания керамических лазеров для видимого и ИК-областей спектра.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, оксид лютеция, активирование, ионы гольмия, ионы неодима, соосаждение.

Для цитирования. Синтез люминесцентных порошков оксида лютеция с гольмием и неодимом методом соосаждения / Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 2 (105). – С. 36–47. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-36-47>

SYNTHESIS OF LUMINESCENT POWDERS OF LUTETIUM OXIDE WITH HOLMIUM AND NEODYMIUM BY THE COPRECIPITATION METHOD

**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 activated with holmium and neodymium ions were obtained by coprecipitation from alkaline solutions. Lutetium and holmium chloride salts served as the precipitating agents in the first case, while lutetium and neodymium nitrates were used in the second. A mixture of hydrogen peroxide with ammonia and hydrogen peroxide with ammonium bicarbonate, respectively, served as precipitating agents. Precipitation processes were carried out at 10 °C to prevent peroxide decomposition. Studies of the morphological and structural characteristics of the powders using scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis, and energy-dispersive X-ray spectroscopy showed that $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$, powder samples calcined at 850 °C are agglomerated and consist of quasi-spherical particles with sizes of 14–23 nm. $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ powder samples calcined at 850 °C are agglomerated and consist of quasi-spherical particles with sizes of 14–23 nm. $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$, powders obtained by coprecipitation and calcined at 850 °C, when excited at a wavelength of 445 nm, luminesce intensely in the visible region of the spectrum centered at 520 nm (green emission), and $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ when excited at 595 nm – in the IR region of the spectrum (900 nm). The obtained powders are promising for the creation of ceramic lasers for the visible and IR regions of the spectrum.

Keywords: rare earth elements, lutetium oxide, activation, holmium ions, neodymium ions, coprecipitation.

For citation. Poddenezhny E. N., Drobyshevskaya N. E., Boika A. A., Nevzorova O. C., Urbanovich V. S. Synthesis of luminescent powders of lutetium oxide with holmium and neodymium by the coprecipitation method. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 2 (105), pp. 36–47 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-36-47>

Введение

Прозрачная поликристаллическая керамика находит применение в лазерных устройствах, сцинтилляторах и преобразователях излучения, главным образом благодаря возможности получения изделий больших размеров и сложной формы и, что более важно, экономичности, по сравнению с монокристаллическими материалами. Для изготовления оптической керамики используются исходные порошки-прекурсоры, состоящие из ультрадисперсных частиц, предпочтительно нанометрового размера. Для получения высокой плотности керамики применяются различные технологии формования, такие как спекание под высоким давлением (НР), включая изостатическое прессование (НИР), вакуумное высокотемпературное уплотнение (ВВУ) и искровое плазменное спекание (СПС) [1–5].

Перспективными материалами для применения в качестве активной среды твердотельных лазеров видимого и ИК-диапазонов спектра, а также сцинтилляторов и других оптических устройств являются керамики на основе оксидов лантаноидов: оксида лантана, оксида эрбия, оксида лютеция, активированных ионами редкоземельных элементов (РЗЭ) [6–10].

Значительное внимание уделяется созданию материалов для фотоники и оптики на основе оксида лютеция Lu_2O_3 – материала кубической структуры с высокой температурой плавления (2450 °C) и большой шириной запрещенной зоны (6,5 эВ), что обеспечивает возможность введения различных ионов – активаторов в повышенных концентрациях [11–14]. Кроме того, при высокой теплопроводности (12,5 Вт/мК) матрица оксида лютеция обладает устойчивостью к тепловому удару, что позволяет достигать высокой мощности лазерного излучения, в частности, при ее активации ионами гольмия и неодима [15–23].

Известно достаточно много вариантов получения наноразмерных и наноструктурированных порошков оксидов РЗЭ, пригодных для формования прозрачной керамики: различные варианты газофазных термических процессов, например, золь-гель-горение, реакции Печини, самораспространяющийся высокотемпературный синтез

[24–26]. Однако большинство известных способов синтеза наноразмерных оксидов РЗЭ, в том числе оксида лютеция, основано на процессах осаждения прекурсоров из водных растворов солей. Исходными реагентами являются соответствующие нитраты или хлориды, а в качестве осадителей используются растворы аммиака, щавелевой кислоты, бикарбоната аммония. Несмотря на очевидные недостатки методов осаждения – трудоемкость, большие объемы растворителей и промывочных жидкостей, этот вариант синтеза обеспечивает получение мало агломерированных порошков с узким распределением наночастиц по размерам, а также высокой степени чистоты [27–29]. Процесс получения обычно включает несколько стадий: осаждение гидратированного осадка, отделения осадка от маточного раствора, промывку, сушку в воздушной среде и прокалывание при высоких температурах. Например, нанокристаллические порошки Lu_2O_3 , легированные ионами Yb^{3+} и Ho^{3+} , были синтезированы методом соосаждения в смеси аммиака и бикарбоната аммония [30].

Нанокристаллический порошок Lu_2O_3 , легированный ионами Nd^{3+} для формирования прозрачной керамики, был также синтезирован методом совместного осаждения в растворе NH_4OH и NH_4HCO_3 [31]. После прокалывания при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч были получены монодисперсные порошки $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ с размерами частиц около 40 нм и удельной поверхностью $13,7\text{ м}^2/\text{г}$.

Перспективным вариантом метода соосаждения является формирование оксидов РЗЭ в растворе мочевины (карбамида) [32, 33], позволяющим синтезировать нанокристаллы на основе Lu_2O_3 различных размеров и форм.

Цель настоящего исследования – разработка нового варианта синтеза наноструктурированных люминесцентных порошков оксида лютеция, активированного ионами гольмия и неодима путем соосаждения гидратированных оксидов из хлоридных и азотнокислых растворов солей с последующим прокалыванием, и изучение их структурных, морфологических и спектрально-люминесцентных характеристик.

Материалы и методы исследования

Для получения наноструктурированного оксида лютеция, легированного ионами гольмия и неодима, используют хлористые и азотнокислые соли лютеция $\text{LuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{HoCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $(\text{LuNO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Кристаллогидрат хлорида лютеция получают растворением оксида лютеция в концентрированной соляной кислоте.

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).

Синтез наноструктурированных порошков оксида лютеция, активированного ионами гольмия. Процесс получения наноразмерного оксида лютеция, активированного ионами гольмия, осуществляют методом гомогенного осаждения гидроксидов в смешанном растворе перекиси водорода и аммиака при охлаждении раствора и интенсивном механическом перемешивании. В данном случае используют хлористые исходные соединения лютеция и гольмия. В качестве исходных материалов используют микрокристаллический оксид лютеция Lu_2O_3 , ХЧ и хлорид гольмия HoCl_3 , ХЧ. Процесс синтеза $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$ осуществляют следующим образом. Исходный Lu_2O_3 в термостойком стеклянном стакане заливают концентрированной соляной кислотой (ГОСТ 3118-77) ХЧ, перемешивают и нагревают до $100\text{ }^\circ\text{C}$. После получения хлорида лютеция раствор охлаждают, добавляют дистиллированную воду и отмеренное количество твердой соли хлорида гольмия тщательно перемешивают.

Далее готовят раствор осадителя – перекись водорода (35 %) с аммиаком в дистиллированной воде при соотношении 5 мл H_2O_2 : NH_4OH 0,5 мл. Затем порциями при перемешивании вливают раствор солей в осадитель до $\text{pH} = 9$. Проводят созревание осадка в течение трех суток при комнатной температуре, затем осуществляют центрифугирование и трехкратное промывание осадка в дистиллированной воде. Термообработку осадка осуществляют при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч при скорости подъема температуры $250\text{ }^\circ\text{C}/\text{ч}$ в муфельной печи на воздухе. В результате получают наноструктурированный порошок белого цвета.

На основе анализа данных РФА агломерированных порошков можно сделать заключение, что образцы, полученные при температуре прокаливания $850\text{ }^\circ\text{C}$, являются наноструктурированными, с четко выраженными рефлексам, соответствующими кубической кристаллической структуре биксбиита состава Lu_2O_3 (каталог JCPDS № 86-2475) (рис. 1). Средний размер области когерентного рассеяния первичных частиц порошка, синтезируемого в результате процесса горения с последующим прокаливанием при $850\text{ }^\circ\text{C}$ (условный диаметр D), определяется по величине уширения рентгенографического максимума для самой интенсивной полосы по формуле Шеррера [33] и составляет 16 ± 3 нм. Рефлексы, соответствующие легирующей примеси Ho_2O_3 на рентгенограммах, не фиксируются, по-видимому, в связи с их малой концентрацией в структуре матрицы.

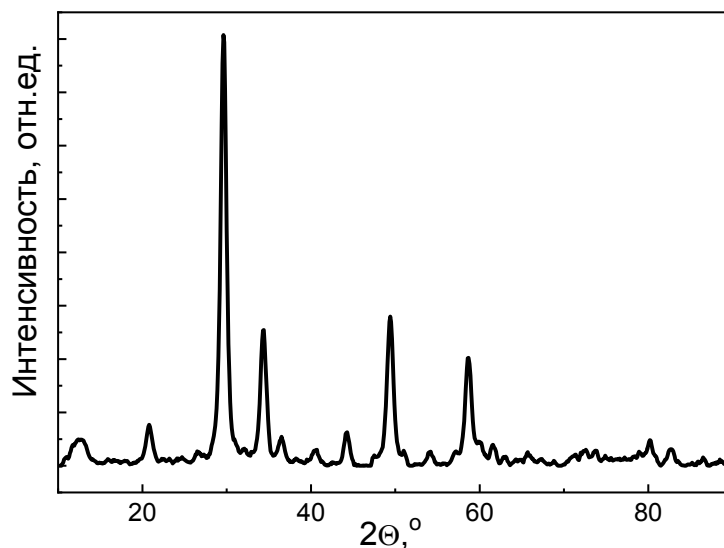


Рис. 1. Дифрактограмма полученного наноструктурированного порошка $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$

Исследования морфологии полученных материалов с использованием метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показали, что порошки $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$, прокаленные на воздухе, имеют квазисферическую форму частиц и являются агломерированными (рис. 2). Размеры агломератов находятся в пределах 2–5 мкм, а первичных частиц – около 14–23 нм.

Изучение элементного состава полученных порошков методом энергодисперсионного микроанализа (EDX), применяемого для определения локального химического состава фаз, показал наличие в составе атомов лутеция, гольмия и кислорода в соотношении, приведенном в табл. 1. Других примесных фаз в составе образцов не обнаружено.

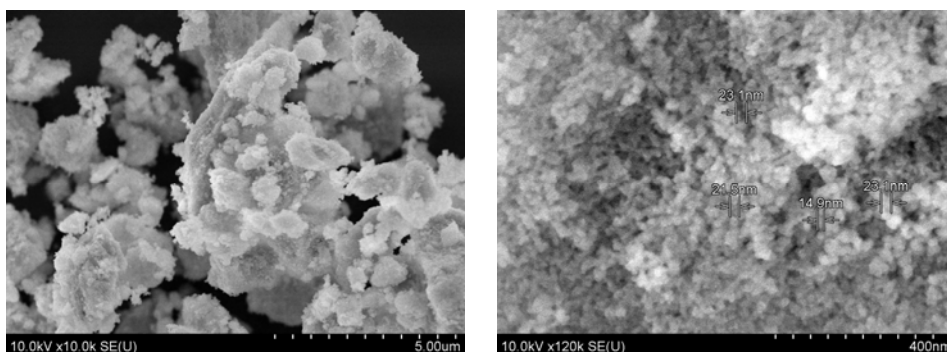


Рис. 2. СЭМ-изображение полученного наноразмерного порошка $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$ при разном увеличении

Таблица 1

Элементный состав полученных порошков

Элемент	Атомный номер	Мас. %	Мас. % (нормированный)	Ат. %
Кислород O	8	8,95	9,88	54,35
Лютеций Lu	71	71,82	79,29	39,87
Гольмий Ho	67	9,81	10,83	5,78
Общее содержание, %	–	90, 8	100	100

Анализ спектрально-люминесцентных характеристик и сравнение их с литературными данными подтверждают, что в процессе соосаждения с последующим созреванием осадка и его прокаливанием формируется наноструктурированный порошок состава $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$, люминесцирующий при $\lambda_{\text{возб}} = 445 \text{ нм}$ в зеленой области спектра с центром на 520 нм (рис. 3). Прозрачный керамический материал на основе $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$ является перспективным материалом для формирования лазерной керамики для получения излучения в видимой области спектра [14–16].

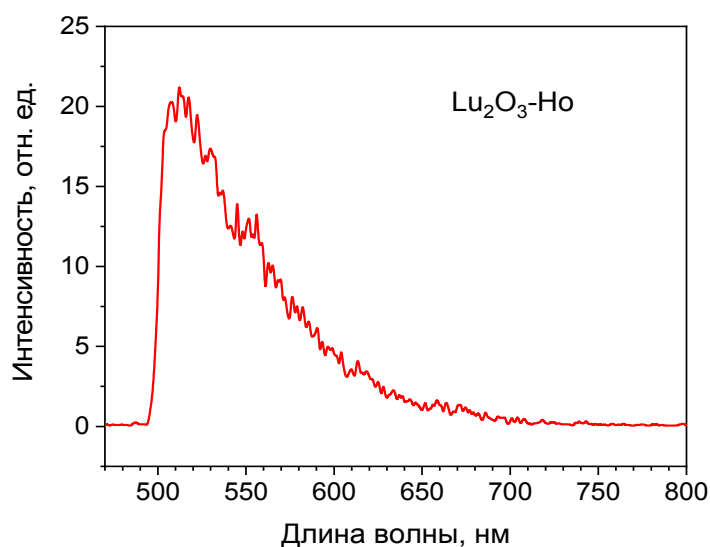


Рис. 3. Спектр люминесценции порошка $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$, полученного методом соосаждения; температура термообработки 850 °С, длина волны возбуждения – 445 нм

Синтез наноструктурированных порошков оксида лютетия, активированного ионами неодима. Образцы наноструктурированных порошков $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ были получены методом совместного осаждения из азотнокислых солей лютетия и неодима в смеси осадителей – раствора бикарбоната аммония и перекиси водорода. Процесс синтеза осуществляют так же, как и в варианте с $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$. При использовании указанной смеси в качестве осадителя происходит формирование осадка смеси гидратированных карбонатов оксида лютетия и неодима и взаимное отталкивание частиц оксидов РЗЭ за счет HO_2^- ионов, выделяющихся при разложении пероксида водорода в щелочной среде, что предотвращает слипание частиц и позволяет получать после прокаливания (850°C , 2 ч) хорошо диспергированный наноразмерный порошок голубого цвета, не требующий дополнительного размола.

Дифрактограмма $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ синтезированного в процессе осаждения прокаливания прекурсора при температуре 850°C аналогична дифрактограмме порошка $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$. Параметр решетки, согласно табличным данным, равен 1,64 нм, а область когерентного рассеяния (условного размера частиц), рассчитанная по формуле Шеррера [33], составляет 35 нм. Основной пик на дифрактограмме соответствует кристаллической плоскости [222] и находится при $2\theta = 28,94$.

Рефлексы, соответствующие формированию кристаллических фаз Nd^{3+} на дифрактограммах, не фиксируются вследствие малой концентрации примесных фаз.

Исследования морфологии порошков с использованием метода СЭМ показали, что порошки $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$, прокаленные на воздухе, также имеют квазисферическую форму частиц и являются агломерированными (рис. 4). Размеры первичных частиц порошка находятся в пределах 19–44 нм.

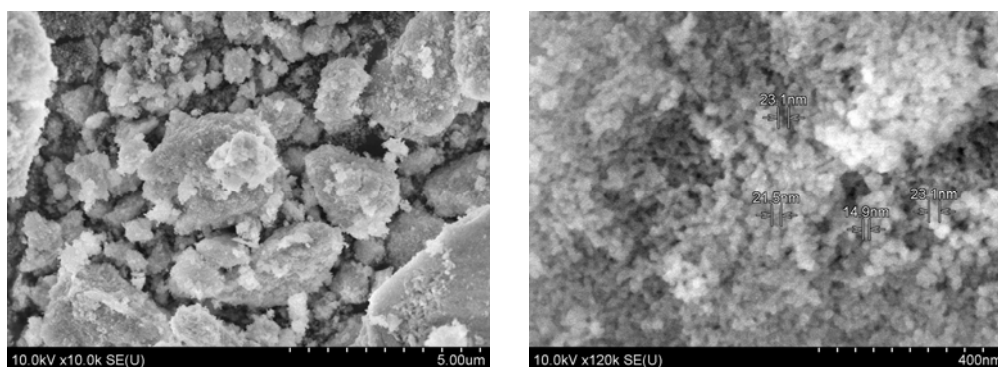


Рис. 4. СЭМ-изображение полученного наноразмерного порошка $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ при разном увеличении

Изучение элементного состава полученных порошков методом EDX показало наличие в составе атомов лютетия, неодима и кислорода в соотношении, представленном в табл. 2. Примесной фазой в составе образцов является углерод, который остается в структуре осадков при недостаточном прокаливании на воздухе (850°C , 2 ч). Очевидно, что в данном случае необходимо увеличить время и температуру прокаливания, так как наличие углерода в составе люминофора значительно снижает эффективность люминесценции.

Элементный состав полученных порошков

Элемент	Атомный номер	Мас. %	Мас. % (нормированный)	Ат. %
Кислород O	8	11,08	11,48	49,3
Лютеций Lu	81	80,34	83,21	32,68
Неодим Nd	76	2,27	2,35	5,78
Углерод C ⁶	6	2,85	2,96	16,9
Общее содержание, %	–	96,55	100,00	100,00

Анализ спектрально-люминесцентных характеристик и сравнение их с литературными данными [17] подтверждают, что в процессе соосаждения с последующим созреванием осадка и его прокаливанием формируется люминесцирующий порошок – $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ (рис. 5). Полосы излучения в диапазонах 870–970 нм, 1040–1160 нм принадлежат соответственно энергетическим переходам из $^4\text{F}_{3/2}$ в $^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{I}_{11/2}$ иона Nd^{3+} в матрице оксида лютеция.

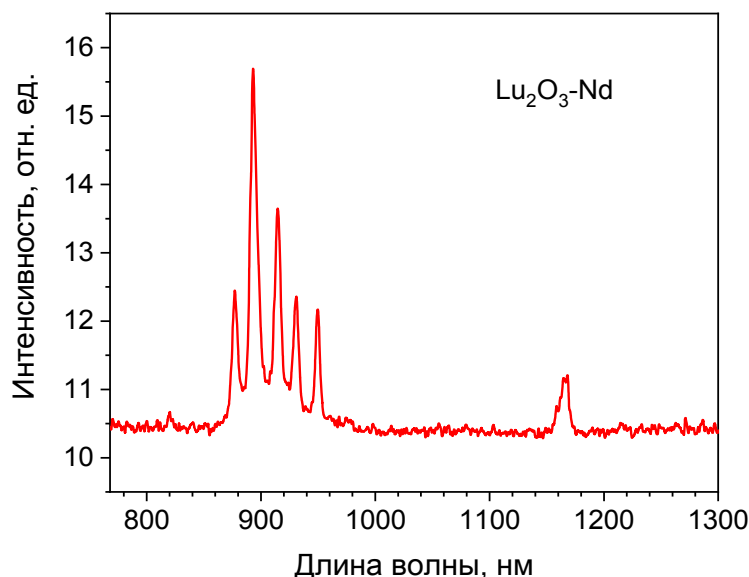


Рис. 5. Спектр люминесценции полученного порошка $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$, температура обжига – 850 °С, длина волны возбуждения – 595 нм

Прозрачный керамический материал на основе $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ также является перспективным материалом для формирования лазерной керамики в ИК-области спектра [17–19].

Заключение

Изучен метод получения наноструктурированных порошков оксида лютеция, легированного ионами гольмия путем соосаждения с использованием смеси перекиси водорода и аммиака в качестве комплексного осадителя с последующей отмывкой и прокаливанием осадков при температуре 850 °С. В качестве исходных компонентов для синтеза $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ использовали хлориды лютеция и гольмия. Порошки оксида лютеция, легированного ионами неодима, получали методом соосаждения с использованием смеси перекиси водорода и бикарбоната аммония в качестве комплексного осадителя с последующей отмывкой и прокаливанием осадков при температуре 850 °С.

В качестве исходных компонентов для синтеза $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ использовали нитраты лютеция и неодима. На основе данных РФА и СЭМ установлено, что образцы оксида лютеция с гольмием и неодимом представляют собой порошки со структурой биксбиита и размерами первичных частиц 14–23 и 19–44 нм соответственно. Изучение синтезированных материалов методом EDX показало наличие атомов лютеция, гольмия и кислорода для образца $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$, в то время как для $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ кроме основных элементов обнаружено наличие остаточного углерода. Установлено, что метод осаждения с использованием в качестве осадителя смеси перекиси водорода и аммиака является более эффективным, так как не дает примеси углерода, снижающего интенсивность люминесценции. Анализ спектрально-люминесцентных характеристик $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Ho}^{3+}$ при возбуждении на длине волны 445 нм показал, что образцы с гольмием люминесцируют в видимой области спектра (с центром на 520 нм – зеленое излучение), а образцы $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Nd}^{3+}$ при возбуждении на 595 нм – люминесцируют в ИК-области с центрами на 900 и 1160 нм со значительно меньшей интенсивностью. Полученные порошки перспективны для формирования лазерной керамики как видимого, так и ИК-диапазона спектра.

Исследования проведены в рамках выполнения задания Государственной программы научных исследований «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма 7.2 «Наноструктуры, наноматериалы и технологии» на 2026–2030 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. Hot isostatic pressing of transparent Yb^{3+} -doped Lu_2O_3 ceramics for laser applications / R. N. Maksimov, V. A. Shitov, V. V. Platonov [et al.] // Ceram. Int. – 2021. – Vol. 47, N 4. – P. 5168–5176. – DOI 10.1016/j.ceramint.2020.10.094
3. 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
4. Transparent ceramics: Processing, materials and applications / S. F. Wang, J. Zhang, D. W. Luo [et al.] // Progress in Solid State Chemistry. – 2013. – Vol. 41, N 1-2. – P. 20–54. – DOI 10.1016/j.progsolidstchem.2012.12.002
5. 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. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-keramiki-na-osnove-oksidov-erbiya-i-itteerbiya-spekaniem-pod-vysokim-davleniem> (дата обращения: 19.02.2026).
6. Self-propagating high-temperature synthesis of $(\text{Ho}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{O}_3$ nanopowders for magneto-optical ceramics / S. S. Balabanov, S. V. Filofeev, M. G. Ivanov [et al.] // Heliyon. – 2019. – Vol. 5, N 4. – P. 2405–8440. – DOI 10.1016/j.heliyon.2019.e01519
7. Fabrication and upconversion luminescence of novel transparent Er_2O_3 ceramics / L. Wang, B. Lu, X. Liu [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2020. – Vol. 40, N 4. – P. 1767–1772. – DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.048
8. Transparent Er_2O_3 ceramics fabricated by high-pressure spark plasma sintering / B. Ratzker, A. Wagner, S. Kalabukhov [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2020. – Vol. 40, N 13. – P. 4700–4703. – DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.05.056
9. Effects of ZrO_2 concentration on the properties of pressureless-sintered highly transparent Er_2O_3 ceramics / L. Zhu, H. Liu, H. Lin [et al.] // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49, N 23. – P. 39076–39082. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.09.245

10. Патент PU 2671550, МПК G02F 1/00. Способ получения оптически прозрачной керамики на основе оксида лютетия : № 2017124217 : заявлено 10.07.2017 : опубликовано 01.11.2018 / Осипов В. В., Кийко В. С., Максимов Р. Н., Шитов В. А., Платонов В. В., Юровских А. С. ; заявители и патентообладатели Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». – 4 с.
11. Chaika, M. Optical spectra and gain properties of $\text{Er}^{3+} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ ceramics for eye-safe 1.5 μm lasers / M. Chaika, S. Balabanov, D. Permin // *Optical Materials*. – 2021. – Vol. 112. – Art. 110785. – DOI 10.1016/j.optmat.2020.110785
12. Fabrication and properties of $\text{Eu} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ transparent ceramics for X-ray radiation detectors / W. Xie, J. Wang, M. Cao [et al.] // *Optical Materials*. – 2018. – Vol. 80. – P. 22–29. – DOI 10.1016/j.optmat.2018.04.029
13. Fabrication and VUV luminescence of $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ (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.2020.109730
14. Optical and Spectroscopic Properties of $\text{Ho} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ Transparent Ceramics Elaborated by Spark Plasma Sintering / L. Viers, S. Guené-Girard, G. Dalla-Barba [et al.] // *Ceramics*. – 2024. – Vol. 7, N 1. – P. 208–221. – DOI 10.3390/ceramics7010013
15. Spectroscopy of $\text{Ho} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ with respect to the realization of a visible laser / M. Fechner, F. Reichert, P. Koopmann [et al.] // *CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest*. – 2011. – URL: https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=CLEO_Europe-2011-CA8_4 (date of access: 19.02.2026).
16. Multi-watt laser operation and laser parameters of Ho-doped Lu_2O_3 at 2.12 μm / P. Koopmann, S. Lamrini, K. Scholle [et al.] // *Optical Materials Express*. – 2011. – Vol. 1, N 8. – P. 1447–1456. – DOI 10.1364/OME.1.001447
17. Nd^{3+} -doped Lu_2O_3 transparent sesquioxide ceramics elaborated by the Spark Plasma Sintering (SPS) method. Part 2 : First laser output results and comparison with Nd^{3+} -doped Lu_2O_3 and Nd^{3+} - Y_2O_3 ceramics elaborated by a conventional method / G. Toci, M. Vannini, M. Ciofini [et al.] // *Optical Materials*. – 2015. – Vol. 41. – P. 12–16. – DOI 10.1016/j.optmat.2014.09.033
18. Fine grained $\text{Nd}^{3+} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ transparent ceramic with enhanced photoluminescence / D. Zhou, Y. Ren, J. Xu [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2014. – Vol. 34, N 8. – P. 2035–2039. – DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.01.038
19. Highly transparent $\text{Nd}^{3+} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ produced by spark plasma sintering and its laser oscillation / L. An, A. Ito, J. Zhang [et al.] // *Optical Materials Express*. – 2014. – Vol. 4, N 7. – P. 1420–1426. – DOI 10.1364/OME.4.001420
20. An, L. Effect of LiF addition on spark plasma sintering of transparent Nd-doped Lu_2O_3 bodies / L. An, A. Ito, T. Goto // *Journal of Asian Ceramic Societies*. – 2014. – Vol. 2, N 2. – P. 154–157. – DOI 10.1016/j.jascer.2014.02.006
21. Highly transparent Nd : Lu_2O_3 ceramics obtained by coupling slip-casting and spark plasma sintering / R. Boulesteix, R. Epherre, S. Noyau [et al.] // *Scripta Materialia*. – 2014. – Vol. 75. – P. 54–57. – DOI 10.1016/j.scriptamat.2013.11.016
22. Ito, A. Laser oscillation and luminescence of Nd^{3+} - and Eu^{3+} -doped Lu_2O_3 transparent ceramics fabricated by spark plasma sintering / A. Ito, L. An, T. Goto // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. – 2016. – Vol. 124, N 4. – P. 313–320. – DOI 10.2109/jcersj2.15302
23. 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
24. Yang, J. Sol-gel synthesis of nanocrystalline $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ -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. Золь-гель синтез нанопорошков $Gd_2O_3 : Nd^{3+}$ и изучение их люминесцентных свойств / А. Муссауи, Д. В. Булыга, Н. К. Кузьменко [и др.] // Научно-технический вестник ИТМО. – 2021. – Т. 21, N 2. – С. 198–205. – DOI 10.17586/2226-1494-2021-21-2-198-205
26. Патент RU 2414330 C2, МПК B22F 9/16 (2006.01), C01F 17/00 (2006.01), B82B 3/00 (2006.01). Способ получения наноразмерных порошков индивидуальных оксидов лантаноидов : № 2008147496/02 : заявлено 03.12.2008 : опубликовано 20.03.2011 / Соколова Н. П., Титов А. А., Лапшина И. Е., Вилянский А. М., Ополченова Н. Л., Еременко З. В. ; заявитель Открытое акционерное общество «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности» ОАО «ГИРЕДМЕТ». – 6 с.
27. Получение нанопорошков Re_2O_3 ($Re = Y, La, Yb, Nd$) со сферическими частицами и лазерных керамик на их основе / С. Н. Багаев, А. А. Каминский, Ю. Л. Копылов [и др.] // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 3. – С. 271–275. – URL: <https://quantum-electronics.ru/wp-content/uploads/2013/3i/15138.pdf>.
28. Bahaa, M. A. Synthesis, Characterization and Electrical Conductivity of Nano-Crystalline Erbium Sesquioxide by the Precipitation Method and Subsequent Calcination / M. A. Bahaa, A. M. Asiri, M. A. Hussein // International Journal of Electrochemical Science. – 2016. – Vol. 11, N 8. – P. 7182–7197. – DOI 10.20964/2016.08.61
29. Synthesis and luminescence properties of Yb^{3+}/Ho^{3+} Co-doped Lu_2O_3 nanocrystalline powders / L. Q. An, J. Zhang, M. Liu [et al.] // Key Engineering Materials. – 2007. – Vol. 280. – P. 521–524. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.280-283.521
30. Fabrication and luminescent properties of Nd^{3+} -doped Lu_2O_3 transparent ceramics by pressureless sintering / D. Zhou, Y. Shi, J. Xie [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. – 2009. – Vol. 92, N 10. – P. 2182–2187. – DOI 10.1111/j.1551-2916.2009.03190.x
31. 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, N 20. – P. 4329–4337. – DOI 10.1039/c4ce00036f
32. Microwave synthesis of yttrium oxide nanostructure powders, doped with ytterbium and erbium ions / E. N. Poddenezhny, E. E. Trusova, A. A. Boiko [et al.] // Chemistry and Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 2024, N 2. – P. 9–14. – DOI 10.70189/1992-9498.1623
33. Klug, H. P. X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials, 2nd Edition / H. P. Klug, L. E. Alexander. – New York : Wiley, 1974. – 992 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*, 2020, vol. 139, pp. 1–66. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2019.100518>
2. Maksimov R. N., Shitov V. A., Platonov V. V., Yurovskikh A. S., Toci G., Patrizi B., Vannini M., Pirri A. Hot isostatic pressing of transparent Yb^{3+} -doped Lu_2O_3 ceramics for laser applications. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, no. 4, pp. 5168–5176. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.094>
3. Kong L. B., Huang Y., Que W., Zhang T., Li S., Zhang J., Dong Z., Tang D. *Transparent ceramics*. Switzerland, Springer International Publ., 2015. 734 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18956-7>
4. Wang S. F., Zhang J., Luo D. W., Gu F., Tang D. Y., Dong Z. L., Tan G. E. B., Que W. X., Zhang T. S., Li S., Kong L. B. Transparent ceramics: Processing, materials and applications. *Progress in Solid State Chemistry*, 2013, vol. 41, no. 1-2, pp. 20–54. <https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2012.12.002>
5. Urbanovich V. S., Leonchik S. V., Zhivul'ko V. D., Shloma E. N., Lavysh E. O., Niss V. S., Grigor'ev S. V., Poddenezhnyi E. N. Preparation of ceramics based on erbium and ytterbium oxides by high pressure sintering. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univer-*

- siteta imeni P. O. Sukhogo*, 2023, no. 4, pp. 61–69. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-keramiki-na-osnove-oksidov-erbiya-i-itterbiya-spekaniem-pod-vysokim-davleniem> (accessed 19 February 2026) (in Russian).
6. Balabanov S. S., Filofeev S. V., Ivanov M. G., Kalinina E. G., Kuznetsov D. K., Permin D. A., Rostokina E. Y. Self-propagating high-temperature synthesis of $(\text{Ho}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{O}_3$ nanopowders for magneto-optical ceramics. *Heliyon*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 2405–8440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01519>
 7. Wang L., Lu B., Liu X., Shi Y., Li J., Liu Y. Fabrication and upconversion luminescence of novel transparent Er_2O_3 ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40, no. 4, pp. 1767–1772. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.048>
 8. Ratzker B., Wagner A., Kalabukhov S., Frage N. Transparent Er_2O_3 ceramics fabricated by high-pressure spark plasma sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40, no. 13, pp. 4700–4703. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.05.056>
 9. Zhu L., Liu H., Lin H., Tan X., Chen J., Xu X., Zhang G., Jian Y., Dai M., Zhao C. Effects of ZrO_2 concentration on the properties of pressureless-sintered highly transparent Er_2O_3 ceramics. *Ceramics International*, 2023, vol. 49, no. 23, pp. 39076–39082. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.09.245>
 10. Osipov V. V., Kiiko V. S., Maksimov R. N., Shitov V. A., Platonov V. V., Yurovskikh A. S. Method for producing optically transparent ceramics based on lutetium oxide. Patent Rossiiskaya Federatsiya. no. 2671550 (in Russian). 2018.
 11. Chaika M., Balabanov S., Permin D. Optical spectra and gain properties of $\text{Er}^{3+} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ ceramics for eye-safe 1.5 μm lasers. *Optical Materials*, 2021, vol. 112, art. 110785. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110785>
 12. Xie W., Wang J., Cao M., Hu Z., Feng Y., Chen X., Jiang N., Dai J., Shi Y., Babin V., Mihóková E., Nikl M., Li J. Fabrication and properties of $\text{Eu} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ 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>
 13. 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 $\text{Lu}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ (5 at. %) nanopowders and transparent ceramics. *Optical Materials*, 2020, vol. 101, art. 109730. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109730>
 14. Viers L., Guené-Girard S., Dalla-Barba G., Jubéra V., Cormier É., Boulesteix R., Maître A. Optical and Spectroscopic Properties of $\text{Ho} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ Transparent Ceramics Elaborated by Spark Plasma Sintering. *Ceramics*, 2024, vol. 7, no. 1, pp. 208–221. <https://doi.org/10.3390/ceramics7010013>
 15. Fechner M., Reichert F., Koopmann P., Huber G. Spectroscopy of $\text{Ho} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ with respect to the realization of a visible laser. *CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest*, 2011. Available at: https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=CLEO_Europe-2011-CA8_4 (accessed 19 February 2026).
 16. Koopmann P., Lamrini S., Scholle K., Fuhrberg P., Schäfer M., Huber G. Multi-watt laser operation and laser parameters of Ho-doped Lu_2O_3 at 2.12 μm . *Optical Materials Express*, 2011, vol. 1, no. 8, pp. 1447–1456. <https://doi.org/10.1364/OME.1.001447>
 17. Toci G., Vannini M., Ciofini M., Lapucci A., Pirri A., Ito A., Goto T., Yoshikawa A., Ikesue A., Alombert-Goget G., Guyot Y., Boulon G. Nd^{3+} -doped Lu_2O_3 transparent sesquioxide ceramics elaborated by the Spark Plasma Sintering (SPS) method. Part 2. *Optical Materials*, 2015, vol. 41, pp. 12–16. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.09.033>
 18. Zhou D., Ren Y., Xu J., Shi Y., Jiang G., Zhao Z. Fine grained $\text{Nd}^{3+} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ transparent ceramic with enhanced photoluminescence. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, no. 8, pp. 2035–2039. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.01.038>

19. An L., Ito A., Zhang J., Goto T., Tang D. Highly transparent Nd³⁺ : Lu₂O₃ produced by spark plasma sintering and its laser oscillation. *Optical Materials Express*, 2014, vol. 4, no. 7, pp. 1420–1426. <https://doi.org/10.1364/OME.4.001420>
20. An L., Ito A., Goto T. Effect of LiF addition on spark plasma sintering of transparent Nd-doped Lu₂O₃ bodies. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 154–157. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.02.006>
21. Boulesteix R., Epherre R., Noyau S., Vandenhende M., Maître A., Sallé C., Alombert-Goget G., Guyot Y., Brenier A. Highly transparent Nd : Lu₂O₃ ceramics obtained by coupling slip-casting and spark plasma sintering. *Scripta Materialia*, 2014, vol. 75, pp. 54–57. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.11.016>
22. Ito A., An L., Goto T. Laser oscillation and luminescence of Nd³⁺- and Eu³⁺-doped Lu₂O₃ transparent ceramics fabricated by spark plasma sintering. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2016, vol. 124, no. 4, pp. 313–320. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.15302>
23. 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>
24. Yang J., Lin J. Sol-gel synthesis of nanocrystalline Yb³⁺/Ho³⁺-doped Lu₂O₃ 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. Mussaui A., Bulyga D. V., Kuz'menko N. K., Ignat'ev A. I., Evstrop'ev S. K., Nikonorov N. V. Sol-gel synthesis of Gd₂O₃ : Nd³⁺ nanopowders and the study of their luminescent properties. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 198–205 (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-2-198-205>
26. Sokolova N. P., Titov A. A., Lapshina I. E., Vilyanskii A. M., Opolchenova N. L., Eremenko Z. V. Method for obtaining nanosized powders of individual lanthanide oxides. Patent Rossiiskaya Federatsiya. no. 2414330 (in Russian). 2011.
27. Bagaev S. N., Kaminskii A. A., Kopylov Yu. L., Kravchenko V. B., Tolmachev A. V., Shemet V. V., Yavetskii R. P. Preparation of Re₂O₃ (Re = Y, La, Yb, Nd) nanopowders with spherical particles and laser ceramics based on them. *Kvantovaya Elektronika = Quantum Electronics*, 2013, vol. 43, no. 3, pp. 278–282 (in Russian).
28. Bahaa M. A., Asiri M. A., Hussein M. A. Synthesis, Characterization and Electrical Conductivity of Nano-Crystalline Erbium Sesquioxide by the Precipitation Method and Subsequent Calcination. *International Journal of Electrochemical Science*, 2016, vol. 11, no. 8, pp. 7182–7197. <https://doi.org/10.20964/2016.08.61>
29. An L. Q., Zhang J., Liu M., Wang S. W. Synthesis and luminescence properties of Yb³⁺/Ho³⁺ co-doped Lu₂O₃ nanocrystalline powders. *Key Engineering Materials*, 2007, vol. 280, pp. 521–524. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.280-283.521>
30. Zhou D., Shi Y., Xie J., Ren Y., Yun P. Fabrication and luminescent properties of Nd³⁺-doped Lu₂O₃ transparent ceramics by pressureless sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 2009, vol. 92, no. 10, pp. 2182–2187. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03190.x>
31. Zheng K., Song W., Lv C., Liu Z., Qin W. Controllable synthesis and size-dependent upconversion luminescence properties of Lu₂O₃ : Yb³⁺/Er³⁺ nanospheres. *CrystEngComm*, 2014, vol. 16, no. 20, pp. 4329–4337. <https://doi.org/10.1039/c4ce00036>
32. Poddenezhny E. N., Trusova E. E., Boiko A. A., Davydova O. V. Microwave synthesis of yttrium oxide nanostructure powders, doped with ytterbium and erbium ions. *Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, no. 2, pp. 9–14. <https://doi.org/10.70189/1992-9498.1623>
33. Klug H. P., Alexander L. E. *X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials*. New York, Wiley Publ., 1974, 992 p.