

УДК 546:54.057

DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-55-64

## СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДА ЛАНТАНА МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ В РАСТВОРЕ КАРБОНАТА АММОНИЯ

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

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

*Изучены особенности формирования наноструктурированных порошков оксида лантана методом осаждения при пониженной температуре (10 °С). Источниками для синтеза являлась азотнокислая соль лантана, осадителем служил раствор карбоната аммония совместно с перекисью водорода, а в качестве диспергирующего агента использовали пропиленгликоль. Исследования морфологических и структурных характеристик порошков с применением методов сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа показали, что частицы в значительной степени агломерированы, размер области когерентного рассеяния (условный диаметр  $D$ ) частиц порошков, прокаленных при 600, 900 и 1200 °С, составляет 19, 22 и 24 нм соответственно.*

**Ключевые слова:** нанокристаллические порошки, оксид лантана, метод осаждения, карбонат аммония.

**Для цитирования.** Подденежный, Е. Н. Синтез наноструктурированных порошков оксида лантана методом осаждения в растворе карбоната аммония / Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 3 (102). – С. 55–64. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-55-64

## SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURED LANTHANUM OXIDE POWDERS IN AMMONIUM CARBONATE SOLUTION BY PRECIPITATION METHOD

E. N. PODDENEZHNY, N. E. DROBYSHEVSKAYA, A. A. BOIKA

Sukhoi State Technical University of Gomel,  
the Republic of Belarus

*The features of formation of nanostructured lanthanum oxide powders by precipitation at low temperature (10 °C) were studied. The sources for synthesis were lanthanum nitrate salt, the precipitant was ammonium carbonate solution together with hydrogen peroxide, and propylene glycol was used as a dispersing agent. Studies of morphological and structural characteristics of powders using scanning electron microscopy and X-ray phase analysis showed that particles are largely agglomerated, the size of the coherent scattering region (nominal diameter  $D$ ) of powder particles calcined at 600, 900 and 1200 °C is 19, 22 and 24 nm, respectively.*

**Keywords:** nanocrystalline powders, lanthanum oxide, precipitation method, ammonium carbonate.

**For citation.** Poddenezhny E. N., Drobyshevskaya N. E., Boika A. A. Synthesis of nanostructured lanthanum oxide powders in ammonium carbonate solution by precipitation method. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 3 (102), pp. 55–64 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-55-64

### 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].

Оксид лантана ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) обладает многими интересными свойствами, такими как большая ширина запрещенной зоны (4,3 эВ), минимальная энергия кристаллической решетки и исключительно высокая диэлектрическая проницаемость [3, 4]. Кроме оптических применений наночастицы оксида лантана могут быть использованы в литий-ионных аккумуляторах [5], в составе эффективных катализаторов [6] и др. Так, добавление оксидов редкоземельных элементов, таких как  $\text{La}_2\text{O}_3$ , в Мо-сплавы позволяет снизить температуру перехода из пластичного в хрупкое состояние [7, 8]. Таким образом, сплавы Мо, легированные оксидом лантана, обладают высокой вязкостью и прочностью как при комнатной, так и при высокой температуре [9].

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, инициирующих процесс консолидации частиц [10]. Такой примесью, не влияющей на оптические и физико-механические характеристики лазерной керамики из оксида эрбия, является оксид лантана [11]. Показано, что при концентрации 5–10 мол. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  способствует высокому качеству спекания, например, керамики на основе  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  [12, 13]. Что касается влияния добавки на уплотнение керамики, то возможное фазовое превращение при температурах спекания может привести к образованию значительного количества дефектов и ускорению массопереноса. С другой стороны, относительно низкая температура перехода в точке фазового равновесия в системе  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--}\text{Ho}_2\text{O}_3$ , когда диффузия ионов происходит медленно, может привести к сохранению второй фазы в керамике.

Наночастицы оксида лантана могут быть получены с использованием различных химических методов, включая гидротермальные [14], микроволновые [15], по золь-гель технологии [16], а также методом термохимических реакций (горения) [17].

Широко распространены способы синтеза нанопорошков оксидов лантаноидов методами осаждения из солевых растворов с последующим прокаливанием. Несмотря на очевидные недостатки методов осаждения: трудоемкость, большие объемы используемых растворителей, этот вариант синтеза обеспечивает получение малоагломерированных порошков с узким распределением по размерам наночастиц, а также высокой степени чистоты [18].

Для осаждения гидратированных соединений редкоземельных элементов (РЗЭ), в том числе оксида лантана, используются в качестве источников соли, чаще всего нитраты, а в качестве осадителей – растворы аммиака, щавелевой кислоты, карбоната или бикарбоната аммония [19, 20].

Карбонаты лантаноидов являются промежуточными фазами, которые образуются при осаждении из растворов неорганических солей растворами карбоната натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , карбоната аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , а также карбамида (мочевины). Карбонаты лантаноидов  $\text{Ln}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  – аморфные или кристаллические осадки. Разложение карбонатов лантана сопровождается образованием  $\text{La}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{CO}_2)$  и  $\text{La}_2\text{O}_2(\text{CO}_3)$  [21].

Методы получения оксидов РЗЭ из азотнокислых солей наиболее полно описаны в монографии [22].

Цель настоящего исследования состоит в разработке нового метода осаждения наноструктурированного порошка оксида лантана  $\text{La}_2\text{O}_3$  – перспективной матрицей для введения легирующих оптически-активных ионов РЗЭ, а также добавкой, предназначенной для активации процесса спекания при формовании прозрачных оптических керамик.

### Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов использовали лантан азотнокислый 6-водный (ТУ 6-09-4676-83, ХЧ, РФ), карбонат аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , квалификации ХЧ, CAS № 506-87-6 (ГОСТ 3770-75, РФ), перекись водорода (35 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ ). В качестве диспергирующего агента, препятствующего слипанию осадка, применяли пропиленгликоль  $\text{CH}_2(\text{OH})\text{—CH}(\text{OH})\text{—CH}_3$  (степень очистки 99,8 %).

Процесс получения наноструктурированного оксида лантана осуществляют следующим образом. Твердую соль нитрата лантана (6,0 г) растворяют в 100 мл дистиллированной воды, затем в раствор добавляют пропиленгликоль в качестве диспергирующего агента (10 мл), отдельно растворяют карбонат аммония в 100 мл дистиллированной воды и оба раствора сливают одновременно при пониженной температуре (10 °С), после чего вливают перекись водорода до  $\text{pH} = 10\text{--}12$ , перемешивая смесь на магнитной мешалке. В стакане образуется осадок, который помещают в центрифугу, осаждают при скорости 3000 об/мин, затем осадок вынимают, промывают три раза дистиллированной водой и повторно центрифугируют, затем помещают в выпарительную чашку № 4 фарфоровую емкостью 150 мл, диаметром 107 мм (ГОСТ 9147-80) и выпаривают в сушильном шкафу СНОЛ-3,5 при температуре 90 °С в течение семи часов. Гидратированный осадок  $\text{La}(\text{OH})\text{CO}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  далее термически обрабатывают при температурах 100, 600, 900 и 1200 °С в воздушной среде (по два часа).

Изучение «термического поведения» полученных осадков проводили с помощью дериватографа NETZSCH STA 449F3 (Германия). Для исследования фазового состава использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-7 с излучением  $\text{Cu-K}\alpha$ . Электронно-микроскопические исследования проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа VegaТесcan (Чехия). ИК-спектры лантансодержащих гидратированных порошков, полученных методом осаждения карбонатом аммония в присутствии пропиленгликоля как диспергирующего агента и прокаленных в воздушной атмосфере при температурах 100, 650, 900 и 1200 °С, записывали с помощью ИК-Фурье спектрометра Nexus Nicolet 5700 «ThermoElectron Corporation» (США).

### Обсуждение результатов

На кривой ДТА гидратированного оксида лантана (диапазон температур 20–800 °С) (рис. 1) имеется несколько экзо- и эндоэффектов, которые связаны с «термическим поведением» высушенного осадка. Так, первый экзоэффект (80 °С) связан, по-видимому, с формированием кристаллической фазы основного карбоната лантана  $\text{La}(\text{OH})\text{CO}_3$  после удаления связанной воды, второй эффект (700–720 °С) отображает формирование кристаллического карбоната лантана  $\text{La}_2(\text{CO}_3)_3$  и третий эффект (около 800 °С) указывает на формирование оксида лантана  $\text{La}_2\text{O}_3$ , что соответствует литературным данным [23].

Кривая потери массы образца при нагреве от 20 до 800 °С демонстрирует два плавно снижающихся участка: первый – (20–710 °С) и второй – (720–800 °С). Общая потеря массы образца в диапазоне 20–800 °С составляет около 50 %.

На основании анализа дериватограммы высушенного осадка приходим к выводу, что разложение гидратированных карбонатов лантана протекает по вероятной схеме  $\text{La}(\text{OH})\text{CO}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{La}_2(\text{CO}_3)_3 \rightarrow \text{La}_2\text{O}_3$  и сопровождается образованием двух промежуточных соединений. Наряду с этим, по данным авторов [24], могут получаться монооксидкарбонаты  $\text{La}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2$ . Термическое разложение карбонатов должно представлять собой эндотермический процесс. Однако, учитывая кристаллизацию как карбонатов, так и оксидов, следует ожидать, что эндотермические эффекты будут существенно искажаться за счет наложения экзотермических.

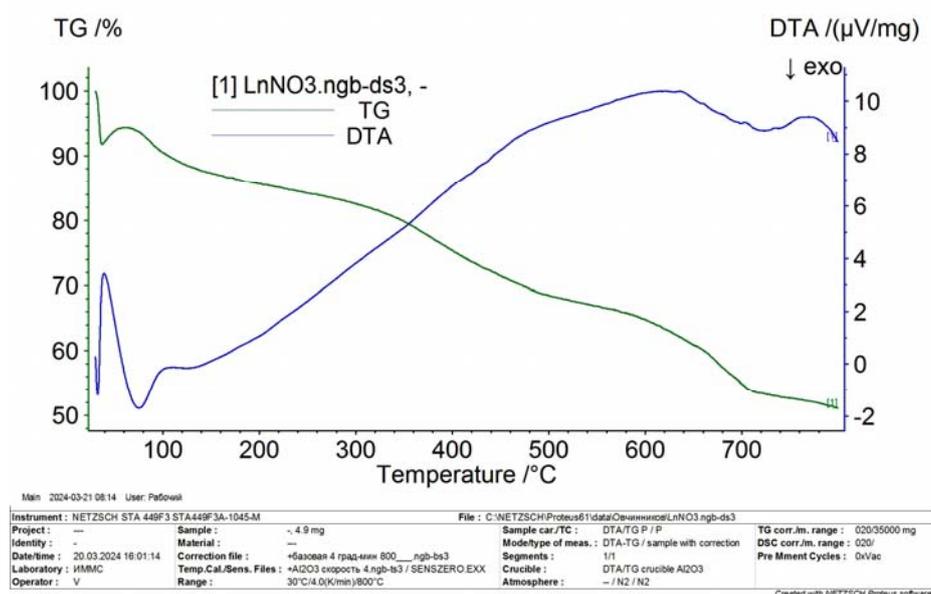


Рис. 1. Дериватограмма высушенного осадка

На рентгенограммах осадка, полученного методом осаждения в смеси карбоната аммония и перекиси водорода в присутствии пропиленгликоля и высушенного при 100 °С, имеется несколько пиков, соответствующих гидрооксикарбонату лантана  $\text{Ln}(\text{OH})\text{CO}_3$  (рис. 2, кривая 1) [25].

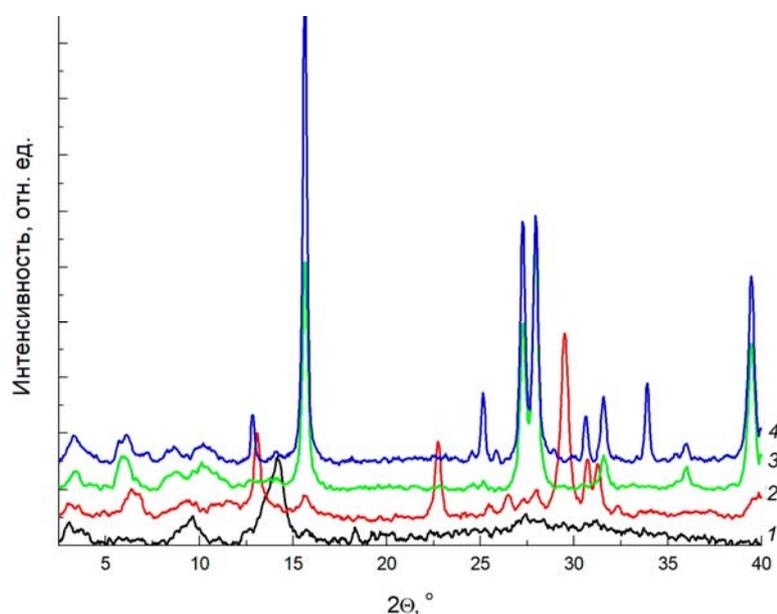


Рис. 2. Рентгенофазовый анализ порошков оксидов лантана, получаемых методом осаждения, высушенных при 100 °С (1) и прокаленных при 600 °С (2), 900 °С (3) и 1200 °С (4)

На основе анализа данных РФА порошков следует, что при температуре сушки 100 °С частицы прекурсора являются аморфно-кристаллическими, а в образцах, прокаленных при 600 °С, формируется гексагональный гидроксид лантана  $\text{h-La}(\text{OH})_3$  (JCPDS № 83-2034) (рис. 2, кривая 2) [26]; при прокаливании при 900 и 1200 °С

образцы демонстрируют рост основных дифракционных пиков  $\text{La}_2\text{O}_3$  (рис. 2, кривая 3), который завершается формированием укрупненных порошков с четко выраженными рефлексам, соответствующими рефлексам кристаллической структуры кубической сингонии  $c\text{-La}_2\text{O}_3$ , образование которой подтверждается данными каталога «X-ray powder diffraction (XRD) patterns» (JCPDS № 04-0856). Прокаливание порошков при  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  на воздухе способствует также увеличению интенсивности основных дифракционных пиков. Средний размер области когерентного рассеяния частиц наноструктурированного порошка оксида лантана, получаемого в результате процесса осаждения с последующим прокаливанием при  $600$ ,  $900$  и  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  (условный диаметр  $D$ ), определенный по величине уширения рентгенографического максимума для самой интенсивной полосы по формуле Шеррера [27], составляет  $19$ ,  $22$  и  $24\text{ нм}$  соответственно.

Таким образом, можно сделать заключение, что при разложении осадков гидратированных карбонатов лантана по схеме  $\text{La}(\text{OH})\text{CO}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O} \rightarrow h\text{-La}(\text{OH})_3 \rightarrow c\text{-La}_2\text{O}_3$  образуются промежуточные соединения, наличие которых подтверждается методами РФА.

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) установлено, что гидратированные порошки после термической обработки при  $100\text{ }^\circ\text{C}$  в значительной степени агломерированы, размеры их находятся в диапазоне от  $5$  до  $20\text{ мкм}$ , а использование в качестве диспергирующего агента пропиленгликоля при термообработке осадка приводит к формированию отдельных ультрадисперсных частиц  $\text{La}_2\text{O}_3$  при слабой их агломерации (рис. 3). Частицы порошка, прокаленные при  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , также агломерированы, размер агломератов практически не меняется, однако заметно, что начинается процесс вспучивания частиц, они становятся более рыхлыми. При дальнейшем прокаливании агломераты начинают распадаться в результате горения пропиленгликоля, а при  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  формируется порошок полностью кристаллизованный с размером от  $2$  до  $5\text{ мкм}$  (рис. 3, в).

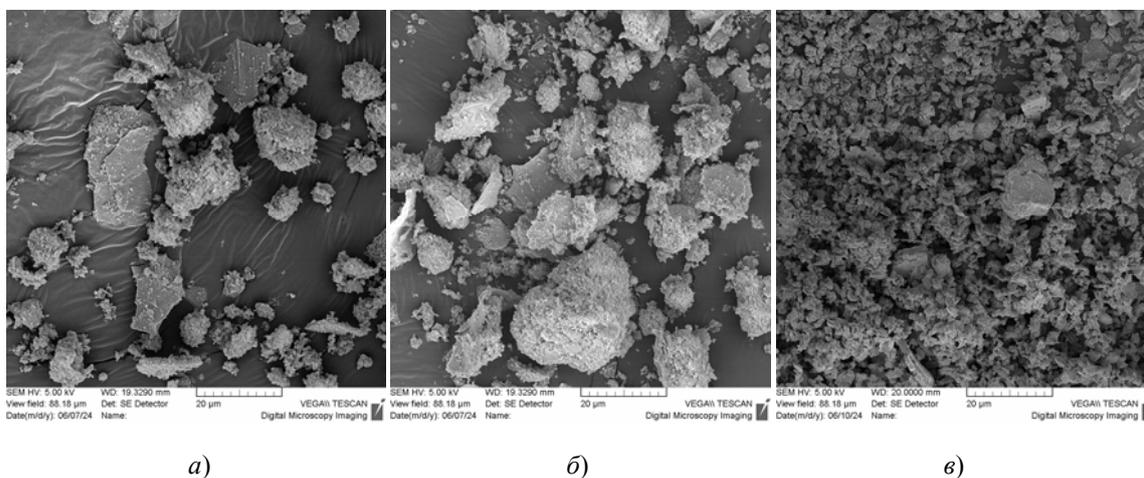


Рис. 3. СЭМ-изображение порошков, полученных методом осаждения, высушенных при  $100\text{ }^\circ\text{C}$  (а), прокаленных при  $600$  (б) и  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  (в)

ИК-спектры лантан-содержащих гидратированных порошков, полученных методом осаждения карбонатом аммония в присутствии пропиленгликоля как диспергирующего агента и прокаленных в воздушной атмосфере при температурах  $100$ ,  $650$ ,  $900$  и  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , приведены на рис. 4.

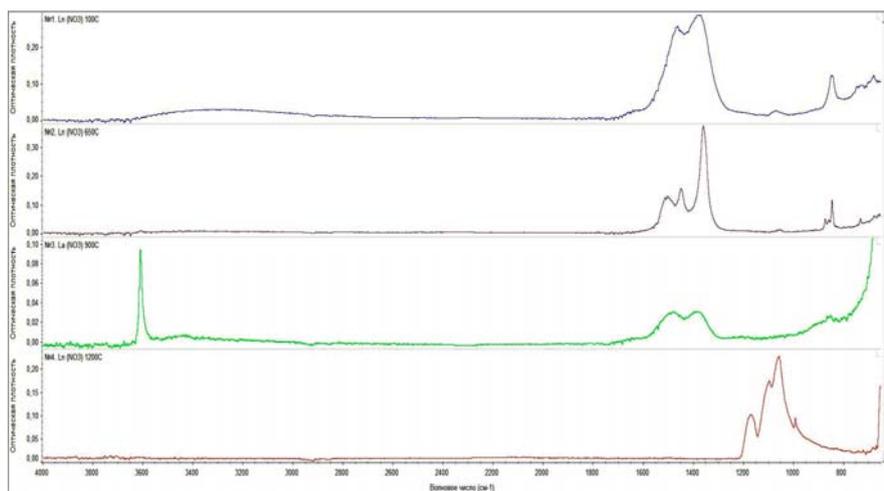


Рис. 4. ИК-спектры высушенного осадка, прокаленного в воздушной атмосфере при температурах 100, 650, 900 и 1200 °С

Валентные колебания  $\text{CO}_3^{2-}$  проявляются в виде широких полос при  $1580 \text{ см}^{-1}$  (несимметричные),  $1390 \text{ см}^{-1}$  и неплоские деформационные колебания  $\text{CO}_3^{2-}$  – при  $848 \text{ см}^{-1}$  (для температур прокаливания 100, 650 и 900 °С) [28]. Интенсивность полос в ИК-спектре падает по мере повышения температуры прокаливания, а при 1200 °С эти полосы отсутствуют, что подтверждает полное удаление углеродсодержащих групп. Полоса при  $563 \text{ см}^{-1}$  относится к колебаниям связи La–O. Полоса на частоте  $3600 \text{ см}^{-1}$ , которая появляется при 900 °С связана, скорее всего, с валентными колебаниями групп O–H, абсорбированных пористыми частицами  $\text{La}_2\text{O}_3 \cdot x(\text{OH}^-)$  [29], однако при температуре прокаливания 1200 °С она исчезает, что свидетельствует о формировании полностью обезвоженных частиц  $\text{La}_2\text{O}_3$ . Вместе с тем из анализа кривой ИК-спектра образца, прокаленного при 1200 °С, можно предположить, что на поверхности частиц  $\text{La}_2\text{O}_3$  находится небольшое количество хемисорбированных углеродсодержащих групп, что подтверждается идентифицированными полосами при  $1050 \text{ см}^{-1}$  и  $1140 \text{ см}^{-1}$ .

На основании анализа ИК-спектров высушенного осадка (рис. 1) приходим к заключению, что разложение гидратированного карбоната протекает по схеме  $\text{La}(\text{OH})\text{CO}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{La}_2(\text{CO}_3)_3 \rightarrow \text{La}_2\text{O}_3 \cdot x(\text{OH}^-) \rightarrow \text{La}_2\text{O}_3$  и сопровождается образованием двух промежуточных соединений.

### Заключение

В результате обобщения вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Изготовлены образцы гидратированных осадков  $\text{La}(\text{OH})\text{CO}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  методом осаждения при сливании растворов азотнокислого лантана и карбоната аммония совместно с перекисью водорода при пониженной температуре (10 °С). В качестве диспергирующего агента, способствующего дезагломерации частиц, использовали пропиленгликоль.

2. Изучена кинетика реакций осаждения и условий кристаллизации карбонатов лантаноидов методами ДТА, РФА, ИК-спектроскопии и СЭМ при получении осадков и при последующем прокаливании при температурах 100, 650, 900, 1200 °С.

3. Оказано, что разложение гидратированных карбонатов лантана протекает по предполагаемой схеме  $\text{La}(\text{OH})\text{CO}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{La}_2(\text{CO}_3)_3 \rightarrow \text{La}_2\text{O}_3 \cdot x(\text{OH}^-) \rightarrow \text{La}_2\text{O}_3$  и сопровождается образованием двух промежуточных соединений.

4. Изучение морфологии полученных образцов методом СЭМ показало, что порошки в значительной степени агломерированы, размер агломератов составляет

от 5 до 20 мкм, при 600 °С начинается процесс вспучивания, при 900 °С агломераты начинают распадаться в результате горения пропиленгликоля, а при 1200 °С порошки полностью дезагломерированы с размерами частиц от 2 до 5 мкм.

5. Установлено, что размер области когерентного рассеяния (условный диаметр  $D$ ) частиц порошков, прокаленных при 600, 900 и 1200 °С, составляет 19, 22 и 24 нм соответственно.

*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, D. Tang // Springer International Publishing, Switzerland, 2015. – 734 p. – DOI 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. – DOI 10.1016/j.mser.2019.100518
3. Nanostructured  $\text{La}_2\text{O}_3 : \text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ : Temperature Sensing, Optical Heating and Bio-Imaging Application / Z. Sun, G. Liu, Fu. Zuoling [et al.] // Mater. Res. Bull.–2017. – Vol. 92. – P. 39–45. – DOI 10.1016/j.materresbull.2017.04.005
4. Ghiasi, M. Synthesis, characterization and photocatalytic properties of lanthanum oxy-carbonate, lanthanum oxide and lanthanum hydroxide nanoparticles / M. Ghiasi, A. Malekzadeh // Superlatt. Microstruc. – 2015. – Vol. 77. – P. 295–304. – DOI 10.1016/j.spmi.2014.09.027
5.  $\text{La}_2\text{O}_3$  hollow nano-spheres for high performance lithium-ion rechargeable batteries / M. Sasidharan, N. Gunawardhana, M. Inoue [et al.] // Chem. Commun. – 2012. – Vol. 48. – P. 3200–3202. – DOI 10.1039/c2cc16085d
6. Combustion synthesized  $\text{La}_2\text{O}_3$  and  $\text{La}(\text{OH})_3$ : recyclable catalytic activity towards Knoevenagel and Hantzsch reactions/ B. P. Gangwar, V. Palakollu, A. Singh [et al.] // RSC Adv. – 2014. – Vol. 4. – P. 55407–55416. – DOI 10.1039/C4RA08353A
7.  $\text{La}_2\text{O}_3$  effects on TZM alloy recovery, recrystallization and mechanical properties / K. S. Wang, J. F. Tan, P. Hu [et al.] // Mater. Sci. Eng. A. – 2015. – Vol. 636. – P. 415–420. – DOI 10.1016/j.msea.2015.03.114
8. The influences of La doping method on the microstructure and mechanical properties of Mo alloys / X. Yang, H. Tan, N. Lin [et al.] // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. – 2015. – Vol. 51. – P. 301–308. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2015.04.034
9. Wang, L. Effects of  $\text{La}_2\text{O}_3$  and annealing temperature on grain size and mechanical properties of Mo alloys / L. Wang, G. Liu, J. Sun // Mater. Res. Express. – 2017. – Vol. 4, N 11. – P. 6515. – DOI 10.1088/2053-1591/aa977f
10. Fabrication of Yb-doped  $\text{Lu}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--La}_2\text{O}_3$  solid solutions transparent ceramics by self-propagating high-temperature synthesis and vacuum sintering / D. A. Permin, S. S. Balabanov, A. V. Novikova [et al.] // Ceram. Int. – 2018. – Vol. 45, N 1. – P. 522–529. – DOI 10.1016/j.ceramint.2018.09.204
11. Fabrication and characterizations of erbium oxide based optical ceramics / S. S. Balabanov, S. Filofeev, M. Ivanov [et al.] // Optical Materials. – 2020. – Vol. 101. – Article 109732. – DOI 10.1016/j.optmat.2020.109732
12. Faraday rotation in cryogenically cooled dysprosium based ( $\text{Dy}_2\text{O}_3$ ) ceramics / A. Yakovlev, I. Snetkov, D. Permin [et al.] // Scr. Mater. – 2019. – Vol. 161. – P. 32–35. – DOI 10.1016/j.scriptamat.2018.10.011
13. Magneto-optical Faraday effect in dysprosium oxide ( $\text{Dy}_2\text{O}_3$ ) based ceramics obtained by vacuum sintering / I. L. Snetkov, A. I. Yakovlev, D. A. Permin [et al.] // Opt. Lett. – 2018. – Vol. 43 – P. 4041–4044. – URL: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm>.

14. Synthesis and physicochemical properties of La(OH)<sub>3</sub> and La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanostructures / J. Kang, Y. Kim, D. W. Cho, Y. Sohn // Mater. Sci. Semicon. Proces. – 2015. – Vol. 40. – P. 737–743. – DOI 10.1016/j.mssp.2015.07.050
15. Niasari, M. S. Synthesis of lanthanum hydroxide and lanthanum oxide nanoparticles by sonochemical method / M. S. Niasari, G. Hosseinzadeh, F. Davar // J. Alloys Compd. – 2011. – Vol. 509. – P. 4098–4103. – DOI 10.1016/j.jallcom.2010.07.083
16. On the facile polyvinyl alcohol assisted sol-gel synthesis of tetragonal zirconia nanopowder with mesoporous structure / M. A. Shadiya, N. Nandakumar, R. Joseph, K. E. George // Adv. Powder Technol. – 2017. – Vol. 28. – P. 3148–3157. – DOI 10.1016/j.appt.2017.09.029
17. Fabrication of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> uniformly Doped Mo Nanopowders by Solution Combustion Synthesis Followed by Reduction under Hydrogen / S. Gu, M. Qin, H. Zhang, J. Ma // Materials. – 2018. – Vol. 11, N 12. – P. 2385. – DOI 10.3390/ma11122385
18. Gowd, G. S. Effect of doping concentration and annealing temperature on luminescence properties of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Eu<sup>3+</sup> nanophosphor prepared by colloidal precipitation method / G. S. Gowd, M. K. Patra, S. Songara // Journal of Luminescence. – 2012. – Vol. 132, N 8. – P. 2023–2029. – DOI 10.1016/j.jlumin.2012.03.004
19. Effect of the La(OH)<sub>3</sub> preparation method on the surface and rehydroxylation properties of resulting La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles / M. Mendez, J. J. Carvajal, L. F. Marsal [et al.] // J. Nanopart. Res. – 2013. – Vol. 15. – P. 1–16. – DOI 10.1007/s11051-013-1479-7
20. Formation of lanthanum hydroxide and oxide via precipitation / So-Jin Kim, Won-Kyu Han, Sung-Goon Kang [et al.] // Solid State Phenomena. – 2008. – Vol. 135. – P. 23–26. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.135.23
21. Шаров, В. А. О термическом разложении оксалатов и карбонатов лантаноидов, иттрия и скандия / В. А. Шаров, Г. В. Безденежных // Успехи химии. – 1981. – Т. 50, № 7. – С. 1197–1201.
22. Поляков, Е. Г. Металлургия редкоземельных металлов / Е. Г. Поляков. – М. : Юрайт, 2021. – 501 с.
23. Исследование процесса осаждения карбонатов РЗЭ / М. Г. Штуца, А. В. Кардаполов, В. Б. Филиппов, Н. А. Сысина // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306, № 5. – С. 71–74.
24. Turcotte, R. P. On the rare-earth dioxymonocarbonates and their decomposition / R. P. Turcotte, J. O. Sawyer, L. R. Eiring // Inorg. Chem. – 1969. – Vol. 8. – P. 238–246. – DOI 10.1021/ic50072a012
25. Соединения редкоземельных элементов. Карбонаты, оксалаты, нитраты, титанаты / Л. Н. Комиссарова, В. М. Шацкий, Г. Я. Пушкина [и др.]. – М. : Наука, 1984. – 235 с.
26. Отрицательная дифференциальная проводимость структур на основе оксида лантана / А. Игитян, Н. Агамалян, Р. Овсепян [и др.] // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 54, № 2. – С. 117–122. – DOI 10.21883/FTP.2020.02.48915.9280
27. KlugandL, H. P. X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials / H. P. KlugandL, E. Alexander. – NewYork : Wiley, 1973. – 687 p.
28. Накамото, К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накамото. – М. : Мир, 1991. – 450 с.
29. Mu, Q. Synthesis, characterization, shape preserved transformation, and optical properties of La(OH)<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, and La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorods / Q. Mu, Y. Wang // J. Alloys Compd. – 2011. – Vol. 509. – P. 396–401. – DOI 10.1016/j.jallcom.2010.09.041

## References

1. Kong L. B., Huang Y., Que W., Zhang T., Li S., Zhili D., Tang D. Transparent Ceramics. *Springer International Publishing Switzerland*, 2015, pp. 734. DOI 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. DOI 10.1016/j.mser.2019.100518
3. Sun Z., Liu G., Zuoling Fu., Sheng T., Wei Y., Zhijian Wu. Nanostructured  $\text{La}_2\text{O}_3 : \text{Yb}_3^+/\text{Er}_3^+$ : Temperature Sensing, Optical Heating and Bio-Imaging Application. *Materials Research Bulletin*, 2017, vol. 92, pp. 39–45. DOI 10.1016/j.materresbull.2017.04.005
4. Ghiasi M., Malekzadeh A. Synthesis, characterization and photocatalytic properties of lanthanum oxy-carbonate, lanthanum oxide and lanthanum hydroxide nanoparticles. *Superlattices and Microstructures*, 2015, vol. 77, pp. 295–304. DOI 10.1016/j.spmi.2014.09.027
5. Sasidharan M., Gunawardhana N., Inoue M., Yusa S., Yoshio M., Nakashima K.  $\text{La}_2\text{O}_3$  hollow nano-spheres for high performance lithium-ion rechargeable batteries. *Chemical Communications*, 2012, vol. 48, pp. 3200–3202. DOI 10.1039/c2cc16085d
6. Gangwar B. P., Palakollu V., Singh A., Kanvah S., Sharma S. Combustion synthesized  $\text{La}_2\text{O}_3$  and  $\text{La}(\text{OH})_3$ : recyclable catalytic activity towards Knoevenagel and Hantzsch reactions. *RSC Advances*, 2014, vol. 4, pp. 55407–55416. DOI 10.1039/C4RA08353A
7. Wang K. S., Tan J. F., Hu P., Yu Z. T., Yang F., Hu B. L., Song R., He H. C., Volinsky A. A.  $\text{La}_2\text{O}_3$  effects on TZM alloy recovery, recrystallization and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 636, pp. 415–420. DOI 10.1016/j.msea.2015.03.114
8. Yang X., Tan H., Lin N., Li Z., He Y. The influences of La doping method on the microstructure and mechanical properties of Mo alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, vol. 51, pp. 301–308. DOI 10.1016/j.ijrmhm.2015.04.034
9. Wang L., Liu G., Sun J. Effects of  $\text{La}_2\text{O}_3$  and annealing temperature on grain size and mechanical properties of Mo alloys. *Materials Research Express*, 2017, vol. 4, no. 11, pp. 6515. DOI 10.1088/2053-1591/aa977f
10. Permin D. A., Balabanov S. S., Novikova A. V., Snetkov I. L., Palashov O. V., Sorokin A. A., Ivanov M. G. Fabrication of Yb-doped  $\text{Lu}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3$  solid solutions transparent ceramics by self-propagating high-temperature synthesis and vacuum sintering. *Ceramics International*, 2018, vol. 45, no. 1, pp. 522–529. DOI 10.1016/j.ceramint.2018.09.204
11. Balabanov S. S., Ivanov M., Filofeev S. Fabrication and characterizations of erbium oxide based optical ceramics. *Optical Materials*, 2020, vol. 101, Article 109732. DOI 10.1016/j.optmat.2020.109732
12. Yakovlev A., Snetkov I., Permin D., Balabanov S., Palashov O. Faraday rotation in cryogenically cooled dysprosium based ( $\text{Dy}_2\text{O}_3$ ) ceramics. *Scripta Materialia*, 2019, vol. 161, pp. 32–35. DOI 10.1016/j.scriptamat.2018.10.011
13. Snetkov I. L., Yakovlev A. I., Permin D. A., Balabanov S. S., Palashov O. V. Magneto-optical Faraday effect in dysprosium oxide ( $\text{Dy}_2\text{O}_3$ ) based ceramics obtained by vacuum sintering. *Optics Letters*, 2018, vol. 43, pp. 4041–4044. URL: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm>
14. Kang J., Kim Y., Cho D. W., Sohn Y. Synthesis and physicochemical properties of  $\text{La}(\text{OH})_3$  and  $\text{La}_2\text{O}_3$  nanostructures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, vol. 40, pp. 737–743. DOI 10.1016/j.mssp.2015.07.050
15. Niasari M. S., Hosseinzadeh G., Davar F. Synthesis of lanthanum hydroxide and lanthanum oxide nanoparticles by sonochemical method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 4098–4103. DOI 10.1016/j.jallcom.2010.07.083
16. Shadiya M. A., Nandakumar N., Joseph R., George K. E. On the facile polyvinyl alcohol assisted sol-gel synthesis of tetragonal zirconia nanopowder with mesoporous structure. *Advanced Powder Technology*, 2017, vol. 28, pp. 3148–3157. DOI 10.1016/j.apt.2017.09.029
17. Siyong Gu, Mingli Qin, Houan Zhang, Jidong Ma. Fabrication of  $\text{La}_2\text{O}_3$  uniformly doped Mo nanopowders by solution combustion synthesis followed by reduction under hydrogen. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 12, pp. 2385. DOI 10.3390/ma11122385

18. Gowd G. S., Patra M. K., Songara S. Effect of doping concentration and annealing temperature on luminescence properties of  $Y_2O_3 : Eu^{3+}$  nanophosphor prepared by colloidal precipitation method. *Journal of Luminescence*, 2012, vol. 132, no. 8, pp. 2023–2029. DOI 10.1016/j.jlumin.2012.03.004
19. Mendez M., Carvajal J. J., Marsal L. F., Salagre P., Aguilo M., Diaz F., Formentin P., Pallares J., Cesteros Y. Effect of the  $La(OH)_3$  preparation method on the surface and rehydroxylation properties of resulting  $La_2O_3$  nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 2013, vol. 15, pp. 1–16. DOI 10.1007/s11051-013-1479-7
20. Kim So-Jin, Han Won-Kyu, Kang Sung-Goon, Han Min-Su, Cheong Young-Hun. Formation of lanthanum hydroxide and oxide via precipitation. *Solid State Phenomena*, 2008, vol. 135, pp. 23–26. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.135.23
21. Sharov V. A., Bezdenezhnykh G. V. Thermal decomposition of oxalates and carbonates of lanthanides, yttrium and scandium. *Uspekhi khimii*, 1981, vol. 50, no. 7, pp. 1197–1201 (in Russian).
22. Polyakov E. G. *Metallurgy of rare earth metals*. Moscow, Yurait Publ., 2021. 501 p. (in Russian).
23. Shtutsa M. G., Kardapolov A. B., Filippov V. B., Sysina H. A. Investigation of the process of precipitation of REE carbonates. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2003, vol. 306, no. 5, pp. 71–74 (in Russian).
24. Turcotte R. P., Sawyer J. O., Eiring L. R. On the rare-earth dioxymonocarbonates and their decomposition. *Inorganic Chemistry*, 1969, vol. 8, pp. 238–246. DOI 10.1021/ic50072a012
25. Komissarova L. N., Shatskii V. M., Pushkina G. Ya., Shcherbakova L. G., Mamsurova L. G., Sukhanova G. E. *Compounds of rare earth elements. Carbonates, oxalates, nitrates, titanates*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 235 p. (in Russian).
26. Igityan A., Agamalyan N., Ovsepyan R., Petrosyan S., Badalyan G., Gambaryan I., Papikyan A., Kafadaryan E. Negative differential conductivity of lanthanum oxide structures. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2020, vol. 54, no. 2, pp. 117–122 (in Russian). DOI 10.21883/FTP.2020.02.48915.9280
27. Klug H. P., Alexander L. E. *X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials*. New York, Wiley Publ., 1973. 687 p.
28. Nakamoto K. *IR and Raman spectra of inorganic and coordination compounds*. Moscow, Mir Publ., 1991. 450 p. (in Russian).
29. Mu Q., Wang Y. Synthesis, characterization, shape preserved transformation, and optical properties of  $La(OH)_3$ ,  $La_2O_2CO_3$ , and  $La_2O_3$  nanorods. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 396–401. DOI 10.1016/j.jallcom.2010.09.041

Поступила 01.09.2025 г.