

Гидротермальный синтез монокристаллического LaPO_4 : морфология и структура

¹Кенес К.М.*, ¹Алдабергенов М.К.,
²Проскурина О.В., ²Гусаров В.В.

¹Казахский национальный университет
им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический
университет), Санкт-Петербург, Россия
*E-mail: kenges.qayrat@gmail.com

Область применения материалов на основе ортофосфата лантана (LaPO_4), в том числе наноматериалов, в последнее время постоянно расширяется. Высокий уровень механических свойств и совместимость со многими оксидами позволяют рассматривать возможность использования ортофосфата лантана в качестве компонента композиционного материала конструкционного назначения. Такое применение особенно перспективно при использовании наночастиц с квазиодномерной морфологией (наностержней). Большая изоморфная ёмкость фазы на основе LaPO_4 по отношению к щёлочноземельным ионам, ионам лантаноидов и актиноидов, высокая химическая и радиационная стойкость делают перспективным использование этого соединения в качестве матрицы для иммобилизации радиоактивных отходов.

В работе рассматривается возможность получения ортофосфата лантана (LaPO_4) гидротермальным методом. Приведены результаты исследования влияния pH, температуры и времени обработки и гидротермального синтеза на морфологию и структуру монокристаллического фосфата лантана. Установлено, что с ростом pH меняется морфология фосфата и размеры кристаллитов, при этом наблюдается переход кристаллической структуры с гексагональной в моноклинную.

Ключевые слова: гидротермальный синтез; ортофосфат лантана; наноматериал; кристаллическая структура.

Монокристаллический LaPO_4 гидротермальный синтез: морфология и структура

¹Кенес К.М.*, ¹Алдабергенов М.К.,
²Проскурина О.В., ²Гусаров В.В.

¹Аль-Фараби атындағы Қазақ ұлттық
университеті, Алматы, Қазақстан

²Санкт-Петербург мемлекеттік техникалық
институты (техникалық университет),
Санкт-Петербург, Ресей
*E-mail: kenges.qayrat@gmail.com

Лантан ортофосфаты (LaPO_4) негізіндегі материалдардың, сонымен қатар наноматериалдардың қолдану аясы соңғы кезде кеңейіп жатыр. Жоғары механикалық беріктілігі мен басқа көптеген оксидтермен үйлесімділігі лантан ортофосфатын конструкциялық композиттік материалдардың компоненті ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Бұл бағытта квазибірлестемді морфологиясы бар нанобөлшектерді (наноталшықтарды) қолдану аса тиімді болып табылады. Сонымен қатар LaPO_4 негізіндегі фазаның сілтілікжер металдар иондарына, лантаноидтар мен актиноидтар иондарына қатысты үлкен изоморфты сыйымдылығы, жоғары химиялық және радиациялық тұрақтылығы бұл қосылысты радиоактивті қалдықтарды иммобилизациялайтын матрицалар ретінде қолдану ерекше перспективті. Бұл жұмыста лантан фосфатының (LaPO_4) гидротермальды әдіс арқылы алынуы қарастырылды. Гидротермальды синтездеу барысында монокристаллический лантан фосфатының морфологиясына және құрылысына гидротермальды өңдеу температурасының, уақытының және pH-тың әсері көрсетілген. pH өсуіне байланысты фосфаттың морфологиясы мен кристаллиттер өлшемінің өзгерісі және де кристалды құрылысының гексагональдіден моноклиндіге ауысуы байқалады.

Түйін сөздер: гидротермальды синтез; лантан фосфаты; наноматериал; кристалды құрылыс.

Hydrothermal synthesis of monostructured LaPO_4 : morphology and structure

¹Kenges K.M.*, ¹Aldabergenov M.K.,
²Proskurina O.V., ²Gusarov V.V.

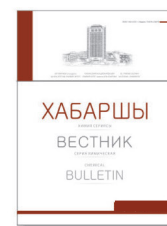
¹Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan

²St. Petersburg State Technological Institute
(Technical University), St. Petersburg, Russia
*E-mail: kenges.qayrat@gmail.com

The application field of materials based on lanthanum orthophosphate (LaPO_4) including nanomaterials, has been permanently extending recently. The high level of mechanical properties and the compatibility with numerous oxides make it possible to consider the possibility of using lanthanum orthophosphate as a composite material for construction purposes. This application is particularly promising when nanoparticles with quasi-1D morphology (nanorods) are used. The high isomorphous capacity of the LaPO_4 -based phase for alkaline-earth ions and ions of lanthanides and actinides, high chemical stability, and high radiation hardness make promising the application of this compound as a matrix for immobilization of radioactive wastes.

The possibility of obtaining lanthanum phosphate (LaPO_4) by the hydrothermal method is considered in the work. Effects of pH, temperature and time of processing of hydrothermal synthesis on the morphology and structure of monostructured lanthanum phosphate are studied. It has been established that, with the increase of pH, the morphology of phosphate changed, the size of the crystallites increased, while the crystal structure changed from hexagonal to monoclinic.

Keywords: hydrothermal synthesis; lanthanum phosphate; nanomaterials; crystal structure.



Гидротермальный синтез моноструктурного LaPO_4 : морфология и структура

¹Кенес К.М.*, ¹Алдабергенов М.К., ²Проскурина О.В., ²Гусаров В.В.

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: kenges.qayrat@gmail.com

1. Введение

Ортофосфат лантана потенциально может быть использован в качестве огнеупорных материалов и в иммобилизации радиоактивных отходов благодаря своим характеристикам, а именно: высокой температуры плавления [1], химической стойкости [2], теплофизическим [3] и термомеханическим свойствам [4]. Кроме того, материалы на основе фосфата лантана, легированные различными ионами могут найти свое применение в качестве люминофоров из-за отличных оптических характеристик, эти материалы в дальнейшем используются для изготовления изделий, таких как оптические панели дисплея, электронно-лучевые трубки и плазменные панели [5-10].

Известно, что уменьшение размера частиц в кристаллической структуре может приводить к видимым изменениям физико-механических свойств, которые отличаются из-за высокого отношения поверхности к объему и эффекта квантового удержания наноразмерных материалов [11].

Ранее синтез наноматериалов на основе LaPO_4 проводился различными методами, такими как жидкофазная реакция [12], сонохимический метод [14], осаждение [15], сольвотермический/гидротермальный метод [13,16] и твердофазная реакция [17]. Осаждение из растворов и зольгельные методы позволяют получать преимущественно гексагонально структурированные кристаллические вещества с изометрическим микро- [12,18,19] и наночастицами [20,21], Ортофосфат в виде безводного соединения с моноклинной структурой типа монацита — $m\text{-LaPO}_4$ имеет более широкое применение, чем его кристаллогидрат $\text{LaPO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ с гексагональной

структурой типа рабдофана [22] — $h\text{-LaPO}_4$, в виду его устойчивости к высоким температурам.

Процесс получения соединения гидротермальным синтезом зависит от различных факторов, среди которых следует упомянуть pH среды, время и температура обработки раствора [23,24]. Полученные таким методом наноматериалы имеют разные морфологические свойства и кристаллические структуры.

В настоящей работе рассматривается влияние условий синтеза гидротермальным методом на получение LaPO_4 . Приводятся его свойства, морфологические характеристики наноматериала, типы кристаллических структур полученных соединений в зависимости от различных условий гидротермального синтеза.

2. Эксперимент

В качестве исходных веществ при синтезе ортофосфата лантана (LaPO_4) использовали растворы нитрата лантана (х.ч., Россия) и монозамещенного фосфата аммония $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ч., Россия). Раствор фосфата аммония при перемешивании добавляли к раствору нитрата лантана. Перемешивание осуществляли в течение 5 мин, после чего регулировали pH раствора. Полученный раствор имел pH=1, а для увеличения pH добавляли гидроксид аммония. Гидротермальную обработку проводили при разных температурах (150, 190 и 220°C), pH (1, 5 и 8) и времени изотермической выдержки – 3 и 6 ч. Полученный осадок отделяли центрифугированием, промывали дистиллированной водой и высушивали при 80°C в течение 8 ч.

Рентгенодифракционный анализ образцов проводили по порошковым дифрактограммам, полученным с

использованием рентгеновского дифрактометра SmartLab 3 (CuK α -излучение) (Rigaku, Япония) в диапазоне углов $2\theta = 12-50^\circ$ с шагом $0,01^\circ$ и скоростью сканирования 2 град/мин. Рентгенофазовый анализ образцов выполняли с использованием базы данных PDF-2. Размеры кристаллитов определяли с помощью программного пакета SmartLab Studio II (Rigaku, Япония). Морфологические особенности, элементный состав образцов и отдельных его частей определяли с использованием сканирующего электронного микроскопа Vega 3 SBH (Tescan, Чехия) с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа Oxford Instruments (Великобритания). Анализ микрофотографий осуществляли с использованием программного комплекса VideoTest. Размеры частиц фосфата лантана определяли методом динамического светорассеяния на приборе SALD-7500 nano (Shimadzu, Япония).

3. Результаты и их обсуждение

Анализ элементного состава образцов, полученных после промывания и сушки составов после гидротермальной обработки, показал, что соотношение элементов La/P варьируется в интервале 4,1- 4,5, т.е. в пределах погрешности метода можно считать его отвечающим стехиометрии LaPO_4 .

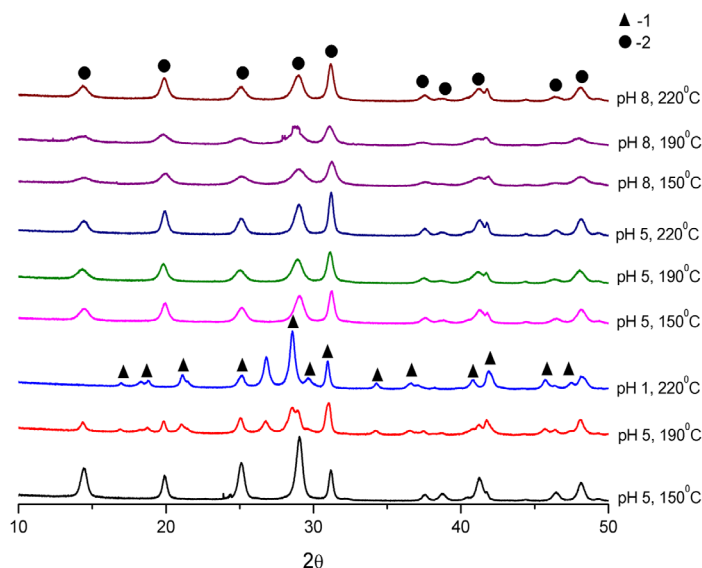
Данные рентгеновской дифрактометрии ортофосфата лантана, синтезированного в гидротермальных условиях при разных температурах и pH приведены на рисунке 1. Анализ этих данных показывает, что образцы, синтезированные при pH=1, и с температурой выдержки выше 190°C имеют моноклинную (монацит) структуру, а

образцы с pH=5 и pH=8 при тех же температурах имеют гексагональную (рабдофан) структуру.

Этот эффект можно объяснить полимерными свойствами фосфатных соединений, а также разницей концентраций La^{3+} и PO_4^{3-} . Как показано в [25], при pH=1 концентрации ионов PO_4^{3-} и La^{3+} равны, что способствует образованию моноклинной структуры. При увеличении pH раствора концентрация HPO_4^{2-} и H_2PO_4^- увеличивается, что улучшает образование рабдофановой структуры, которая имеет в кристаллической структуре молекулы воды.

Трансформация фазы со структурой рабдофана в структуру монацита инициируется выделением воды из структуры, однако некоторое время безводный $h\text{-LaPO}_4$ сохраняет свою структуру, оставаясь в метастабильном состоянии, что связано, по-видимому, с тем, что трансформация $h \rightarrow m\text{-LaPO}_4$ сопряжена со значительными структурными изменениями.

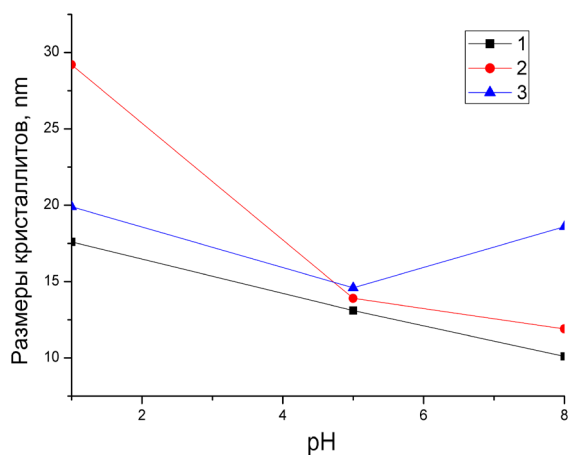
В этом плане переход $h\text{-LaPO}_4 \rightarrow m\text{-LaPO}_4$ в некоторой степени, подобен трансформации наночастиц $c(t)\text{-ZrO}_2 \rightarrow m\text{-ZrO}_2$, связанной с потерей H_2O [26, 27]. Следовательно, понизить температуру структурной трансформации LaPO_4 можно путём понижения температуры выделения кристаллогидратной воды из ортофосфата лантана со структурой рабдофана. Использование методов синтеза LaPO_4 в безводных средах, или в средах, в которых химический потенциал H_2O очень мал, приведет к тому, что $h\text{-LaPO}_4$ станет неустойчивым во всём диапазоне температур, и на первом же этапе синтеза ортофосфата лантана сможет формироваться соединение со структурой монацита — $m\text{-LaPO}_4$.



Примечания: 1 – фаза LaPO_4 со структурой монацита (PDF 32-493), 2 – фаза LaPO_4 со структурой рабдофана (PDF 4-635).

Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы ортофосфата лантана, полученные при разных значениях pH (1, 5, 8) и температуры (150, 190 и 220°C), время выдержки 6 ч

На рисунке 2 приведены результаты изменений размера кристаллитов в зависимости от температуры выдержки и pH. Следует отметить, что с повышением температуры обработки увеличиваются размеры кристаллитов монацитной структуры, которые образуются при pH=1 и температуре обработки 190 и 220°C, а размер кристаллитов рабдофановой структуры уменьшается. Увеличение размера монацитной структуры может быть связано как с кинетическими параметрами, так и с термодинамическими факторами.



Примечание: 1 – 150°C, 2 – 190°C, 3 – 220°C.

Рисунок 2 – Зависимость размера кристаллитов LaPO_4 от температуры обработки и pH

Морфологию наноструктур LaPO_4 исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Из микрофотографий SEM (рисунок 3) видно, что частицы синтезированных продуктов LaPO_4 имеют разные формы (наночастицы и наностержни) в зависимости от pH предшественника системы. При pH=1 были получены длинные наностержни, средняя длина которых $l=1-3$ мкм, толщина 50-80 нм, а при pH=5 агломераты наночастиц уменьшались по длине. При pH=8 образовались шарообразные частицы, средний диаметр округлых частиц $D=0,1-1$ мкм (таблица 1).

Синтезированный LaPO_4 имеет гексагональную кристаллическую структуру. Анизотропный рост кристаллов с гексагональной структурой, например таких, как ZnO , $\text{Ln}(\text{OH})_3$, хорошо известен. В этом процессе морфология конечного продукта во многом определяется анизотропностью строительных блоков, то есть 1D-характеристик бесконечных линейных цепей моноклинно-структурированного LaPO_4 .

Частицы исходного соосажденного ортофосфата лантана имеют гексагональную структуру и шарообразную форму размером около 80-100 нм. При гидротермальном нагреве выше 100°C частицы начинают растворяться и образовывать полимерные фосфатные наночастицы. На рисунке 4 показано изменение распределения частиц по размеру после гидротермальной обработки при 90 и 150°C в суспензии до сушки образцов. Размеры и распределение частиц LaPO_4 определяли методом динамического светорассеяния. Размеры частиц коррелируют с размерами, определенными по микрофотографиям СЭМ.

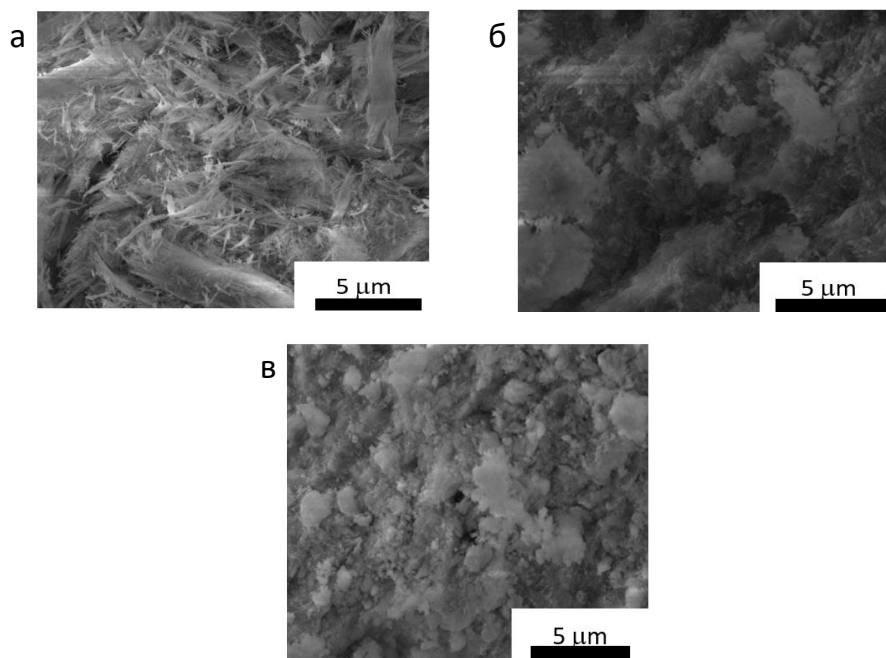
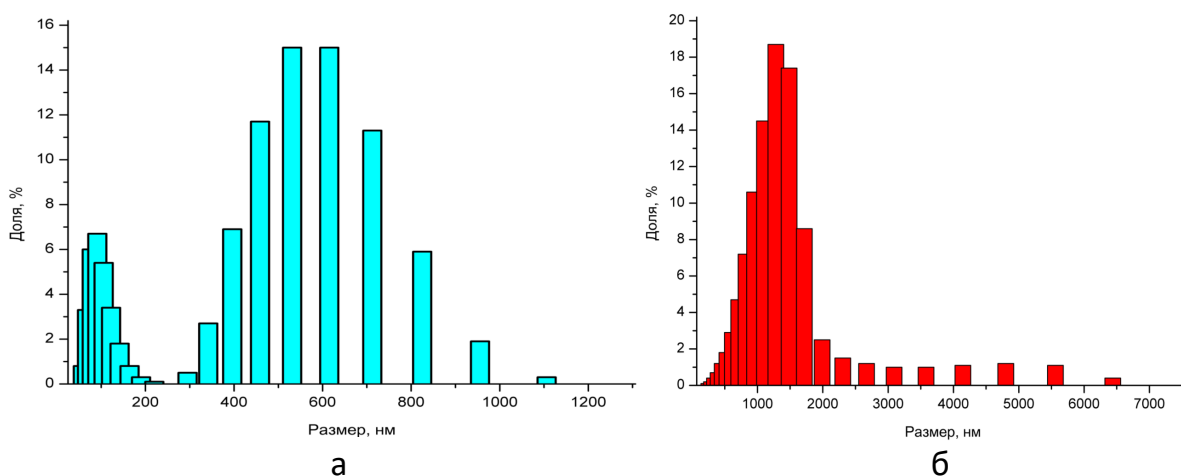


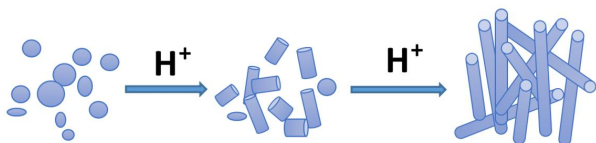
Рисунок 3 – Микроструктуры образцов, полученных при pH 1 (а), 5 (б) и 8 (в)

Таблица 1 – Нанокристаллы LaPO_4 полученные в разных температурных режимах и pH методом гидротермального синтеза, время выдержки 6 ч

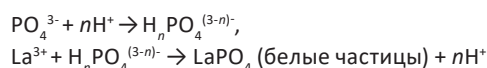
Шифр образца	pH	Температура, °C	Морфология	Структура
1	1	150	наностержни	гексагональная
2	1	190	наностержни	моноклинная
3	1	220	наностержни	моноклинная
4	5	150	наностержни+ шарообразные	гексагональная
5	5	190	наностержни+ шарообразные	гексагональная
6	5	220	наностержни+ шарообразные	гексагональная
7	8	150	шарообразные	гексагональная
8	8	190	шарообразные	гексагональная
9	8	220	шарообразные	гексагональная

**Рисунок 4** – Распределение по размеру частиц фосфата лантана после гидротермальной обработки при pH=1 при (а) 90°C и (б) 150°C

После выдержки при температуре 190°C и pH=1 эти наночастицы могут служить в качестве анизотропных зародышей для роста высоко анизотропных наноструктур с помощью механизма растворения и кристаллизации во время обработки. Как было предложено в работе [28], атомы лантаноидов в структуре монацита координируются с девятью атомами кислорода, образуя многогранник пентагональных взаимопроникающих тетраэдров, а девятикоординатные атомы лантаноидов апикально объединены искаженными тетраэдрическими PO_4^{3-} -группами, которые образуют цепи во время гидротермальной обработки (рисунок 5).

**Рисунок 5** – Схематическая диаграмма изменения морфологии наночастиц фосфата лантана с повышением pH раствора

Возможный механизм образования LaPO_4 фосфатных наноматериалов:



Обобщая полученные результаты, можно заключить, что для получения наностержней с монацитной структурой необходимы следующие условия гидротермальной обработки осажденного фосфата лантана: pH=1, температура 190°C, время выдержки 6 ч.

4. Заключение

Таким образом, в данной работе показана зависимость морфологии, размеров кристаллитов и структуры фосфата лантана от pH, температуры и времени гидротермальной обработки. Гидротермальная обработка при температуре 190°C и pH=1 приводит к росту высокоанизотропных наноструктур с помощью механизма растворения и кристаллизации, после которого

образуются наностержени монацитного фосфата лантана.

Зависимость размеров кристаллитов LaPO_4 от температуры обработки объясняется образованием многочисленных центров зарождения и термодинамическими параметрами.

Определены технологические условия получения нанопорошков безводного ортофосфата лантана со структурой монацита для дальнейшего использования в керамических материалах, в частности, матриц для хранения радиоактивных отходов.

Благодарности

Рентгенодифракционные исследования, комплексный термический анализ, сканирующая электронная микроскопия и элементный анализ образцов выполнены на приборах Инжинирингового центра Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00532).

Список литературы

- Hikichi Y., Nomura T. Melting temperatures of monazite and xenotime // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1987. – Vol.70, Is.10. – P.252-253.
- Ananthapadmanabhan P.V., Sreekumar K.P., Thiagarajan T.K. et al. Plasma spheroidization and high temperature stability of lanthanum phosphate and its compatibility with molten uranium // *Materials Chemistry and Physics*. – 2009. – Vol.113, Is.1. – P.417-421.
- Gavrichev K.S., Ryumin M.A., Tyurin A.V. et al. Thermal behavior of $\text{LaPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ and $\text{NdPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ nanopowders // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2010. – Vol.102, Is. 2. – P.809-811.
- Bryukhanova K.I., Nikiforova G.E., Gavrichev K.S. Synthesis and study of anhydrous lanthanide orthophosphate (Ln = La, Pr, Nd, Sm) nanowhiskers // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2016. – Vol.7, Is.3. – P.451-458.
- Ronda C.R. Recent achievements in research on phosphors for lamps and displays // *Journal of Luminescence*. – 1997. – Vol.72-74. – P.49-54.
- Rambabu U., Amalnerkar D.P., Kale B.B., Buddhud S. Optical properties of $\text{LnPO}_4:\text{Tb}^{3+}$ (Ln = Y, La and Gd) powder phosphors // *Materials Chemistry and Physics*. – 2001. – Vol.71, Is.1. – P.1-6.
- Rambabu U., Munirathnam N.R., Prakash T.L., Buddhudu S. Emission spectra of $\text{LnPO}_4:\text{RE}^{3+}$ (Ln=La, Gd; RE=Eu, Tb and Ce) powder phosphors // *Materials Chemistry and Physics*. – 2003. – Vol.78, Is.1. – P.160-169.
- Kang Y.C., Kim E.J., Lee D.Y., Park H.D. High brightness $\text{LaPO}_4:\text{Ce},\text{Tb}$ phosphor particles with spherical shape // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2002. – Vol.347, Is.1-2. – P.266-270.
- Lenggoro I.W., Xia B., Mizushima H., Okuyama K., Kijima N. Synthesis of $\text{LaPO}_4:\text{Ce},\text{Tb}$ phosphor particles by spray pyrolysis // *Materials Letters*. – 2001. – Vol.50, Is.2-3. – P.92-96.
- Buddhudu S., Kam C.H., Ng S.L., Lam Y.L., Ooi B.S., Zhou Y., Wong K.S., Rambabu U. Green color luminescence in $\text{Tb}^{3+}:(\text{La},\text{Ln})\text{PO}_4$ (Ln=Gd or Y) photonic materials // *Materials Science and Engineering: B*. – 2000. – Vol.72, Is.1. – P.27-30.
- Yu L., Song H., Lu S., Liu Z., Yang L., Kong X. Luminescent Properties of $\text{LaPO}_4:\text{Eu}$ Nanoparticles and Nanowires // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2004. – Vol.108, Is.43. – P. 16697-16702.
- Kenges K.M., Proskurina O.V., Danilovich D.P., Aldabergenov M.K., Gusarov V.V. Synthesis and properties of nanocrystalline materials based on LaPO_4 // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2017. – Vol.90, Is.7. – P.1047-1053.
- Yang P., Quan Z., Li C., Hou Z., Wang W., Lin J. Solvothermal synthesis and luminescent properties of monodisperse $\text{LaPO}_4:\text{Ln}$ (Ln, Eu^{3+} , Ce^{3+} , Tb^{3+}) particles // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2009. – Vol.182, Is.5. – P.1045-1054.
- Yu C., Yu M., Li C., Liu X., Yang J., Yang P., Lin J. Facile sonochemical synthesis and photoluminescent properties of lanthanide orthophosphate nanoparticles // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2009. – Vol.182, Is.2. – P.339-347.
- Wang R., Pan W., Chen J., Fang M., Meng J. Effect of LaPO_4 content on the microstructure and machinability of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{LaPO}_4$ composites // *Materials Letters*. – 2002. – Vol.57, Is.4. – P.822-827.
- Yao W.T., Yu S.H. Recent advances in hydrothermal syntheses of low dimensional nanoarchitectures // *International Journal of Nanotechnology*. – 2007. – Vol.4, Is.1/2. – P.129-162.
- Ruigang W., Wei P., Jian C., Minghao F., Zhenzhu C., Yongming L., Synthesis and sintering of LaPO_4 powder and its application // *Materials Chemistry and Physics*. – 2003. – Vol.79, Is.1. – P.30-36.
- Kijkowska R. Preparation of lanthanide orthophosphates by crystallisation from phosphoric acid solution // *Journal of Materials Science*. – 2003. – Vol.38, Is.8. – P. 229-233.
- Boakye E.E., Mogilevsky P., Hay R.S. Synthesis of nanosized spherical rhabdophane particles // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2005. – Vol.88, Is.10. – P. 2740-2746.
- Gavrichev K.S., Ryumin M.A., Tyurin A.V., Khoroshilov A.V., Mezentseva L.P. et al. Thermal behavior of $\text{LaPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ and

- $\text{NdPO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ nanopowders // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2010. – Vol.102, Is.2. – P.809-811.
- 21 Li L., Jiang W., Pan H., Xu X., Tang Y. et al. Improved luminescence of lanthanide (III) doped nanophosphors by linear aggregation // Journal of Physical Chemistry C. – 2007. – Vol.111, Is.11. – P.4111-4115.
- 22 Осипов А.В., Мезенцева Л.П., Дроздова И.А., Кучаева С.К., Уголков В.Л., Гусаров В.В. Смешанные нанокристаллы в системе $\text{YPO}_4\text{--LuPO}_4\text{--H}_2\text{O}$ // Физика и химия стекла. – 2007. – Т.33, №2. – С.235-240.
- 23 Осипов А.В., Мезенцева Л.П., Дроздова И.А., Кучаева С.К., Уголков В.Л., Гусаров В.В. Получение и термические превращения нанокристаллов в системе $\text{LaPO}_4\text{--LuPO}_4\text{--H}_2\text{O}$ // Физика и химия стекла. – 2009. – Т.35, №4. – С.568-574.
- 24 Mooney R.C.L. X-ray diffraction study of cerous phosphate and related crystals. I. Hexagonal modification // Acta Crystallographica. – 1950. – Vol.3, Is.5. – P.337-340.
- 25 Bryukhanova K.I., Nikiforova G.E., Gavrichev K.S. Synthesis and study of anhydrous lanthanide orthophosphate (Ln = La, Pr, Nd, Sm) nanowhiskers // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2016. – Vol.7, Is.3. – P.451-458.
- 26 Альмяшева О.В., Денисова Т.А. Состояние воды в нанокристаллах диоксида циркония, полученных в гидротермальных условиях, и ее влияние на структурные превращения // Журнал общей химии. – 2017. – Т.87, №1. – С.3-10.
- 27 Almjasheva O.V. Heat-stimulated transformation of zirconium dioxide nanocrystals produced under hydrothermal conditions // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2015. – Vol.6, Is.5. – P.697-703.
- 28 Mullica D.F., Milligan W.O., Grossie D.A., Beall G.W., Boatner L.A. Ninefold coordination LaPO_4 : Pentagonal interpenetrating tetrahedral polyhedron // Inorganica Chimica Acta. – 1984. – Vol.95, Is.4. – P.231-236.

References

- 1 Hikichi Y, Nomura T (1987) J Am Ceram Soc 70:252-253. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1987.tb04890.x>
- 2 Ananthapadmanabhan PV, Sreekumar KP, Thiagarajan TK et al (2009) Mater Chem Phys 113:417-421. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.07.057>
- 3 Gavrichev KS, Ryumin MA, Tyurin AV et al (2010) J Therm Anal Calorim 102:809-811. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-0866-x>
- 4 Bryukhanova KI, Nikiforova GE, Gavrichev KS (2016) Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics 7:451-458. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2016-7-3-451-458>
- 5 Ronda CR (1997) J Lumin 72:74-49. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(96\)00374-2](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(96)00374-2)
- 6 Rambabu U, Amalnerkar DP, Kale BB, Buddhuduc S (2001) Mater Chem Phys 71:1-6. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00292-3](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00292-3)
- 7 Rambabu U, Amalnerkar DP, Kale BB, Buddhuduc S (2003) Mater Chem Phys 78:160-169. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00294-8](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00294-8)
- 8 Kang YC, Kim EJ, Lee DY, Park HD (2002) J Alloy Compd 347:266-270. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)00747-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00747-8)
- 9 Lenggoro IW, Xia B, Mizushima H, Okuyama K, Kijima N (2001) Mater Lett 50:92-96. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00422-5](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00422-5)
- 10 Buddhudu S, Kam CH, Ng SL, Lam YL, Ooi BS, Zhou Y, Wong KS, Rambabu U (2000) Mater Sci Eng B-Adv 72:27-30. [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(00\)00339-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(00)00339-1)
- 11 Yu L, Song H, Lu S, Liu Z, Yang L, Kong X (2004) J Phys Chem B 108:16697-16702. <https://doi.org/10.1021/jp047688c>
- 12 Kenges KM, Proskurina OV, Danilovich DP, Aldabergenov MK, Gusarov VV (2017) Russ J Appl Chem+ 90:1047-1053. <https://doi.org/10.1134/S1070427217070047>
- 13 Yang P, Quan Z, Li C, Hou Z, Wang W, Lin J (2009) J Solid State Chem 182:1045-1054. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2009.01.024>
- 14 Yu C, Yu M, Li C, Liu X, Yang J, Yang P, Lin J (2009) J Solid State Chem 182:339-347. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2008.10.023>
- 15 Wang R, Pan W, Chen J, Fang M, Meng J (2002) Mater Lett 57:822-827. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00880-7](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00880-7)
- 16 Yao WT, Yu SH (2007) Int J Nanotechnol 4:129-162. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2007.012320>
- 17 Ruigang W, Wei P, Jian C, Minghao F, Zhenzhu C, Yongming L (2003) Mater Chem Phys 79:30-36. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00420-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00420-0)
- 18 Kijkowska R (2003) J Mater Sci 38:229-233. <https://doi.org/10.1023/A:1021140927187>
- 19 Boakye EE, Mogilevsky P, Hay RS (2005) J Am Ceram Soc 88:2740-46. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00525.x>
- 20 Gavrichev KS, Ryumin MA, Tyurin AV, Khoroshilov AV, Mezentseva LP et al (2010) J Therm Anal Calorim 102:809-811. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-0866-x>
- 21 Li L, Jiang W, Pan H, Xu X, Tang Y et al (2007) J Phys Chem 111:4111-15. <https://doi.org/10.1021/jp068464s>
- 22 Osipov AV, Mezentseva LP, Drozdova IA, Kuchaeva SK, Ugolkov VL, Gusarov VV (2007) Glass Phys Chem+ 33:169-173. <https://doi.org/10.1134/S1087659607020125>
- 23 Osipov AV, Mezentseva LP, Drozdova IA, Kuchaeva SK, Ugolkov VL, Gusarov VV (2009) Glass Phys Chem+ 35:431-435. <https://doi.org/10.1134/S1087659609040130>

-
- 24 Mooney RCL (1950) *Acta Crystallogr* 3:337-340. <https://doi.org/10.1107/S0365110X50000963>
- 25 Bryukhanova KI, Nikiforova GE, Gavrichev KS (2016) *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics* 7:451-458. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2016-7-3-451-458>
- 26 Almjasheva OV, Denisova TA (2017) *Russ J Gen Chem* 87:1-7. <https://doi.org/10.1134/S1070363217010017>
- 27 Almjasheva OV (2015) *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics* 6: 697-703. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2015-6-5-697-703>
- 28 Mullica DF, Milligan WO, Grossie DA, Beall GW, Boatner LA (1984) *Inorg Chim Acta* 95:231-236. [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)87472-1](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)87472-1)