

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-1-10

УДК 54.057

Структурные и спектральные свойства нанокристаллических порошков АИГ:Nd, АИГ:Ce и АИГ:Yb, синтезированных модифицированным методом Печини

Амир Муссауи¹, Дмитрий Владимирович Булыга²✉, Александр Иванович Игнатъев³, Сергей Константинович Евстропьев⁴, Николай Валентинович Никоноров⁵

^{1,2,3,4,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{2,4} Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

⁴ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

¹ am.moussaoui92@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7858-7417>

² dmbulyga@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>

³ alexandre_ignatiev@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-6114-0248>

⁴ evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

⁵ Nikonorov@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

Аннотация

Введение. В работе исследованы структурные и люминесцентные свойства нанокристаллических порошков состава $Y_3Al_5O_{12}:Re^{3+}$ ($Re^{3+} = Nd^{3+}, Yb^{3+}, Ce^{3+}$), синтезированных модифицированным методом Печини с использованием поливинилпирролидона в качестве дополнительного стабилизатора и органического «топлива» в ходе синтеза. **Метод.** Для исследования термической эволюции гелей и свойств конечного продукта применены фурье-спектроскопия, люминесцентная спектроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия, сканирующая электронная микроскопия, а также рентгенофазовый анализ. **Основные результаты.** Показано, что применение модифицированного метода Печини при использовании добавок поливинилпирролидона в исходные растворы обеспечивает получение высокодисперсных порошков алюмоиттриевого граната, содержащих редкоземельные ионы. Установлено, что введение поливинилпирролидона оказывает существенное влияние на эволюцию композиционных гелей при их термообработке и формирование нанокристаллов алюмоиттриевого граната происходит при температуре около 883 °С. **Обсуждение.** Полученные в работе нанокристаллические порошки могут быть использованы в качестве прекурсоров для спекания лазерной керамики и введены в оптическое волокно для создания усилителей.

Ключевые слова

алюмоиттриевый гранат, люминесценция, метод Печини, поливинилпирролидон

Ссылка для цитирования: Муссауи А., Булыга Д.В., Игнатъев А.И., Евстропьев С.К., Никоноров Н.В. Структурные и спектральные свойства нанокристаллических порошков АИГ:Nd, АИГ:Ce и АИГ:Yb, синтезированных модифицированным методом Печини // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 1. С. 1–10. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-1-10

Structural and spectral properties of YAG:Nd, YAG:Ce and YAG:Yb nanocrystalline powders synthesized via modified Pechini method

Amir Moussaoui¹, Dmitry V. Bulyga², Aleksandr I. Ignatiev³, Sergey K. Evstropiev⁴, Nikolay V. Nikonorov⁵

^{1,2,3,4,5} ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation

^{2,4} JVC “RPA Vavilov State Optical Institute”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation

⁴ Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

¹ am.moussaoui92@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7858-7417>

² dmbulyga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>

³ alexandre_ignatiev@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-6114-0248>

⁴ evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

⁵ Nikonorov@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

Abstract

Synthesis of nanocrystalline yttrium-aluminum garnet doped with neodymium was performed via modified Pechini methods. Evolution of material during synthesis was studied using differential thermal analysis; the structure and morphology of synthesized nanopowders were studied using scanning electron microscopy and x-ray diffraction. It was shown that the use of an additional low-temperature stabilizer leads to formation of crystalline yttrium-aluminum garnet phase at lower temperatures. It was shown that the formation of nanocrystals occurs at the temperature of about 883 °C. Obtained powders can be used as precursors for ceramics sintering or be introduced into the optical fiber in order to fabricate optical amplifiers.

Keywords

YAG, luminescence, Pechini method, polyvinylpyrrolidone

For citation: Moussaoui A., Bulyga D.V., Ignatiev A.I., Evstropiev S.K., Nikonorov N.V. Structural and spectral properties of YAG:Nd, YAG:Ce and YAG:Yb nanocrystalline powders synthesized via modified Pechini method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 1–10 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-1-10

Введение

Кристаллы алюмоиттриевого граната (АИГ, $Y_3Al_5O_{12}$), активированные редкоземельными компонентами, широко применяются в оптике и оптоэлектронике, благодаря высоким спектрально-люминесцентным свойствам [1–5]. Структура и свойства этого материала хорошо известны, и он широко используется в виде монокристаллов и поликристаллической оптической керамики в различных лазерных системах.

АИГ, легированный ионами редкоземельных металлов, широко применяется в производстве дисплеев и лазеров [6, 7]. АИГ, содержащий редкоземельные модификаторы, в виде дисперсных порошков применяется в светодиодной технике, сенсорике и нанотермометрии [1, 8, 9] и является промежуточным продуктом при формировании лазерной керамики [5, 10]. При использовании высокодисперсных порошков АИГ важную роль играют морфология материала, размер кристаллов и особенности их кристаллической структуры, в значительной мере определяющиеся методом и технологическими условиями его получения [11–13].

Нанокристаллические порошки АИГ могут быть получены при помощи твердофазного синтеза [14], золь-гель метода [11], метода сжигания органического топлива (combustion synthesis) [8, 12], гидротермального синтеза [15], пиролиза аэрозолей [13], осаждения из раствора [16], полимерно-солевого метода [9, 10]. Одним из наиболее простых и эффективных методов получения порошков АИГ является золь-гель метод Печини, в котором в качестве стабилизатора и органического топлива используется лимонная кислота. Данный метод универсален, не требует сложного технологического оборудования и обеспечивает форми-

рование дисперсных оксидных порошков с высокими люминесцентными свойствами [17].

В работе [17] для получения высокодисперсных порошков Gd_2O_3 , содержащих ионы Nd^{3+} , был использован модифицированный метод Печини, в котором, наряду с относительно низкотемпературным, традиционно используемым стабилизатором (лимонная кислота), применялись добавки в исходные растворы поливинилпирролидона (ПВП). Этот растворимый органический полимер образует в растворах металлополимерные комплексы [18], разлагается при нагревании до температур более 400 °C и широко используется в формировании различных наночастиц полимерно-солевым методом [9, 10]. Лимонная кислота образует хелатные комплексы с ионами металлов, что позволяет использовать ее в качестве стабилизатора при высушивании растворов для сохранения однородности и предотвращения выпадению осадков солей металлов. Использование двух стабилизаторов (ПВП и лимонной кислоты) с различными температурами разложения позволяет продлить процесс выделения газообразных продуктов реакции и тем самым повысить дисперсность синтезируемых порошков [17].

Целью данной работы является синтез нанокристаллических порошков состава АИГ:Re³⁺ (Re: Ce³⁺, Yb³⁺, Nd³⁺) модифицированным методом Печини [17] с использованием ПВП и без него, а также исследование фазового состава, структуры, морфологии поверхности и люминесцентных свойств полученного материала.

Материалы и методы

В процессе синтеза были использованы следующие химические реактивы: нитрат иттрия (Y) 6-во-

дний (химический чистый (ХЧ)), нитрат алюминия (Al) 9-водный (ХЧ), нитрат церия (Ce) 6-водный (ХЧ), нитрат неодима (Nd) 6-водный (ХЧ), хлорид иттербия (Yb) 6-водный (ХЧ), лимонная кислота 1-водная, ПВП (Sigma Aldrich, $M_w = 1\ 300\ 000$) и дистиллированная деионизованная вода. ПВП и лимонная кислота играют роль стабилизаторов в ходе синтеза, препятствующих выпадению осадка в ходе высушивания раствора, а также органического топлива, препятствующего дальнейшему росту нанокристаллов в ходе термообработки за счет выделения газообразных продуктов разложения.

Химический состав исходных растворов представлен в табл. 1. Было приготовлено шесть растворов с использованием ПВП и без него, соответствующих составам конечных продуктов АИГ:Ce³⁺, АИГ:Nd³⁺, АИГ:Yb³⁺. После тщательного перемешивания при температуре 70 °С в течение двух часов растворы высушивались при той же температуре, затем полученные гели в течение двух часов подвергались термообработке в муфельной печи при температуре 1000 °С. Рассчитанный химический состав полученных нанокристаллических порошков (далее по тексту: нанопорошки 1–6) соответствует АИГ с 1,0 мол.% R₂O₃ (R = Ce, Nd, Yb). Поскольку Ce, Nd, Yb имеют большую атомную массу, изменение их массы в ходе термообработки гелей незначительно.

Выполним исследование термической эволюции гелей и свойства синтезированных нанокристаллических порошков следующими методами: фурье-спектроскопии, люминесцентной спектроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии, сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

Рассмотрим кристаллическую структуру и фазовый состав материалов с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV. Оценку среднего размера кристаллов проведем по формуле Шеррера. Осуществим регистрацию спектров инфракрасного поглощения порошков с использованием фурье-спектрометра Bruker ALPNA с приставкой на неполное внутреннее отражение.

Проведем исследования термической эволюции гелей на дифференциальном сканирующем калориметре STA 449F1 Jupiter (Netzsch), а морфологии частиц порошков на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 TESCAN. Спектры люминесценции в диапазоне $\lambda = 250\text{--}800$ нм изучим на спектрофлуориметре Perkin-Elmer LS 50B.

Экспериментальные результаты

Термообработка высушенных гелей привела к полному разложению органических соединений, что вызвало уменьшение массы образцов и термические эффекты. На рис. 1 представлены данные дифференциальной сканирующей калориметрии для растворов гелей 3 и 4. Небольшой эндотермический процесс, наблюдающийся в диапазоне температур 20–120 °С с потерей массы около 5 % (рис. 1, а), связан с дегидратацией гелей. Экзотермические процессы, происходящие в области температур 120–750 °С, связаны с разложением цитратов, нитратов и ПВП, окислением органических соединений (120–450 °С) и последующим окислением остаточного углерода кислородом воздуха с экзотермическим эффектом (450–750 °С) до полного разложения органических остатков.

Небольшой эндотермический процесс, наблюдающийся для геля 4 при температурах до 120 °С с потерей массы около 5 % связан с дегидратацией геля (рис. 1, б). В области температур 120–700 °С наблюдается ряд экзотермических процессов. Эффекты в области температур 200–600 °С соответствуют окислению кислородом воздуха и нитратами металлов органических соединений и остаточного углерода, а также могут быть связаны с образованием аморфных оксидов.

Согласно данным рентгенофазового анализа [17] в ходе синтеза оксида гадолиния модифицированным методом Печини, при 600 °С материал почти полностью состоит из аморфной фазы, в нем также содержатся кристаллические частицы со средним размером порядка 10 нм. При 1000 °С порошок полностью состоит из кристаллической фазы. Отсюда можно сделать вывод, что экзотермические пики с максимумами 883 °С (рис. 1, а) и 895 °С (рис. 1, б) связаны с образованием кристаллического АИГ из аморфных оксидов, образовавшихся при прокаливании гелей. В [19] образование кристаллов АИГ:Ce³⁺ из растворов гелей, полученных при использовании добавок этиленгликоля, наблюдалось при 900 °С. Формирование кристаллической фазы АИГ:Nd³⁺ при термообработке нанопорошков, полученных методом соосаждения при применении гидрокарбоната аммония [20] или мочевины [21], происходило при температурах 948 °С [20] и 900 °С [21]. В [22] образование кристаллической фазы АИГ:Eu³⁺ из растворов гелей также наблюдалось при температуре 900 °С.

Таблица 1. Химический состав исходных растворов

Table 1. Chemical composition of the initial solutions

Номер раствора	Концентрация, масс.%							
	Вода	ПВП	Лимонная кислота	Y(NO ₃) ₃	Al(NO ₃) ₃	Ce(NO ₃) ₃	Nd(NO ₃) ₃	YbCl ₃
1	87,20	5,11	4,26	1,48	1,92	—	0,03	—
2	91,91	—	4,50	1,56	2,00	—	0,03	—
3	87,20	5,11	4,26	1,48	1,92	0,03	—	—
4	91,91	—	4,50	1,56	2,00	0,03	—	—
5	87,21	5,11	4,26	1,48	1,92	—	—	0,02
6	91,91	—	4,50	1,56	2,00	—	—	0,02

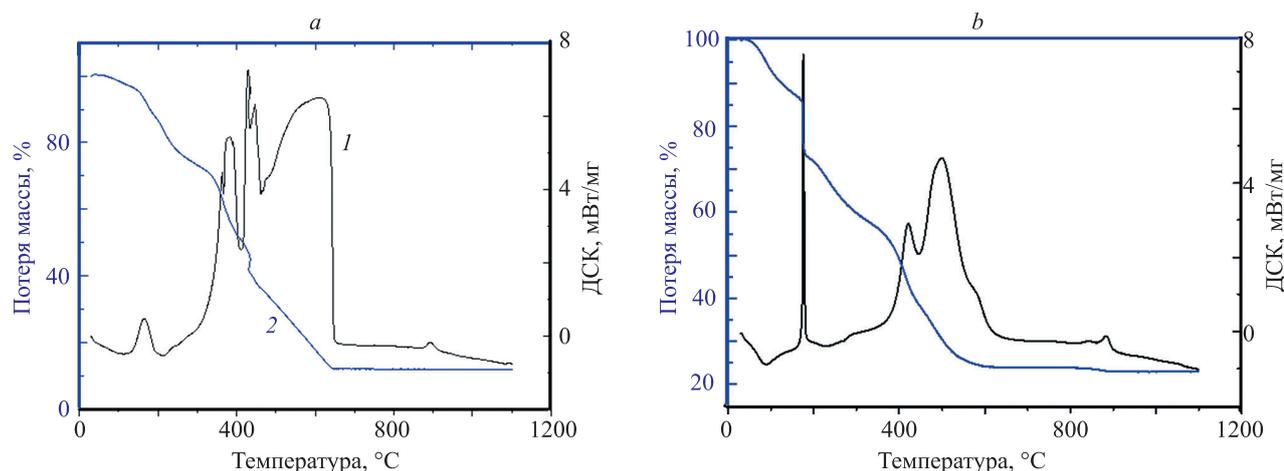


Рис. 1. Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (кривые 1) и термогравиметрического анализа (кривые 2) для растворов гелей 3 (a) и 4 (b)

Fig. 1. The results of differential scanning calorimetry (curves 1) and thermogravimetric analysis (curves 2) gel solutions 3 (a) and 4 (b)

По данным [17] введение ПВП в исходный раствор значительно ускоряет формирование кристаллической фазы, уменьшает минимальную температуру, необходимую для ее формирования, а также уменьшает средний размер нанокристаллов.

На рис. 2, a представлены спектры инфракрасного поглощения высушенных растворов гелей 1, 3 и 5. Интенсивная полоса с максимумом около 2945 см^{-1} соответствует колебаниям группы O–H воды, содержащейся в образцах [22], полоса с максимумом в области 1620 см^{-1} — колебаниям карбонильной группы –COO–, содержащейся в молекуле лимонной кислоты [23]. К колебаниям C–H относится пик с максимумом около 1290 см^{-1} , а полоса поглощения с максимумом 1415 см^{-1} — нитратам [24]. Следует отметить, что в спектре растворов гелей наблюдаются полосы колеба-

ний связей M–O (M = Y и Al) в области спектра $550\text{--}850\text{ см}^{-1}$ [22].

На рис. 2, b показаны инфракрасные спектры нанопорошков, полученных путем термообработки растворов гелей при температуре 1000 °C . В спектрах наблюдаются полосы с максимумами около 685 , 720 и 787 см^{-1} . Колебаниям связи Al–O соответствуют полосы поглощения с максимумами около 787 и 685 см^{-1} , а Y–O — полоса с максимумом 720 см^{-1} [25]. Полученные инфракрасные спектры полностью соответствуют спектру кристалла АИГ.

На рис. 3 приведены электронно-микроскопические снимки нанокристаллических порошков 4 и 3. Как видно из рис. 3, a, c, полученные материалы состоят из частиц микронного размера, имеющих сложную структуру. Наблюдается заметное различие в морфо-

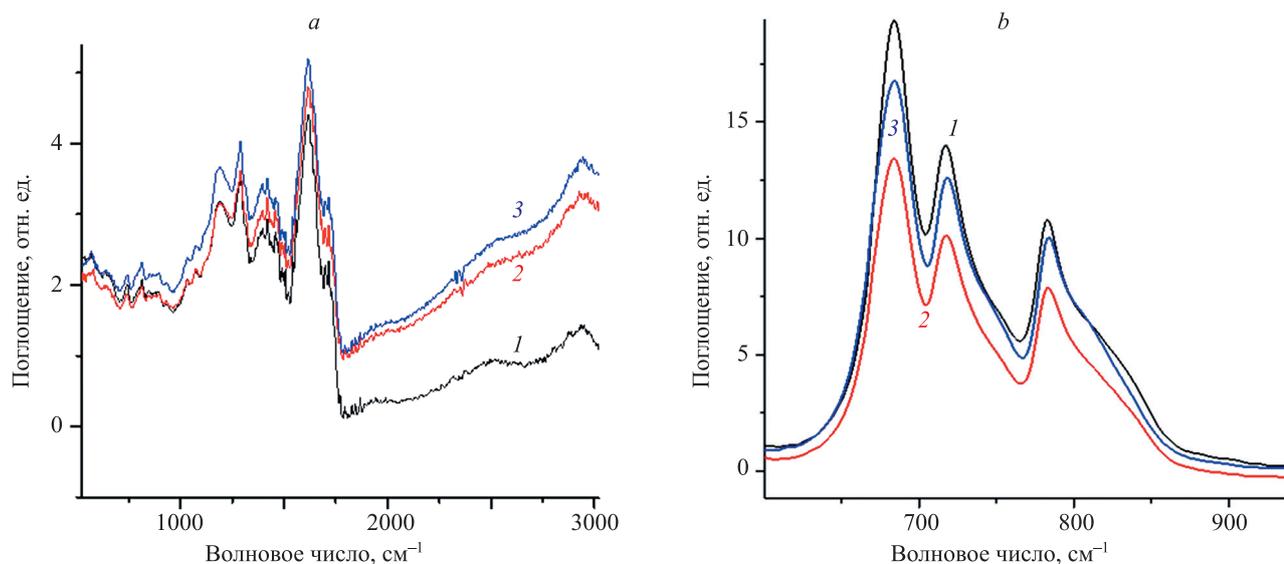


Рис. 2. Инфракрасные спектры высушенных растворов гелей 1 (кривая 1), 3 (кривая 2) и 5 (кривая 3) (a) и нанокристаллических порошков, полученных из растворов гелей 1 (кривая 1), 3 (кривая 2) и 5 (кривая 3), синтезированных при температуре 1000 °C (b)

Fig. 2. IR spectra of dried gel solutions 1 (curve 1), 3 (curve 2) and 5 (curve 3) (a) and nanocrystalline powder obtained from the gel solution 1 (curve 1) synthesized at a temperature of 1000 °C (b)

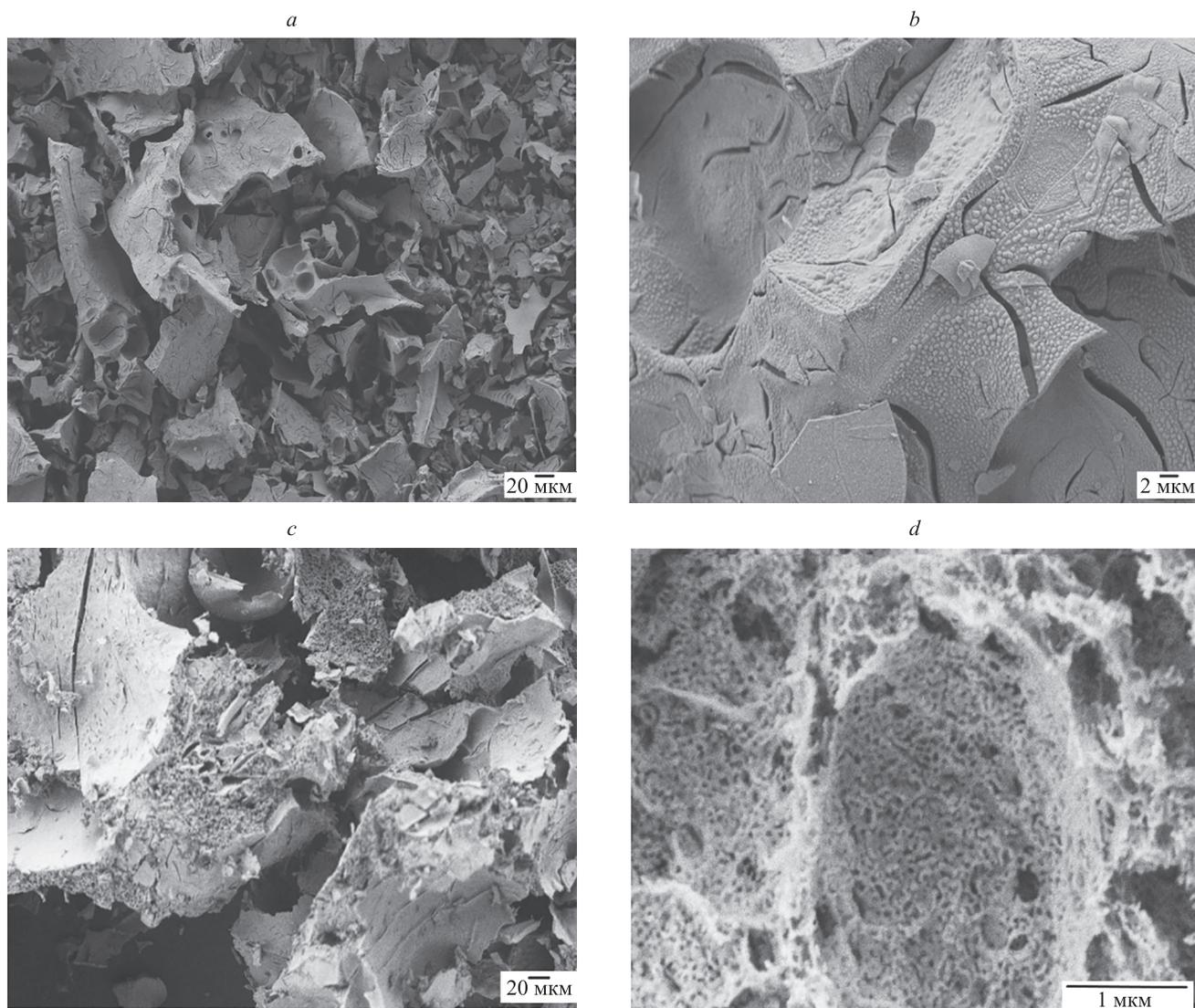


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки нанопорошков 4 (a, b) и 3 (c, d)

Fig. 3. Electron microscopic images of nanopowders 4 (a, b) and 3 (c, d)

логии частиц порошка, полученного с использованием ПВП и без него. Нанопорошок 4, полученный без применения ПВП, состоит из плотных частиц микронного размера (рис. 3, a), на поверхности которых видны отдельные наночастицы (рис. 3, b). В структуре нанопорошка 3, синтезированного при использовании добавки ПВП, наблюдаются крупные высокопористые агрегаты (рис. 3, c), состоящие из наночастиц (рис. 3, d). Наличие пористой структуры в материалах, полученных при применении ПВП, связано с сильным газовыделением при разложении нитратов и ПВП при температурах 400–600 °С (рис. 1, a). Такие особенности морфологии материалов, синтезированных с использованием ПВП, отмечены в работах [17, 24].

На рис. 4 приведены рентгенограммы нанопорошков 3 (кривая 1) и 4 (кривая 2). Аналогичные дифрактограммы были получены для всех порошков АИГ, содержащих различные редкоземельные ионы. Видно, что полученные материалы целиком состоят из кубической фазы АИГ и обладают высокой кристалличностью, что является важным при создании светодиодов, поскольку степень кристалличности оказывает суще-

ственное влияние на эффективность люминесценции [26].

Расчет среднего размера нанокристаллов осуществим по формуле Шеррера [27]:

$$d = k\lambda / (\beta \cos\theta),$$

где k — константа Шеррера ($k = 0,9$ для кубической фазы); λ — длина волны рентгеновского излучения ($\lambda = 0,15406$ нм для Cu K α); β — ширина на полувысоте наиболее интенсивного пика в дифрактограмме; θ — угол Брэгга.

В результате получено, что средний размер нанокристаллов в синтезированных порошках варьируется от 40 до 68 нм. Наибольший средний размер нанокристаллов (60, 68 нм) достигается для растворов гелей 5 и 6, активированных Yb. Все эти явления, вероятно, связаны с особенностями процесса кристаллизации АИГ:Yb³⁺.

Введение ПВП в исходный раствор приводит к заметному уменьшению средних размеров наночастиц порошка. Подобный эффект описан в работе [17] для

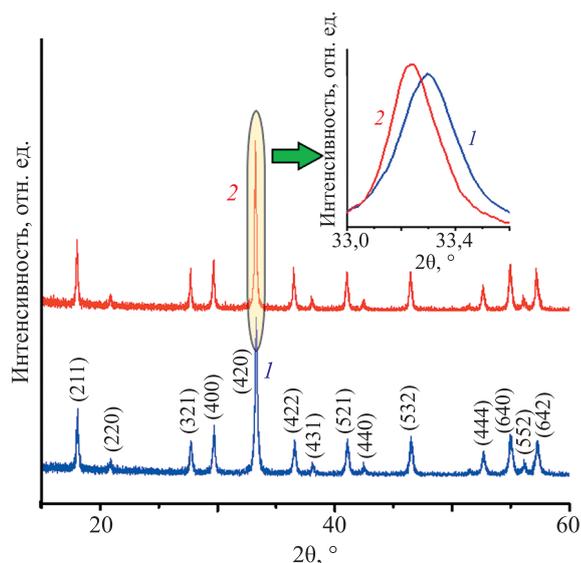


Рис. 4. Дифрактограммы нанопорошков 3 (кривая 1) и 4 (кривая 2).

На вставке показан сдвиг пиков в сторону больших углов при синтезе с использованием поливинилпирролидона

Fig. 4. Diffractograms of nanopowders 3 (curve 1) and 4 (curve 2).

The inset shows the shift of peaks towards higher angles during synthesis using polyvinylpyrrolidone

наночастиц $Gd_2O_3:Nd^{3+}$. Это явление может быть объяснено сильным выделением газов при разложении ПВП и нитратов металлов, происходящем в температурном интервале 400–600 °C (рис. 1, а). Выделяющиеся в больших объемах газы обеспечивают пространственное разделение образующихся из нитратов частиц оксидов металлов, что при дальнейшей термообработке, при более высоких температурах, приводит к формированию более мелких нанокристаллов.

Ионные радиусы редкоземельных активаторов, внедренных в кристаллы АИГ, заметно отличаются от замещаемого ими иона Y (ионные радиусы Y^{3+} , Yb^{3+} , Nd^{3+} и Ce^{3+} составляют 0,1019; 0,0985; 0,1109 и 0,1143 нм соответственно [28]). Это определяет де-

формацию и изменение размеров элементарной ячейки АИГ (табл. 2). Отметим, что деформация элементарной ячейки кристаллов (отклонение значения параметра кристаллической решетки от значения для монокристаллического АИГ) при синтезе наночастиц АИГ:Ce модифицированным методом Печини и применении добавки ПВП меньше, чем наблюдалась в нанокристаллах, синтезированных в [19] аналогичным методом при использовании добавки этиленгликоля (табл. 2). Уменьшение межплоскостного расстояния также свидетельствует о сдвиге пиков в сторону больших углов при синтезе с использованием ПВП (рис. 4). Полученный результат может быть связан с тем, что в ходе синтеза с использованием ПВП нанокристаллы растут из зародышей с меньшим размером, чем при использовании добавок с меньшей температурой разложения.

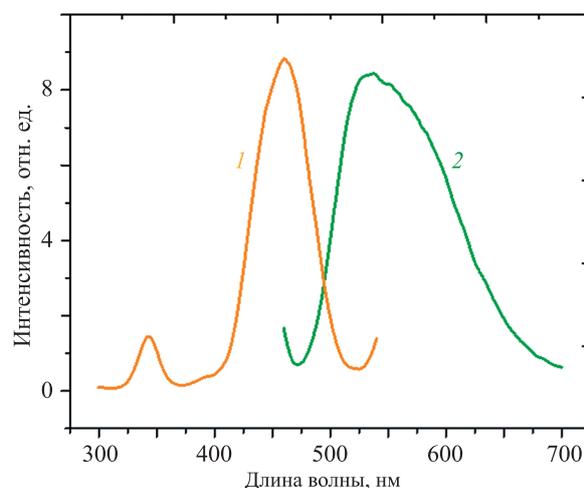


Рис. 5. Спектры возбуждения люминесценции (кривая 1) и люминесценции (кривая 2) порошка АИГ:Ce³⁺, синтезированного с использованием поливинилпирролидона

Fig. 5. Luminescence excitation spectrum (curve 1) and luminescence spectrum (curve 2) of YAG:Ce³⁺ powder synthesized using PVP

Таблица 2. Параметры решетки и средний размер нанокристаллов в порошках АИГ:R³⁺ (R³⁺ = Ce³⁺, Nd³⁺, Yb³⁺)

Table 2. Lattice parameters and average size of nanocrystals in YAG powders: R³⁺ (R³⁺ = Ce³⁺, Nd³⁺, Yb³⁺)

Образец	Средний размер нанокристаллов, нм	Параметры кристаллической решетки	
		a, нм	V, нм ³
АИГ:Nd с ПВП (раствор 1)	40	1,20363	1,74371
АИГ:Nd без ПВП (раствор 2)	42	1,20629	1,75532
АИГ:Ce с ПВП (раствор 3)	44	1,20348	1,74306
АИГ:Ce без ПВП (раствор 4)	63	1,20504	1,74987
АИГ:Yb с ПВП (раствор 5)	60	1,20358	1,74352
АИГ:Yb без ПВП (раствор 6)	68	1,20512	1,75001
Монокристаллический АИГ [15]	—	1,20020	1,72886
Монокристаллический АИГ, (JCPDS № 01-073-3184)	—	1,20100	1,73232
Нанопорошок АИГ:Ce (1 мол.%) [19]	29	1,20390	1,74490
Нанопорошок АИГ:Nd (1,2 масс.%) [10]	40	1,20610	1,75449

Известно, что повышение температуры термообработки нанокристаллов АИГ, сформированных низкотемпературным методом, повышает степень кристалличности материала и уменьшает размер элементарной ячейки нанокристаллов [19]. Введение ПВП в состав исходной смеси приводит к существенному повышению температуры материала в процессе термообработки (рис. 1), что определяет уменьшение параметров элементарных ячеек формирующихся нанокристаллов АИГ (табл. 2).

На рис. 5 представлены спектры возбуждения (кривая 1) и люминесценции (кривая 2) нанокристаллического порошка АИГ:Ce³⁺. Полоса возбуждения с максимумом около 454 нм (электронный переход $4f^1 \rightarrow 4f^05d^1$ ионов Ce³⁺) хорошо соответствует полосе излучения светодиодов на основе InGaN, таким образом, АИГ:Ce³⁺ может использоваться в качестве переизлучателя для данного типа светодиодов [29]. Асимметричная полоса люминесценции с максимумом

около 540 нм связана с электронными переходами $5d^1 \rightarrow 2F_{5/2}$ и $5d^1 \rightarrow 2F_{7/2}$ ионов Ce³⁺ [19].

Спектры люминесценции образцов АИГ:Nd³⁺ и АИГ:Yb³⁺ представлены на рис. 6. В спектре люминесценции образца, легированного Nd, наблюдаются характерные полосы люминесценции в инфракрасном диапазоне 1025–1150 нм, соответствующие электронному переходу $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ в ионах Nd [30]. Две менее интенсивные группы полос в области около 950 и 1340 нм определяются переходами $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{9/2}$ и $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{13/2}$ (рис. 6, а).

По полученным спектрам люминесценции нанопорошка АИГ:Yb³⁺ (рис. 6, б) видна наиболее интенсивная полоса люминесценции с максимумом около 1030 нм. Остальные полосы с меньшей интенсивностью соответствуют электронному переходу ионов Yb $2F_{5/2} \rightarrow 2F_{7/2}$ [10].

Полученные спектры люминесценции полностью соответствуют спектрам материалов аналогичного химического состава (АИГ:Ce³⁺, АИГ:Nd³⁺, АИГ:Yb³⁺), синтезированных при помощи модифицированного метода Печини [31], цитратного золь-гель метода [32], а также полимерно-солевого метода [10].

Заключение

В работе для синтеза нанокристаллических порошков алюмоиттриевого граната, активированного ионами редкоземельных элементов (Ce, Nd, Yb) применен модифицированный метод Печини. Метод основан на использовании двух стабилизирующих добавок: водоразводимого полимера (поливинилпирролидона), способного образовывать комплексы с ионами металлов, а также лимонной кислоты, играющей роль хелатирующего агента, т. е. структуры, которая способна одновременно присоединять два или более донорных атома к одному и тому же иону металла и образовывать одно или несколько колец.

Исследования, проведенные методами дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии, показали, что процессы кристаллизации материалов происходят при температурах более 880–900 °С. Все материалы, синтезированные при 1000 °С, полностью состоят только из кристаллов алюмоиттриевого граната. Средний размер полученных кристаллов АИГ:R³⁺ варьируется от 40 до 68 нм. Добавка поливинилпирролидона в исходные растворы сформировала кристаллы АИГ:R³⁺ меньшего размера. Внедрение редкоземельных ионо-активаторов в кристаллическую решетку алюмоиттриевого граната привело к деформации элементарных ячеек кристаллов. Применение добавок поливинилпирролидона обеспечило формирование кристаллов с более компактной кристаллической структурой (с меньшим объемом кристаллической решетки).

Согласно данным сканирующей электронной микроскопии, добавка поливинилпирролидона оказывает существенное влияние на морфологию частиц порошка. Структура порошков, полученных без добавок поливинилпирролидона, состоит из микроскопических агрегатов, содержащих плотноупакованные нанокристаллы

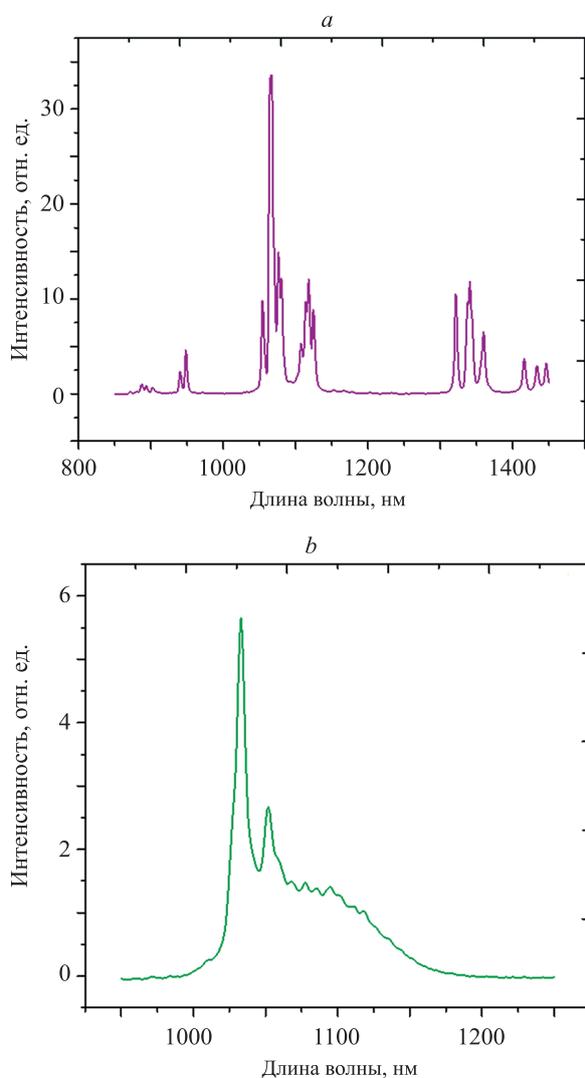


Рис. 6. Спектры люминесценции нанопорошков АИГ:Nd³⁺ (а) и АИГ:Yb³⁺ (б), синтезированных с использованием поливинилпирролидона

Fig. 6. Luminescence spectra of YAG nanopowders: YAG:Nd³⁺ (а), YAG:Yb³⁺ (б) synthesized using PVP

алюмоиттриевого граната. Добавка поливинилпирролидона в исходные смеси позволяет сформировать в результате синтеза пористые частицы. Подобное изменение морфологии частиц не оказывает существенного влияния на люминесцентные свойства порошков, однако играет важную роль в задаче введения частиц в волокно для создания волоконных усилителей, а также при спекании прозрачной керамики, что является одной из наиболее перспективных областей применения полученного материала.

Спектры люминесценции нанопорошков в целом соответствуют спектрам монокристаллического алюмоиттриевого граната, содержащего редкоземельные активаторы. Добавление поливинилпирролидона в исходный раствор не оказывает существенного влияния на спектры люминесценции синтезируемого материала. Синтезированные порошки алюмоиттриевого граната могут служить в качестве прекурсоров для спекания керамики, а также как материалы для создания люминесцентных датчиков температуры.

Литература

- Chen L., Luo Y., Xia Y., Kang B., Yu S. Densification, microstructure and optical properties of YAG transparent ceramics prepared by dry-pressing and gelcasting // *Optical Materials*. 2021. V. 121. P. 111509. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111509>
- Li J., Liu J., Liu B., Liu W., Zeng Y., Ba X., Xie T., Jiang B., Liu Q., Pan Y., Feng X., Guo J. Influence of heat treatment of powder mixture on the microstructure and optical transmission of Nd:YAG transparent ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. V. 34. N 10. P. 2497–2507. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.03.004>
- Wang H.M., Huang Z.Y., Jiang J.S., Liu K., Duan M.Y., Lu Z.W., Cedelle J., Guan Z.W., Lu T.C., Wang Q.Y. Unique mechanical properties of nano-grained YAG transparent ceramics compared with coarse-grained partners // *Materials & Design*. 2016. V. 105. P. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.094>
- Sim S.-M., Keller K.A., Mah T.-I. Phase formation in yttrium aluminum garnet powders synthesized by chemical methods // *Journal of Materials Science*. 2000. V. 35. N 3. P. 713–717. <https://doi.org/10.1023/A:1004709401795>
- Tachiwaki T., Yoshinaka M., Hirota K., Ikegami T., Yamaguchi O. Novel synthesis of $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) leading to transparent ceramics // *Solid State Communications*. 2001. V. 119. N 10-11. P. 603–606. [https://doi.org/10.1016/s0038-1098\(01\)00293-9](https://doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00293-9)
- Sluzky E., Lemoine M., Hesse K. Phosphor development for α -silicon liquid crystal light valve projection display // *Journal of the Electrochemical Society*. 1994. V. 141. N 11. P. 3172. <https://doi.org/10.1149/1.2059297>
- Lu C.H., Huang C.H. Sensitized photoluminescence of Eu^{3+} and Gd^{3+} -doped $Y_3Al_5O_{12}$ phosphors prepared via a reverse microemulsion process // *Chemistry Letters*. 2004. V. 33. N 12. P. 1568–1569. <https://doi.org/10.1246/cl.2004.1568>
- Benayas A., del Rosal B., Pérez-Delgado A., Santacruz-Gómez K., Jaque D., Hirata G.A., Vetrone F. Nd:YAG near-infrared luminescent nanothermometers // *Advanced Optical Materials*. 2015. V. 3. N 5. P. 687–694. <https://doi.org/10.1002/adom.201400484>
- Евстропьев С.К., Демидов В.В., Булыга Д.В., Садовничий Р.В., Пчелкин Г.А., Шурупов Д.Н., Подрухин Ю.Ф., Матросова А.С., Никоноров Н.В., Дукельский К.В. Люминесцентные волоконно-оптические датчики на основе наноломинофоров YAG : R^{3+} ($R = Ce, Dy, Yb$) для измерения температуры в диапазоне 20–500 °C // *Квантовая электроника*. 2022. Т. 52. № 1. С. 94–99.
- Bulyga D.V., Evstropiev S.K. Intermediate products of Yb:YAG laser ceramics fabrication: structural features, morphology, and luminescent properties // *Research on Chemical Intermediates*. 2021. V. 47. N 8. P. 3501–3514. <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04484-w>
- Saladino M.L., Nasillo G., Martino D.C., Caponetti E. Synthesis of Nd:YAG nanopowder using the citrate method with microwave irradiation // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. V. 491. N 1-2. P. 737–741. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.11.054>
- Laishram K., Mann R., Malhan N. Single step synthesis of yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) nanopowders by mixed fuel solution combustion approach // *Ceramics International*. 2011. V. 37. N 8. P. 3743–3746. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.052>
- Li J.G., Ikegami T., Lee J.-H., Mori T., Yajima Y. Co-precipitation synthesis and sintering of yttrium aluminum garnet (YAG) powders: the effect of precipitant // *Journal of the European Ceramic Society*. 2000. V. 20. N 14-15. P. 2395–2405. [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(00\)00116-3](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(00)00116-3)

References

- Chen L., Luo Y., Xia Y., Kang B., Yu S. Densification, microstructure and optical properties of YAG transparent ceramics prepared by dry-pressing and gelcasting. *Optical Materials*, 2021, vol. 121, pp. 111509. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111509>
- Li J., Liu J., Liu B., Liu W., Zeng Y., Ba X., Xie T., Jiang B., Liu Q., Pan Y., Feng X., Guo J. Influence of heat treatment of powder mixture on the microstructure and optical transmission of Nd:YAG transparent ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, no. 10, pp. 2497–2507. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.03.004>
- Wang H.M., Huang Z.Y., Jiang J.S., Liu K., Duan M.Y., Lu Z.W., Cedelle J., Guan Z.W., Lu T.C., Wang Q.Y. Unique mechanical properties of nano-grained YAG transparent ceramics compared with coarse-grained partners. *Materials & Design*, 2016, vol. 105, pp. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.094>
- Sim S.-M., Keller K.A., Mah T.-I. Phase formation in yttrium aluminum garnet powders synthesized by chemical methods. *Journal of Materials Science*, 2000, vol. 35, no. 3, pp. 713–717. <https://doi.org/10.1023/A:1004709401795>
- Tachiwaki T., Yoshinaka M., Hirota K., Ikegami T., Yamaguchi O. Novel synthesis of $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) leading to transparent ceramics. *Solid State Communications*, 2001, vol. 119, no. 10-11, pp. 603–606. [https://doi.org/10.1016/s0038-1098\(01\)00293-9](https://doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00293-9)
- Sluzky E., Lemoine M., Hesse K. Phosphor development for α -silicon liquid crystal light valve projection display. *Journal of the Electrochemical Society*, 1994, vol. 141, no. 11, pp. 3172. <https://doi.org/10.1149/1.2059297>
- Lu C.H., Huang C.H. Sensitized photoluminescence of Eu^{3+} and Gd^{3+} -doped $Y_3Al_5O_{12}$ phosphors prepared via a reverse microemulsion process. *Chemistry Letters*, 2004, vol. 33, no. 12, pp. 1568–1569. <https://doi.org/10.1246/cl.2004.1568>
- Benayas A., del Rosal B., Pérez-Delgado A., Santacruz-Gómez K., Jaque D., Hirata G.A., Vetrone F. Nd:YAG near-infrared luminescent nanothermometers. *Advanced Optical Materials*, 2015, vol. 3, no. 5, pp. 687–694. <https://doi.org/10.1002/adom.201400484>
- Evstropiev S.K., Demidov V.V., Sadovnichii R.V., Pchelkin G.A., Shurupov D.N., Matrosova A.S., Dukelskii K.V., Bulyga D.V., Nikonorov N.V., Podrukhin Y.F. YAG : R^{3+} ($R = Ce, Dy, Yb$) nanophosphor-based luminescent fibre-optic sensors for temperature measurements in the range 20–500 C. *Quantum Electronics*, 2022, vol. 52, no. 1, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1070/QEL17971>
- Bulyga D.V., Evstropiev S.K. Intermediate products of Yb:YAG laser ceramics fabrication: structural features, morphology, and luminescent properties. *Research on Chemical Intermediates*, 2021, vol. 47, no. 8, pp. 3501–3514. <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04484-w>
- Saladino M.L., Nasillo G., Martino D.C., Caponetti E. Synthesis of Nd:YAG nanopowder using the citrate method with microwave irradiation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 491, no. 1-2, pp. 737–741. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.11.054>
- Laishram K., Mann R., Malhan N. Single step synthesis of yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) nanopowders by mixed fuel solution combustion approach. *Ceramics International*, 2011, vol. 37, no. 8, pp. 3743–3746. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.052>
- Li J.G., Ikegami T., Lee J.-H., Mori T., Yajima Y. Co-precipitation synthesis and sintering of yttrium aluminum garnet (YAG) powders: the effect of precipitant. *Journal of the European Ceramic Society*, 2000, vol. 20, no. 14-15, pp. 2395–2405. [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(00\)00116-3](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(00)00116-3)

14. Ikesue A., Kinoshita T., Kamata K., Yoshida K. Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid-state lasers // *Journal of the American Ceramic Society*. 1995. V. 78. N 4. P. 1033–1040. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb08433.x>
15. Li X., Liu H., Wang J., Cui H., Han F., Boughton R.I. Production of nanosized YAG powders with spherical morphology and nonaggregation via a solvothermal method // *Journal of the American Ceramic Society*. 2004. V. 87. N 12. P. 2288–2290. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2004.tb07507.x>
16. Caponetti E., Martino D.C., Saladino M.L., Leonelli C. Preparation of Nd:YAG nanopowder in a confined environment // *Langmuir*. 2007. V. 23. N 7. P. 3947–3952. <https://doi.org/10.1021/la0625906>
17. Moussaoui A., Bulyga D.V., Evstropiev S.K., Ignatiev A.I., Nikonov N.V., Podruhin Y.F., Sadovnichii R.V. Modified Pechini method by PVP addition for Nd:Gd₂O₃ nanophosphors fabrication // *Ceramics International*. 2021. V. 47. N 24. P. 34307–34313. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.341>
18. Волкова Н.А., Евстропьев С.К., Никоноров Н.В., Евстропьев К.С. Особенности взаимодействия в водных растворах молекул поливинилпирролидона с ионами цинка и серебра по данным ИК спектроскопии // *Оптика и спектроскопия*. 2019. Т. 127. № 10. С. 687–690. <https://doi.org/10.21883/OS.2019.10.48377.128-19>
19. Guerbois L., Boukerika A. Nanomaterial host bands effect on the photoluminescence properties of Ce-doped YAG nanophosphor synthesized by sol-gel method // *Journal of Nanomaterials*. 2015. V. 2015. P. 617130. <https://doi.org/10.1155/2015/617130>
20. Ji X., Kang B., Deng J., Huang H., Wang X. Thermal decomposition and evolved gas analysis of neodymium-doped yttrium aluminum garnet precursor prepared by co-precipitation // *Thermochimica Acta*. 2013. V. 552. P. 23–27. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.11.021>
21. AitMellal O., Oufni L., Messous M.Y., Tahri M., Neatu Ş., Florea M., Neatu F., Secu M. Structural properties and near-infrared light from Ce³⁺/Nd³⁺-co-doped LaPO₄ nanophosphors for solar cell applications // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2022. V. 33. N 7. P. 4197–4210. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07615-6>
22. Boyer D., Bertrand-Chadeyron G., Mahiou R. Structural and optical characterizations of YAG:Eu³⁺ elaborated by the sol-gel process // *Optical Materials*. 2004. V. 26. N 2. P. 101–105. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2003.11.005>
23. Xia G., Zhou S., Zhang J., Xu J. Structural and optical properties of YAG:Ce³⁺ phosphors by sol-gel combustion method // *Journal of Crystal Growth*. 2005. V. 279. N 3-4. P. 357–362. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.01.072>
24. Miller F.A., Wilkins C.H. Infrared spectra and characteristic frequencies of inorganic ions // *Analytical Chemistry*. 1952. V. 24. N 8. P. 1253–1294. <https://doi.org/10.1021/ac60068a007>
25. He X., Liu X., Li R., Yang B., Yu K., Zeng M., Yu R. Effects of local structure of Ce³⁺ ions on luminescent properties of Y₃Al₅O₁₂:Ce nanoparticles // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. P. 22238. <https://doi.org/10.1038/srep22238>
26. Yang H., Lee D.K., Kim Y.S. Spectral variations of nano-sized Y₃Al₅O₁₂:Ce phosphors via codoping/substitution and their white LED characteristics // *Materials Chemistry and Physics*. 2009. V. 114. N 2-3. P. 665–669. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.10.019>
27. Klug H.P., Alexander L.E. Quantitative analysis of powder mixtures // *X-ray Diffraction Procedures*. 1954.
28. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // *Acta Crystallographica Section A: Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography*. 1976. V. 32. N 5. P. 751–767. <https://doi.org/10.1107/s0567739476001551>
29. Zhu Q.Q., Li S., Yuan Q., Zhang H., Wang L. Transparent YAG:Ce ceramic with designed low light scattering for high-power blue LED and LD applications // *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. V. 41. N 1. P. 735–740. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.006>
30. Zhdachevskii Y., Syvorotka I.I., Vasylechko L., Sugak D., Borschchyshyn I.D., Luchechko A.P., Vakhula Ya.I., Ubizskii S.B., Vaktiv M.M., Suchocki A. Crystal structure and luminescent properties of nanocrystalline YAG and YAG:Nd synthesized by sol-gel method // *Optical Materials*. 2012. V. 34. N 12. P. 1984–1989. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2011.12.023>
31. Hassanzadeh-Tabrizi S.A. Synthesis and luminescence properties of YAG:Ce nanopowder prepared by the Pechini method // *Advanced*
14. Ikesue A., Kinoshita T., Kamata K., Yoshida K. Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid-state lasers. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, vol. 78, no. 4, pp. 1033–1040. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb08433.x>
15. Li X., Liu H., Wang J., Cui H., Han F., Boughton R.I. Production of nanosized YAG powders with spherical morphology and nonaggregation via a solvothermal method. *Journal of the American Ceramic Society*, 2004, vol. 87, no. 12, pp. 2288–2290. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2004.tb07507.x>
16. Caponetti E., Martino D.C., Saladino M.L., Leonelli C. Preparation of Nd:YAG nanopowder in a confined environment. *Langmuir*, 2007, vol. 23, no. 7, pp. 3947–3952. <https://doi.org/10.1021/la0625906>
17. Moussaoui A., Bulyga D.V., Evstropiev S.K., Ignatiev A.I., Nikonov N.V., Podruhin Y.F., Sadovnichii R.V. Modified Pechini method by PVP addition for Nd:Gd₂O₃ nanophosphors fabrication. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, no. 24, pp. 34307–34313. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.341>
18. Volkova N.A., Evstropiev S.K., Nikonov N.V., Evstropiev K.S. Specific Features of interactions of polyvinylpyrrolidone molecules with zinc and silver ions in aqueous solutions according to IR spectroscopy data. *Optics and Spectroscopy*, 2019, vol. 127, no. 4, pp. 738–741. <https://doi.org/10.1134/s0030400x19100308>
19. Guerbois L., Boukerika A. Nanomaterial host bands effect on the photoluminescence properties of Ce-doped YAG nanophosphor synthesized by sol-gel method. *Journal of Nanomaterials*, 2015, vol. 2015, pp. 617130. <https://doi.org/10.1155/2015/617130>
20. Ji X., Kang B., Deng J., Huang H., Wang X. Thermal decomposition and evolved gas analysis of neodymium-doped yttrium aluminum garnet precursor prepared by co-precipitation. *Thermochimica Acta*, 2013, vol. 552, pp. 23–27. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.11.021>
21. AitMellal O., Oufni L., Messous M.Y., Tahri M., Neatu Ş., Florea M., Neatu F., Secu M. Structural properties and near-infrared light from Ce³⁺/Nd³⁺-co-doped LaPO₄ nanophosphors for solar cell applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, vol. 33, no. 7, pp. 4197–4210. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07615-6>
22. Boyer D., Bertrand-Chadeyron G., Mahiou R. Structural and optical characterizations of YAG:Eu³⁺ elaborated by the sol-gel process. *Optical Materials*, 2004, vol. 26, no. 2, pp. 101–105. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2003.11.005>
23. Xia G., Zhou S., Zhang J., Xu J. Structural and optical properties of YAG:Ce³⁺ phosphors by sol-gel combustion method. *Journal of Crystal Growth*, 2005, vol. 279, no. 3-4, pp. 357–362. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.01.072>
24. Miller F.A., Wilkins C.H. Infrared spectra and characteristic frequencies of inorganic ions. *Analytical Chemistry*, 1952, vol. 24, no. 8, pp. 1253–1294. <https://doi.org/10.1021/ac60068a007>
25. He X., Liu X., Li R., Yang B., Yu K., Zeng M., Yu R. Effects of local structure of Ce³⁺ ions on luminescent properties of Y₃Al₅O₁₂:Ce nanoparticles. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 22238. <https://doi.org/10.1038/srep22238>
26. Yang H., Lee D.K., Kim Y.S. Spectral variations of nano-sized Y₃Al₅O₁₂:Ce phosphors via codoping/substitution and their white LED characteristics. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, vol. 114, no. 2-3, pp. 665–669. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.10.019>
27. Klug H.P., Alexander L.E. Quantitative analysis of powder mixtures. *X-ray Diffraction Procedures*, 1954.
28. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A: Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography*, 1976, vol. 32, no. 5, pp. 751–767. <https://doi.org/10.1107/s0567739476001551>
29. Zhu Q.Q., Li S., Yuan Q., Zhang H., Wang L. Transparent YAG:Ce ceramic with designed low light scattering for high-power blue LED and LD applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, vol. 41, no. 1, pp. 735–740. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.006>
30. Zhdachevskii Y., Syvorotka I.I., Vasylechko L., Sugak D., Borschchyshyn I.D., Luchechko A.P., Vakhula Ya.I., Ubizskii S.B., Vaktiv M.M., Suchocki A. Crystal structure and luminescent properties of nanocrystalline YAG and YAG:Nd synthesized by sol-gel method. *Optical Materials*, 2012, vol. 34, no. 12, pp. 1984–1989. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2011.12.023>
31. Hassanzadeh-Tabrizi S.A. Synthesis and luminescence properties of YAG:Ce nanopowder prepared by the Pechini method. *Advanced*

- Powder Technology, 2012, V. 23, N 3, P. 324–327. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2011.04.006>
32. Yu S., Jing W., Tang M., Xu T., Yin W., Kang B. Fabrication of Nd:YAG transparent ceramics using powders synthesized by citrate sol-gel method // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. V. 772. P. 751–759. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.184>

Авторы

Муссаун Амир — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7858-7417>, am.moussaoui92@gmail.com

Бульга Дмитрий Владимирович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 57217158694](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527), <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>, dmbulyga@yandex.ru

Игнатъев Александр Иванович — ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57189902013](https://orcid.org/0000-0002-6114-0248), <https://orcid.org/0000-0002-6114-0248>, alexandre_ignatiev@yahoo.com

Евстропьев Сергей Константинович — доктор химических наук, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; начальник отдела, Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация, [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>, evstropiev@bk.ru

Никоноров Николай Валентинович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7003772604](https://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, Nikonorov@oi.ifmo.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2023
Одобрена после рецензирования 11.12.2023
Принята к печати 13.01.2024

- Powder Technology*, 2012, vol. 23, no. 3, pp. 324–327. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2011.04.006>
32. Yu S., Jing W., Tang M., Xu T., Yin W., Kang B. Fabrication of Nd:YAG transparent ceramics using powders synthesized by citrate sol-gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 772, pp. 751–759. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.184>

Authors

Amir Moussaoui — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7858-7417>, am.moussaoui92@gmail.com

Dmitry V. Bulyga — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Senior Researcher, JVC “RPA Vavilov State Optical Institute”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 57217158694](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527), <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>, dmbulyga@yandex.ru

Aleksandr I. Ignatiev — Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57189902013](https://orcid.org/0000-0002-6114-0248), <https://orcid.org/0000-0002-6114-0248>, alexandre_ignatiev@yahoo.com

Sergey K. Evstropiev — D.Sc. (Chemistry), Leading Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Head of Department, JVC “RPA Vavilov State Optical Institute”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation, [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>, evstropiev@bk.ru

Nikolay V. Nikonorov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7003772604](https://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, Nikonorov@oi.ifmo.ru

Received 28.11.2023
Approved after reviewing 11.12.2023
Accepted 13.01.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»