

УДК 666.3-128

Оригинальная статья

Синтез керамического порошка иттрий-алюминиевого граната, легированного рутением

В.Е. Супрунчук, А.А. Кравцов, Л.В. Тарала, Е.В. Медяник, Ф.Ф. Малявин, В.А. Лапин,
Д.П. Бедраков

*ФГАО ВО «Северо-Кавказский Федеральный Университет»
355017, Россия, Ставропольский край, Ставрополь, ул. Пушкина, 1
vsuprunchuk@ncfu.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.1016

Аннотация: В работе были получены образцы керамических порошков иттрий-алюминиевого граната легированных ионами рутения. Вводимое количество рутения составило 5 и 10 масс.% соответственно. В качестве температуры для отжига были использованы 1150 и 1600°C. В ходе работы было рассмотрено изменение морфологии керамических порошков иттрий-алюминиевого граната легированных ионами рутения с помощью сканирующей электронной микроскопии. Элементный состав был изучен с помощью энергодисперсионной спектроскопии. Фазовый состав исследовали методом рентгенофазного анализа. Удельная площадь поверхности керамического порошка оценена методом Брунауэра-Эммета-Теллера. Для полученных образцов выявлено повышение площади удельной поверхности керамического порошка со снижением количественного содержания рутения в системе. Для всех образцов было установлено наличие примесных фаз. Выявлено, что повышение температуры прокаливания до 1600°C приводило к уменьшению количественного содержания примесных фаз, однако не приводило к их полному устранению. Образец с самым близким к монофазному составу был получен при содержании в составе материала не более 5 масс.% рутения. Результаты, полученные с помощью дифференциального термического анализа, показали, что содержание рутения в применяемых количествах не оказывает влияние на кинетику фазовых переходов, а также кинетику потери массы порошков-прекурсоров.

Ключевые слова: иттрий-алюминиевый гранат, легирование, керамический порошок, синхронный термический анализ, рутений.

1. Введение

Иттрий-алюминиевые гранаты (YAG) представляют собой большой интерес в промышленности благодаря ряду особенностей. Во-первых, характеристики YAG дают возможность использования его в качестве матрицы для твердотельного лазера [1]. Во-вторых, применение граната возможно расширить благодаря возможности внедрения в его структуру различных легирующих элементов, которые выступают как дополнительные агенты, позволяющие модифицировать свойства материала с целью получения заданных свойств. Так, например, при внедрении в структуру YAG ионов скандия изменяются физико-химические свойства [2], смещаются и уширяются спектры излучения люминесценции люминесцентной керамики [3]. Интерес к возможности введения ионов рутения в структуру граната обусловлен вероятностью возникновения уникальных фоторефрактивных и фотохромных свойств,

оптического поглощения [4] готового керамического материала. В частности, ожидается, что введение ионов рутения в кристаллическую решетку граната приведет к появлению дополнительных полос поглощения. Однако на сегодняшний день нами не найдена информация о применении рутения как легирующего агента в синтезе оптического керамического материала на основе *YAG*. Существуют различные способы синтеза керамических порошков гранатов, среди которых более часто применяют твердофазные, газофазные и жидкофазные методы [5, 6], где последние относят к так называемым методам «мокрого синтеза». Нами был выбран жидкофазный метод, так как данный подход способствует более равномерному смешиванию катионов со снижением температуры образования фазы *YAG*. Среди методов «мокрого синтеза» можно выделить химическое осаждение, которое обладает преимуществами гомогенности химического состава порошков и позволяет получать порошки с меньшими размерами частиц [7].

В связи с тем, что анализ литературных данных показал, отсутствие исследований синтеза керамического порошка и керамики на основе иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами рутением (*YAG:Ru*), возникают широкие перспективы данного направления исследования.

2. Материалы и методы

Для изготовления керамических порошков использовали следующие реагенты: водный раствор аммиака (25%, ОС.Ч., СигмаТек, Россия), нитрат иттрия (99%, ChemicalPoint) нитрат алюминия нонагидрат (99%, AcrosOrganics), уротропин (Химреактивснаб), хлорид рутения гидрат (99,98%, Sigma-Aldrich), сульфат аммония (99%, Ставреахим), изопропиловый спирт (99,7%, Химпром).

Для изготовления керамики *YAG:Ru* было использовано гетерофазное осаждение горячих концентрированных растворов солей в осадитель. Для этого был использован метод распыления смеси насыщенных растворов нитратов иттрия и алюминия, и хлорида рутения в раствор осадителя. Было изготовлено два типа образцов с концентрацией рутения 5 масс.% (GRu-5) и 10 масс.% (GRu-10). В качестве осадителя был использован раствор уротропина, содержащего 5,64 г сульфата аммония [8]. Температура осадителя не превышала 60-65°C, *pH* маточного раствора доводили до значений 9-10 путем добавления водного раствора аммиака. Отделение полученного осадка от маточного раствора осуществлялась путем центрифугирования при 3000 об/мин. Отмывку осадка проводили деионизированной водой и изопропиловым спиртом. Осадок высушивали, затем прокаливали в высокотемпературной печи в корундовых тиглях в воздушной среде при температуре 1150°C (1 стадия) и 1600°C (2 стадия) с

выдержкой в течении 2 часов. Керамический порошок, полученный после 1 и 2 стадии прокаливания исследовали следующими методами. Исследование фазового состава керамических порошков выполнялось при помощи рентгеновского дифрактометра (TD-3700 X-ray diffractometer, Tongda, Китай), оснащенного рентгеновской трубкой с медным анодом ($\lambda_{CuK\alpha 1} = 1,5406 \text{ \AA}$), в диапазоне углов 2θ от 10 до 90°, шагом 0,01° и скоростью сканирования 0,7°/мин. Идентификация фаз осуществлялась с помощью программного обеспечения Highscore Plus с базой данных ICDD PDF-2 [9]. С помощью метода синхронного термогравиметрического анализа были определены потери массы порошков и температуры фазовых превращений. Изображения поверхности получали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (FESEM, Mira 3 LMH, Tescan, Чехия) с приставкой для анализа элементного состава (FESEM, EDX, Mira 3 LMH, Tescan, Чехия). Удельную площадь поверхности порошков $S_{\text{ВЕТ}}$ определяли методом газовой адсорбции Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) на приборе 3Flex (Micromeritics, США).

3. Результаты и обсуждение

Для получения керамических порошков в работе был применен метод гетерофазного осаждения, где были исключены стадии введения спекающих добавок, а также стадия измельчения с помощью планетарной мельницы. Исключение данных стадий позволило снизить вероятность включения примесей в результате деградации размольных шаров. На рис. 1 представлены дифрактограммы керамических порошков образцов GRu-5 и GRu-10, прокаленных на воздухе при температурах 1150°C и 1600°C соответственно. В ходе расшифровки результатов рентгенофазного анализа было установлено наличие примесных фаз для обоих образцов. Увеличение температуры прокаливания до 1600°C приводит к снижению процентного содержания примесных фаз, однако полного их отсутствия при данных составах достичь не удалось. Самым близким к монофазному составу явился образец, содержащий 5 масс.% рутения в своем составе. Таким образом, для получения монофазного материала требуется применение меньших концентраций рутения в составе. Известно, что ионы рутения в структуре граната занимают октаэдрические позиции [10]. Причиной трудности растворения больших количеств рутения в структуре граната может быть обусловлена возникающим напряжением в структуре граната связанным с несоответствием радиуса заменяемого иона Al^{3+} с Ru^{3+} [4]. Так, катион Ru^{3+} имеет ионный радиус больший чем Al^{3+} , что затрудняет его растворение в матрице граната. Кроме того, в течение нагрева граната могут формироваться фазы иттрий-алюминиевого перовскита $YAP(YAlO_3)$ и моноклинной формы иттрий-алюминиевого

граната $YAM(Y_4Al_2O_9)$ [5], которые, вероятно, взаимодействуют с рутением с образованием отдельной фазы $Y_2Ru_2O_7$.

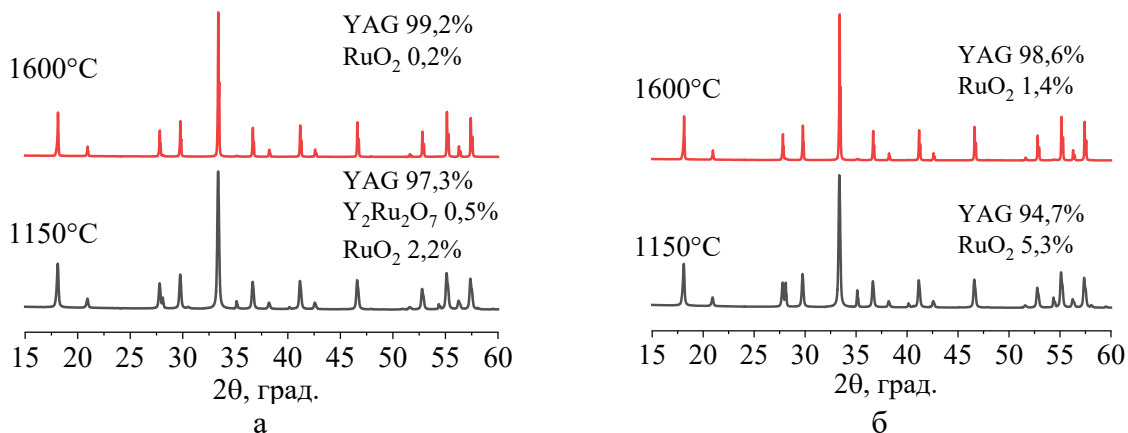


Рис. 1. Дифрактограммы керамических порошков образцов G Ru-5 (а) и G Ru-10 (б), прокаленных при температурах 1150 и 1600°C.

Морфологию керамических порошков образцов G Ru-5 и G Ru-10 изучали методом сканирующей электронной микроскопии. При рассмотрении СЭМ-изображений образцов G Ru-5 и G Ru-10 было выявлено наличие крупных агломератов, имеющих сглаженные грани, с неправильной формой, приближенной к сферической. Керамические порошки обоих составов полученные при температуре прокаливания 1150°C имели схожую структуру, состоящую из кристаллитов (см. рис. 2). При этом кристаллиты существуют не отдельно, а связаны между собой перешейками с образованием гантелеобразной формы. Размер кристаллитов варьировался в области 25-85 нм.

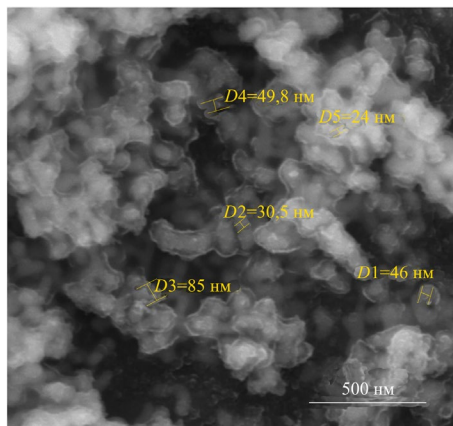


Рис. 2. СЭМ-изображение керамического порошка $YAG:Ru$.

Однако для обоих образцов также были найдены артефакты кубической структуры, предположительно составляющие вторую фазу. Эти структуры имели более четкие визуальные границы в порошках, полученных при температуре прокаливания 1600°C. Элементный анализ показал наличие в таких объектах повышенного содержание рутения (см. рис. 3, 4 и данные Таблицы 1).

Таблица 1. Элементный состав образцов.

Образец GRu-5				Образец GRu-10			
Элемент	ат.%	Элемент	ат.%	Элемент	ат.%	Элемент	ат.%
O	66,43	Y	12,58	O	72,94	Y	8,96
Al	19,98	Ru	1,01	Al	15,15	Ru	2,95

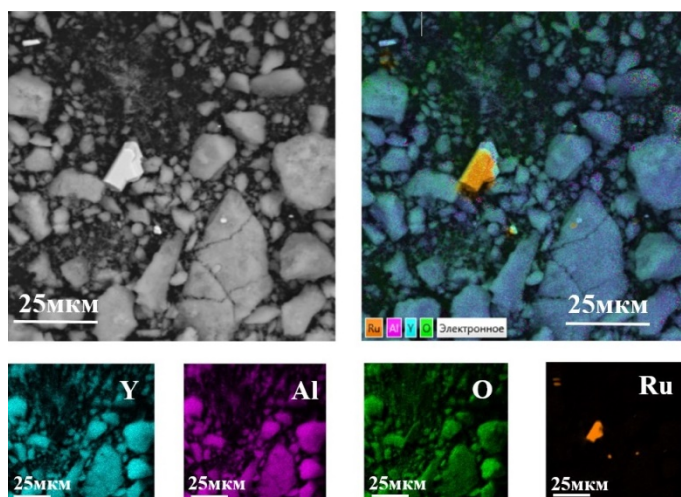


Рис. 3. СЭМ-изображение и элементная карта керамического порошка GRu-5.

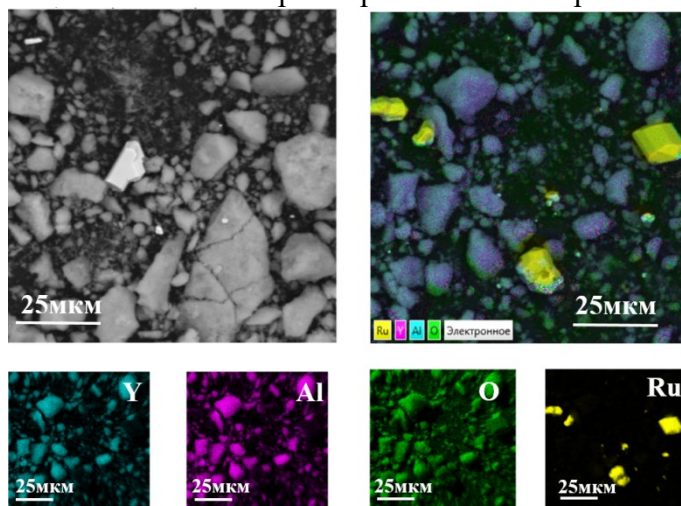


Рис. 4. СЭМ-изображение и элементная карта керамического порошка GRu-10.

Дисперсность порошков тесно связана с их площадью удельной поверхности $S_{\text{БЭТ}}$. Высокодисперсные порошки, как правило, имеют высокую поверхностную энергию и разветвленную поверхность, что приводит к формированию агломератов, которые в последствии могут снижать качество керамического материала. Поэтому еще одним показателем при оценке качества керамического порошка может являться площадь удельной поверхности. По данным БЭТ значения $S_{\text{БЭТ}}$ для образцов GRu-5 – 14,99 м²/г и GRu-10 – 13,50 м²/г соответственно. Таким образом, наблюдается повышение площади удельной поверхности керамического порошка $YAG:Ru$ со снижением количественного содержания рутения в системе. Определение данного критерия позволит в

дальнейшем установить степень агломерации порошков. Степень агломерации также является одним из критериев оценки качества порошков. При этом сообщается, что для получения керамики высокого оптического качества предпочтительно использование наименее агломерированных порошков [11].

Для определения зависимости кинетики фазообразования $YAG:Ru$ от содержания рутения был выполнен дифференциальный термический анализ (DTA – differential thermal analysis) и термогравиметрический анализ (TG – thermogravimetric analysis) порошков-прекурсоров (кривые DTA-TG представлены на рис. 5).

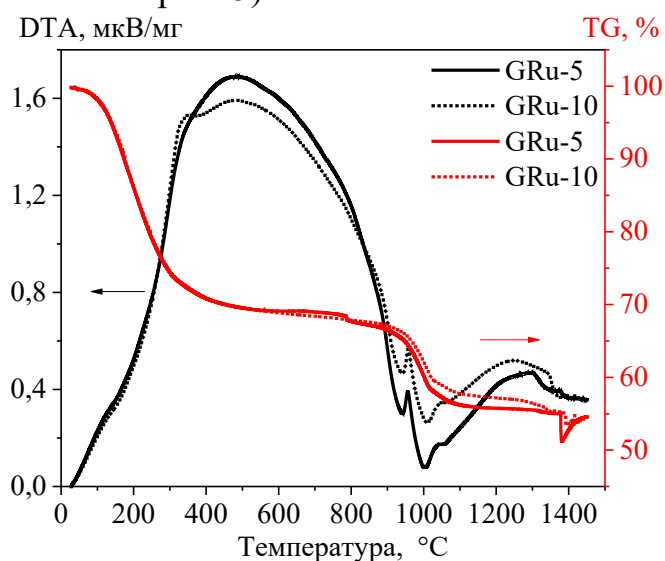


Рис. 5. DTA-TG кривые порошков-прекурсоров $YAG:Ru$.

Кривые DTA-TG демонстрируют экзотермические эффекты, связанные с удалением амино- и нитрогрупп, испарением адсорбционной воды и выделением молекулярно-связанной воды в интервале температур 25-450°C [12]. В интервале 450-850°C экзотермические эффекты связаны с разложением гидроксидов и образованием оксидов металлов. При температуре 478°C наблюдается острый экзотермический пик, обусловленный фазовым переходом граната. В диапазоне температур 970-1100°C наблюдается выраженный эндотермический пик, связанный с термическим разложением и десорбцией сульфатных групп [12]. Принципиального влияния рутения на кинетику фазовых переходов порошков-прекурсоров не было обнаружено. Также образцы демонстрировали идентичную кинетику потери массы при прокаливании. Наиболее значительная потеря массы ($\approx 30\%$) наблюдалась в диапазоне температур 110-400°C, обусловленная удалением аминогрупп, испарением адсорбционной воды и выделением молекулярной воды. Также значительная потеря массы ($\approx 10\%$) из-за термического разложения и десорбции сульфатных групп наблюдалась в диапазоне температур 970-

1100°C. Этот процесс сопровождается эндотермическим пиком на кривой ДТА. После достижения температуры 1200°C потеря массы в образцах больше не наблюдалась.

4. Заключение

В ходе работы были получены методом гетерофазного осаждения образцы керамических порошков *YAG:Ru* с максимальным содержанием ионов рутения 10 масс.%. При рассмотрении кривых ДТА-TG принципиального влияния рутения на кинетику фазовых переходов, а также кинетику потери массы порошков-прекурсоров обнаружено не было. По данным рентгенограммы было установлено наличие примесных фаз, где доминирующим видом примеси выступал оксид рутения (IV). Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии позволили идентифицировать отдельно существующие фазы, содержащие избыток рутения. Таким образом, для получения монофазного керамического порошка необходимо снижение количества вводимого рутения. Вероятно, также, что для введения рутения в структуру *YAG* необходимо изменять стехиометрический состав материала, варьируя содержания гранатообразующих элементов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-73-00023, <https://rscf.ru/project/24-73-00023/>).

Библиографический список:

1. Briat, B. Attribution of the absorption bands of ruthenium-doped yttrium gallium garnet crystals to Ru^{3+} , Ru^{4+} , and Ru^{5+} 4d-ions by MCD / B. Briat, F. Ramaz, H. B. Rjeily, J. A. Hodges // *Optical Materials*. – 2005. – Vol. 27. – I. 4. – P. 691-697. DOI: 10.1016/j.optmat.2004.03.028.
2. Tarala, V.A. Synthesis of YSAG:Er ceramics and the study of the scandium impact in the dodecahedral and octahedral garnet sites on the Er^{3+} energy structure / V.A. Tarala, M.S. Nikova, S.V. Kuznetsov et al. // *Journal of Luminescence*. – 2022. – V. 241. – Art. № 118539. – 9 p. DOI: 10.1016/j.jlumin.2021.118539.
3. Liu, Y. Crystal structure evolution and luminescence property of Ce^{3+} -doped $Y_2O_3-Al_2O_3-Sc_2O_3$ ternary ceramics / Y. Liu, S. Hu, Y. Zhang et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2020. – V. 40. – I. 3. – P. 840-846. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.10.022.
4. Wu, S.-Y. Theoretical studies of the local structures and the EPR parameters for Ru^{3+} in the garnets / S.-Y. Wu, Q. Fu, J.-Z. Lin, H.-M. Zhang // *Optical Materials*. – 2007. – V. 29. – I. 8. – P. 1014-1018. DOI: 10.1016/j.optmat.2006.03.036.
5. Ru, Y. Synthesis of yttrium aluminum garnet (YAG) powder by homogeneous precipitation combined with supercritical carbon dioxide or ethanol fluid drying / Y. Ru, Q. Jie, L. Min, L. Guoqiang // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2008. – V. 28. – I. 15. – P. 2903-2914. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.005.
6. Chen, Z.-H. Synthesis of highly sinterable YAG nanopowders by a modified co-precipitation method / Z.-H. Chen, Y. Yang, Z.-G. Hu et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2007. – V. 433. – I. 1-2. – P. 328-331. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.06.084.
7. Yu, S. Fabrication of Nd:YAG transparent ceramics using powders synthesized by citrate sol-gel method / S. Yu, W. Jing, M. Tang et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – V. 772. – P. 751-759. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.09.184.
8. Kravtsov, A.A. Novel synthesis of low-agglomerated YAG:Yb ceramic nanopowders by two-stage precipitation with the use of hexamine / A.A. Kravtsov, I.S. Chikulina, V.A. Tarala, et al. // *Ceramics International*. – 2019. – V. 45. – I. 1. – P. 1273-1282. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.10.010.
9. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2. (Release, 2013). – Режим доступа: [www.url: https://www.icdd.com/pdf-2](http://www.url:https://www.icdd.com/pdf-2). – 22.07.2024.

10. **Takeuchi, A.** Thermally induced Faraday rotation in Ru⁴⁺-substituted magnetic garnet / A. Takeuchi, R. Sakai, K. Ando, K. Shinagawa // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2001. – V. 226-230. – Part 2. – P. 1990-1991. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00108-1.
11. **Gadow, R.** Synthesis of Submicron, Nanostructured Spherical Powders of Y₃Al₅O₁₂-phases by the method by ultrasonic spray pyrolysis and investigation of their structure and properties / R. Gadow, V.I. Antipov, A.G. Kolmakov et al. // *Ceramics*. – 2022. – V. 5. – I. 2. – P. 201-209. DOI: 10.3390/ceramics5020017.
12. **Kravtsov, A.A.** Nucleation and growth of YAG: Yb crystallites: a step towards the dispersity control / A.A. Kravtsov, I.S. Chikulina, V.A. Tarala, et al // *Ceramics International*. – 2020. – V. 46. – I. 18. – Part A. – P. 28585-28593. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.016.

References:

1. Briat B., Ramaz F, Rjeily H.B. et al. Attribution of the absorption bands of ruthenium-doped yttrium gallium garnet crystals to Ru³⁺, Ru⁴⁺, and Ru⁵⁺ 4d-ions by MCD, *Optical Materials*, 2005, vol. 27, issue 4, pp. 691-697. DOI: 10.1016/j.optmat.2004.03.028.
2. Tarala V.A., Nikova M.S., Kuznetsov S.V. et al. Synthesis of YSAG:Er ceramics and the study of the scandium impact in the dodecahedral and octahedral garnet sites on the Er³⁺ energy structure, *Journal of Luminescence*, 2022, vol. 241, art. no. 118539, 9 p. DOI: 10.1016/j.jlumin.2021.118539.
3. Liu Y., Hu S., Zhang Y., et al. Crystal structure evolution and luminescence property of Ce³⁺-doped Y₂O₃-Al₂O₃-Sc₂O₃ ternary ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40, issue 3, pp. 840–846. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.10.022.
4. Wu S.-Y., Fu Q, Lin J-Z et al. Theoretical studies of the local structures and the EPR parameters for Ru³⁺ in the garnets, *Optical Materials*, 2007, vol. 29, issue 8, pp. 1014-1018. DOI: 10.1016/j.optmat.2006.03.036.
5. Ru Y., Jie Q, Min L. et al. Synthesis of yttrium aluminum garnet (YAG) powder by homogeneous precipitation combined with supercritical carbon dioxide or ethanol fluid drying, *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, vol. 28, issue 15, pp. 2903-2914. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.005.
6. Chen Z.-H., Yang Y, Hu Z-G. et al. Synthesis of highly sinterable YAG nanopowders by a modified co-precipitation method, *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, vol. 433, issue 1-2. pp. 328-331. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.06.084.
7. Yu S., Jing W, Tang M et al. 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. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.09.184.
8. Kravtsov A.A., Chikulina I.S., Tarala V.A. et al. Novel synthesis of low-agglomerated YAG:Yb ceramic nanopowders by two-stage precipitation with the use of hexamine, *Ceramics International*, 2019, vol. 45, issue 1, pp. 1273-1282. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.10.010.
9. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2. (Release, 2013). Available at: [www.url: https://www.icdd.com/pdf-2](https://www.icdd.com/pdf-2) (accessed 22.07.2024).
10. Takeuchi A., Sakai R, Ando K et al. Thermally induced Faraday rotation in Ru⁴⁺-substituted magnetic garnet, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, vol. 226-230, part 2, pp. 1990-1991. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00108-1.
11. Gadow R., Antipov V.I., Kolmakov A.G., et al. Synthesis of submicron, nanostructured spherical powders of Y₃Al₅O₁₂-phases by the method by ultrasonic spray pyrolysis and investigation of their structure and properties, *Ceramics*, 2022, vol. 5, issue 2, pp. 201-209. DOI: 10.3390/ceramics5020017.
12. Kravtsov A.A., Chikulina I.S., Tarala V.A. et al. Nucleation and growth of YAG: Yb crystallites: a step towards the dispersity control, *Ceramics International*, 2020, vol. 46, issue 18, part A, pp. 28585-28593. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.016.

Original paper

Synthesis of yttrium aluminum garnet ceramic powder doped with ruthenium

V.E. Suprunchuk, A.A. Kravtsov, L.V. Tarala, E.V. Medyanik, F.F. Malyavin, V.A. Lapin,
D.P. Bedrakov

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.1016

Abstract: In the course of the work, samples of ceramic powders of yttrium-aluminum garnet doped with ruthenium ions were obtained. The introduced amount of ruthenium was 5 and 10 wt.%, respectively. The annealing temperatures were 1150 and 1600°C. In the course of the work, changes in the morphology of ceramic powders of yttrium-aluminum garnet doped with ruthenium ions were considered using scanning electron microscopy. The elemental composition was studied using energy-

dispersive spectroscopy. The phase composition was investigated by X-ray phase analysis. The specific surface area of the ceramic powder was estimated using the Brunauer-Emmett-Teller method. For the obtained samples, an increase in the specific surface area of the ceramic powder with a decrease in the quantitative content of ruthenium in the system was revealed. The presence of impurity phases was established for all samples. It was found that increasing the calcination temperature to 1600°C led to a decrease in the quantitative content of impurity phases, but did not lead to their complete elimination. The sample with the closest to a single-phase composition was obtained with a ruthenium content of no more than 5 wt.% in the material. The results obtained using differential thermal analysis showed that the ruthenium content in the amounts used does not affect the kinetics of phase transitions, as well as the kinetics of mass loss of the precursor powders.

Keywords: *yttrium aluminum garnet, alloying, ceramic powder, differential thermal analysis, ruthenium.*

Супрунчук Виктория Евгеньевна – к.х.н., доцент, старший научный сотрудник, сектор синтеза нанопорошков научно-исследовательской лаборатории перспективных материалов и лазерных сред научно-лабораторного комплекса чистых зон, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Кравцов Александр Александрович – к.т.н., заведующий сектором синтеза нанопорошков научно-исследовательской лаборатории перспективных материалов и лазерных сред научно-лабораторного комплекса чистых зон, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Тарала Людмила Викторовна – научный сотрудник сектора синтеза нанопорошков научно-исследовательской лаборатории перспективных материалов и лазерных сред научно-лабораторного комплекса чистых зон, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Медяник Евгений Викторович – научный сотрудник сектора спекания керамики научно-исследовательской лаборатории технологии перспективных материалов и лазерных сред научно-лабораторного комплекса чистых зон, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Малявин Федор Федорович – заведующий сектором спекания керамики научно-исследовательской лаборатории технологии перспективных материалов и лазерных сред научно-лабораторного комплекса чистых зон, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Лапин Вячеслав Анатольевич – к.т.н., старший научный сотрудник сектора физико-химических методов исследования и анализа научно-исследовательской лаборатории технологии перспективных материалов и лазерных сред, научно-лабораторный комплекс чистых зон, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Бедраков Дмитрий Павлович – инженер сектора эксплуатации и обслуживания чистых зон, научно-лабораторный комплекс чистых зон, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Victoria E. Suprunchuk – Ph. D., Senior Researcher, Nanopowder Synthesis Sector of the Research Laboratory of Technology of Advanced Materials and Laser Media of the Scientific Laboratory Complex of Clean Rooms, North-Caucasus Federal University

Alexander A. Kravtsov – Ph. D., Head of the Nanopowder Synthesis Sector of the Research Laboratory of Technology of Advanced Materials and Laser Media of the Scientific Laboratory Complex of Clean Rooms, North-Caucasus Federal University

Ludmila V. Tarala – Researcher, Nanopowder Synthesis Sector of the Research Laboratory of Technology of Advanced Materials and Laser Media of the Scientific Laboratory Complex of Clean Rooms, North-Caucasus Federal University

Evgeniy V. Medyanik – Researcher, Ceramics Sintering Sector of the Research Laboratory of Technology of Advanced Materials and Laser Media of the Scientific Laboratory Complex of Clean Rooms, North-Caucasus Federal University

Fedor F. Malyavin – Head of Ceramics Sintering Sector of the Research Laboratory of Technology of Advanced Materials and Laser Media of the Scientific Laboratory Complex of Clean Rooms, North-Caucasus Federal University

Viacheslav A. Lapin – Ph. D., Senior Researcher, Sector of Physical and Chemical Methods of Research and Analysis of the Research Laboratory of Technology of Advanced Materials and Laser Media of the Scientific Laboratory Complex of Clean Rooms, North-Caucasus Federal University

Bedrakov Dmitry Pavlovich – Engineer of Operations and Maintenance Sector of the Scientific Laboratory Complex of Clean Rooms, North-Caucasus Federal University

Поступила в редакцию/received: 04.09.2024; после рецензирования/revised: 04.10.2024; принята/accepted 08.10.2024.