



УДК 666.3

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-6-36-43>

Научная статья
Research article



Получение оптически прозрачного граната YAG:Ru

В. Е. Супрунчук[✉], А. А. Кравцов, В. А. Лапин,
Ф. Ф. Малявин, Д. П. Бедраков

Северо-Кавказский федеральный университет
Россия, 355000, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1а

✉ vikasuprunchuk@gmail.com

Аннотация. В ходе работы осуществлен синтез керамики на основе иттрий-алюминиевого граната (YAG), легированного атомами рутения. Порошок-прекурсор получен методом соосаждения. Легирующий агент в виде хлорида рутения (III) вводили на разных технологических стадиях: в ходе синтеза порошков-прекурсоров и на этапе деагломерации керамического порошка, с формированием двух серий образцов. Методом рентгенофазного анализа изучали фазовый состав готовой керамики. Согласно полученным данным присутствие вторичных и примесных фаз не выявлено. С помощью дифференциального-термического анализа установлено снижение катионной однородности порошка-прекурсора. При введении рутения в структуру граната наблюдалось смещение экзотермического пика его кристаллизации в сторону больших температур. Спекание образцов керамик осуществляли при температуре 1815 °C в течение 20 ч с последующим отжигом на воздухе при $t = 1500$ °C, $\tau = 2$ ч. При определении оптических характеристик керамических материалов было установлено, что способ введения лигатуры приводит к изменению показателя светопропускания, а также снижению энергии запрещенной зоны. Показатель светопропускания керамики на длине волны 1100 нм для нелегированного иттрий-алюминиевого граната составил 77,04 %, а для керамических образцов, содержащих рутений, этот показатель снизился до 65,1 и 74,5 % в зависимости от способа введения примесных ионов. Энергию запрещенной зоны образцов рассчитывали из дифференциальных спектров поглощения: ширина запрещенной зоны для чистого граната составила 4,92 эВ, а для легированного – она снизилась до минимального значения 4,4 эВ.

Ключевые слова: YAG:Ru, керамика, оптические свойства, энергия запрещенной зоны, метод соосаждения, керамический порошок

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

Для цитирования: Супрунчук В.Е., Кравцов А.А., Лапин В.А., Малявин Ф.Ф., Бедраков Д.П. Получение оптически прозрачного граната YAG:Ru. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2025;19(6):36–43.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-6-36-43>

Synthesis of optically transparent YAG:Ru ceramics

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

North-Caucasus Federal University
1a Pushkin Str., Stavropol 355000, Russia

✉ vikasuprunchuk@gmail.com

Abstract. Yttrium–aluminum garnet (YAG) ceramics doped with ruthenium atoms were synthesized in this study. The precursor powder was obtained by the coprecipitation method. The dopant, in the form of ruthenium (III) chloride, was introduced at different technological stages: during precursor powder synthesis and during deagglomeration of the ceramic powder, resulting in two series of samples. The phase composition of the sintered ceramics was examined by X-ray diffraction (XRD). According to the obtained

data, no secondary or impurity phases were detected. Differential thermal analysis (DTA) revealed a decrease in the cationic homogeneity of the precursor powder. Incorporation of ruthenium into the YAG structure led to a shift of the exothermic crystallization peak toward higher temperatures. The ceramic samples were sintered at 1815 °C for 20 h, followed by annealing in air at 1500 °C for 2 h. Optical characterization of the ceramics showed that the method of dopant introduction affected both the optical transmittance and the band gap energy. The transmittance at 1100 nm for undoped YAG ceramics was 77.04 %, while for the ruthenium-containing samples it decreased to 65.1 and 74.5 %, depending on the dopant incorporation route. The band gap energy was determined from differential absorption spectra: for pure YAG it was 4.92 eV, and for the Ru-doped ceramics it decreased to a minimum of 4.4 eV.

Keywords: YAG:Ru, ceramics, optical properties, band gap energy, coprecipitation method, ceramic powder

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 24-73-00023 (<https://rscf.ru/project/24-73-00023>).

For citation: Suprunchuk V.E., Kravtsov A.A., Lapin V.A., Malyavin F.F., Bedrakov D.P. Synthesis of optically transparent YAG:Ru ceramics. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2025;19(6):36–43. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-6-36-43>

Введение

Иттрий-алюминиевый гранат (YAG) представляет собой кристаллический материал с кубической структурой, который обладает высокими теплопроводностью и химической стабильностью, а также хорошими физическими и оптическими характеристиками. Эти свойства обеспечивают возможность его широкого применения в промышленности. Так, YAG используется в большинстве лазерных установок [1], светодиодах, оптических и электронных устройствах. Он может существовать в моно- или поликристаллической форме. Поликристаллические материалы, легированные редкоземельными металлами, набирают популярность и выступают в качестве альтернативы монокристаллам [2], при производстве которых возникают сложности достижения однородности легирования [3].

В отличие от монокристаллов технология изготовления керамики позволяет получить материал не только с равномерным атомарным распределением легирующего агента, но и заданных размеров и форм. В настоящее время большое внимание уделяется легированию иттрий-алюминиевого граната 3-валентными редкоземельными ионами [4]. Введение примесных ионов осуществляется в соответствии с критериями размера и заряда замещаемых гранатообразующих ионов [5]. Известно, что легирование и вариация количественного содержания легирующего агента приводят к изменению оптических [6], механических и тепловых свойств материала [4; 7].

Рутений относится к 4d-катионам и является привлекательным легирующим агентом. Разнообразие его электронных состояний позволяет обеспечить матрице уникальные электронные, магнитные [8], фоторефрактивные и фотохромные свойства [9; 10]. Большинство исследований применения Ru направлены на разработку катализаторов [11; 12], металлических электропроводящих покрытий для электрохимических газовых сенсоров [13], хроматографи-

ческих детекторов [14]. В керамических материалах рутений водится в матрицу для повышения электронной проводимости [15; 16], диэлектрической проницаемости [17], изменения электрического сопротивления материала [18] и применяется при разработке и создании керамических среднетемпературных ионно-транспортных мембран [19].

Хорошо изучено поведение Ru в некоторых оксидных системах, например в структурах перовскита $AA'_3B_4O_{12}$ [12; 16; 20]. Однако информации о создании оптически прозрачной керамики YAG:Ru в литературных источниках не найдено. Вероятно, что введение рутения в структуру граната позволит целенаправленно изменять оптические свойства матрицы YAG.

Целью данной работы являлось получение оптически прозрачной керамики YAG:Ru с подбором оптимального способа ее синтеза. Ранее нами была установлена возможность включения Ru в структуру граната при синтезе керамического порошка [21]. Дальнейшее изучение материала YAG:Ru позволит определить возможность его применения при производстве поликристаллических оптических изоляторов, поглотителей и светодиодов. В связи с этим в данной работе были синтезированы составы YAG:Ru при варьировании способа введения рутения в структуру граната и исследовано влияние его добавки на микроструктурные свойства и фазовые превращения порошков, а также фазовый состав и оптические свойства готовой керамики.

Материалы и методы исследования

Синтез керамических материалов осуществляли с использованием следующих реагентов:

- аммиак (25 %, ОСЧ, SigmaTek, Россия);
- хлорид алюминия гексагидрат (99 %, Неваторг, Россия);
- хлорид рутения (III) (99 %, Anhui herrman impex Co. ltd, Китай);

- хлорид иттрия гексагидрат (99,9 %, Неваторг, Россия);
- сульфат аммония (99 %, Ставреахим, Россия);
- изопропиловый спирт (99,7 %, ООО «Химпром», Россия);
- хлорид кальция (99 %, Вектон, Россия);
- хлорид магния (99,9 %, Интерхим, Россия).

Для приготовления растворов применяли деионизированную воду.

Для определения оптимального способа введения легирующего агента было получено 3 вида образцов: S_0 – чистый YAG; S_Ru представляет собой YAG:Ru, где лигатура была введена на этапе получения порошков-прекурсоров; S_0_Ru–YAG:Ru, где легирование осуществлялось на этапе измельчения керамического порошка в шаровой мельнице.

Порошки-прекурсоры S_0 и S_Ru синтезировали методом осаждения. Для этого растворы солей (иттрия и алюминия для обр. S_0 и иттрия, алюминия и рутения для обр. S_Ru) добавляли по каплям к раствору осадителя (2,7 % аммиака) с помощью перистальтического насоса. Также в растворе солей содержался $\text{NH}_4(\text{SO}_4)_2$ в концентрации 0,08 М. Полученный в результате синтеза осадок промывали раствором 0,045 М $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, затем изопропиловым спиртом и высушивали в сушильном шкафу при 60 °C в течение 15 ч. Высущенный осадок протирали через сито (200 меш), измельчали и вводили в него спекающие добавки. Измельчение осуществляли в планетарной шаровой мельнице Pulverisette 5 (Fritsch, Германия) с помощью корундовых шаров диаметром 2 мм в течение 30 мин со скоростью 150 об/мин. В качестве размольной среды использовали 0,2 М раствора $\text{NH}_4(\text{SO}_4)_2$. Массовое соотношение размольной среды, размольных тел и порошка составляло 4,5:4,5:1,0. Спекающими добавками служили MgO и CaO в количестве по 0,1 ат. %. Полученные порошки отжигали на воздухе при температуре 1150 °C в течение 2 ч в высокотемпературной печи Nabertherm 40/17 (Германия).

Керамический порошок обр. S_0 делили на 2 части и в одну из них вводили заданное количество хлорида рутения. Все образцы порошков измельчали с применением корундовых шаров диаметром 1 мм на планетарной шаровой мельнице при массовом соотношении размольной среды размольных тел и керамического порошка 3,5:5,5:1,0. Измельчение осуществляли в течение 20 мин со скоростью 150 об/мин. Полученную суспензию высушивали и протирали через сито (200 меш), после чего порошки подвергали одноосному прессованию (50 МПа) и спекали в условиях вакуума при $t = 1815$ °C в течение 20 ч. Образцышлифовали до толщины $2 \pm 0,1$ мм, полировали с помощью установки QPol-250 и отжигали на воздухе при $t = 1500$ °C в течение 2 ч (Nabertherm 40/17).

Гранулометрический состав полученных порошков изучали методом лазерного дифракционного анализа (LDA) на анализаторе SALD-7500 nano (Shimadzu, Япония). Морфологию керамических образцов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA3-LMH (Tescan, Чехия) с системой определения элементного состава AZtecEnergy Standard/X-max 20. Удельную поверхность порошков определяли методом Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) на анализаторе 3Flex (Micromeritics, США) по адсорбции азота при $T = 77$ К.

Термическое поведение исходных порошков исследовали с помощью дифференциального термического анализа (DTA) и термогравиметрического анализа (TG) на приборе STA 449 F5 Jupiter (NETZSCH-Gerätebau GmbH, Германия) в интервале температур 20–1300 °C в токе воздуха (25 °C/мин). Фазовый состав керамики оценивали с использованием рентгеновского дифрактометра TD-3700 (Tongda, Китай), оснащенного медным анодом ($\text{Cu}K_{\alpha} = 1,5406$ Å).

Коэффициенты пропускания света в диапазоне длин волн $\lambda = 200\text{--}1100$ нм регистрировали с помощью спектрофотометра СФ-56 (ОКБ-Спектр, Россия).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе работы были синтезированы порошки-прекурсоры YAG и YAG:Ru и исследованы их дисперсные составы. На рис. 1 представлены кумулятивные кривые распределения частиц порошков по размерам. В обоих случаях наблюдалось мономодальное их распределение с близкими показателями. Так, значения d_{50} для порошков-прекурсоров S_0 и S_Ru составили 2,3 и 2,6 мкм соответственно, что свидетельствует о низком влиянии катионного состава порошков на их дисперсию.

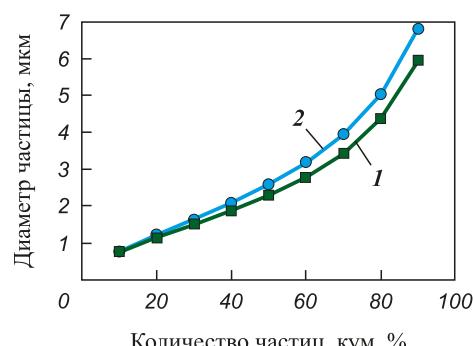


Рис. 1. Кумулятивные кривые распределения частиц порошков-прекурсоров образцов S_0 (1) и S_Ru (2)

Fig. 1. Cumulative particle-size distribution curves of precursor powders S_0 (1) and S_Ru (2)

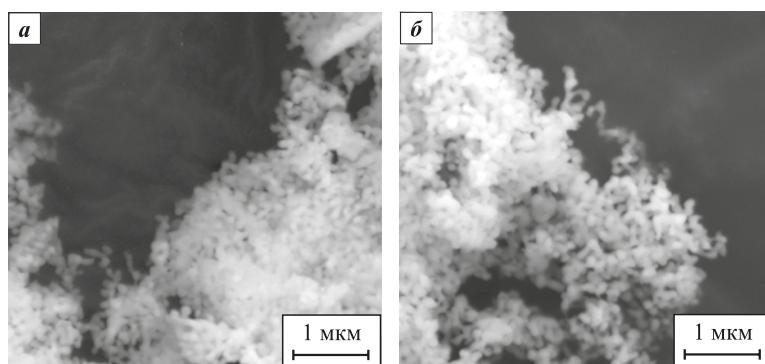


Рис. 2. СЭМ-изображения керамических порошков S_0 (а) и S_Ru (б)

Fig. 2. SEM images of ceramic powders S_0 (a) and S_Ru (b)

Морфологию керамических порошков YAG и YAG:Ru исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Согласно полученным результатам (рис. 2) частицы порошков формируют неплотные крупные агломераты с детектируемыми отдельными частицами. Они имеют вытянутую форму и могут состоять из нескольких кристаллитов, связанных перешейками. Отмечено отсутствие различий в морфологии образцов S_0 и S_Ru.

Удельная площадь поверхности обоих образцов также имела схожие значения: 11,06 м²/г для YAG и 10,28 м²/г для YAG:Ru, что указывает на разветвленность их поверхности. Таким образом, добавка рутения не привела к изменению морфологических характеристик керамических порошков.

На рис. 3 представлены кривые термического анализа порошков-прекурсоров S_0 и S_Ru. В обоих случаях происходит значительное снижение массы образцов. Первая область критической потери массы

(около 30 %) наблюдается при $t = 100\text{--}450$ °C, что может быть связано с удалением адсорбированной и молекулярно-связанной воды, амиака, нитро-групп [22; 23], о чем свидетельствует эндотермический пик при 200 °C. Вторая область потери массы зафиксирована в диапазоне от 900 до 1100 °C, в котором находятся 2 эндотермических и 1 экзотермический пики. Эндотермические пики обусловлены разложением сульфатов, окисисульфатов и десорбцией сульфатных групп [24], а экзотермический пик при $t = 940$ °C связан с кристаллизацией YAG [25]. При введении рутения в структуру граната наблюдается его смещение в сторону больших температур. Повышение температуры кристаллизации Ru-содержащего образца может быть связано со снижением катионной однородности порошка-прекурсора. Уширение пика, в свою очередь, может свидетельствовать о формировании промежуточных фаз с последующей кристаллизацией YAG.

Фазовый состав керамики исследовали после вакуумного спекания керамических порошков S_0, S_Ru и S_0_Ru при $t = 1815$ °C в течение 20 ч. С помощью рентгенофазного анализа (рис. 4) установлено, что полученные материалы представляют собой однофазные твердые растворы со структурой граната без вторичных фаз. Присутствия Ru-содержащих примесных фаз, в том числе RuO₂, не обнаружено, что свидетельствует о идентичности структуры полученных гранатов независимо от способа введения рутения.

На следующем этапе работ исследовали оптические характеристики полученной керамики. Предварительно все образцы отжигали на воздухе в течение 2 ч при $t = 1500$ °C. Спектры их светопропускания измеряли в диапазоне 200–1100 нм (рис. 5, a). Показатели линейного светопропускания на длине волны 1100 нм составили 77,04 % для керамики YAG, 65,1 % для S_Ru и 74,5 % для S_0_Ru. Согласно полученным данным по коэффициенту светопропускания добавка рутения в структуру граната

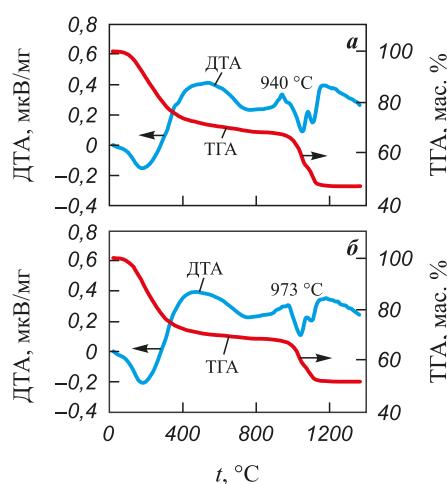


Рис. 3. Кривые термогравиметрического (ТГА) и дифференциального термического (ДТА) анализов порошков-прекурсоров S_0 и S_Ru

Fig. 3. Thermogravimetric (TGA) and differential thermal analysis (DTA) curves of precursor powders S_0 and S_Ru

приводит к снижению прозрачности материала, причем в большей степени – при введении рутения на стадии осаждения гидроксидов.

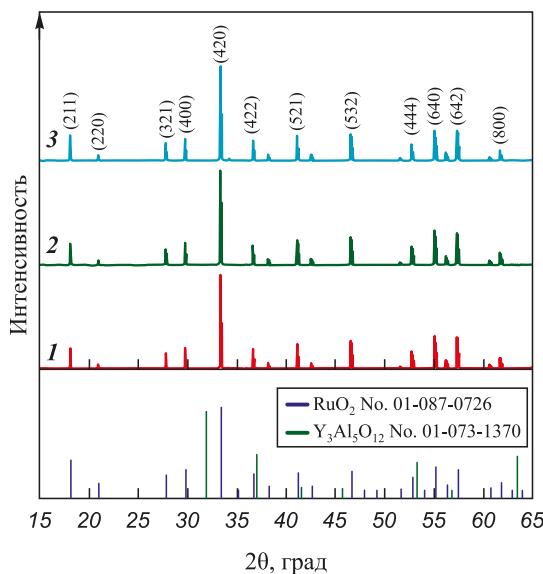


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы керамики S₀ (1), S_{Ru} (2) и S_{0_Ru} (3)

Fig. 4. XRD patterns of YAG ceramics S₀ (1), S_{Ru} (2), and S_{0_Ru} (3)

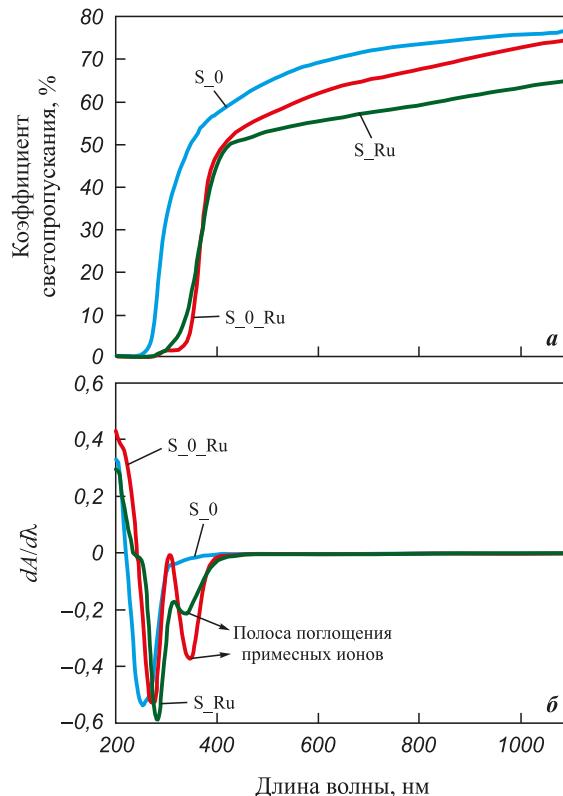


Рис. 5. Спектры светопропускания (а) и дифференциальный спектр поглощения (б) YAG керамики

Fig. 5. Optical transmittance spectra (a) and differential absorption spectrum (b) of YAG ceramics

Снижение светопропускания наблюдалось во всем исследуемом диапазоне длин волн ($\lambda = 200 \div 1100$ нм), что может быть связано с изменением окраски образцов в результате введения рутения в структуру граната (рис. 6). Серый цвет образцов, вероятно, обусловлен образованием кислородных вакансий, которые могут формировать центры окраски в результате ассоциации со свободными электронами и частично сохраняются после отжига на воздухе [26]. Поэтому изменение окраски в данном случае связано с вводимым примесным ионом.

Кроме того, установлено смещение края полосы поглощения, что может быть связано с разупорядочением структуры матрицы в результате легирования граната рутением и изменением энергии запрещенной зоны. Последняя была рассчитана из спектров поглощения, которые были получены из спектров светопропускания [27] и дифференцированы (см. рис. 5, б). Дифференциальный спектр поглощения (график скорости изменения поглощения (d_A) от изменения длины волны (d_λ)) чистого YAG имеет один край поглощения, и ширина запрещенной зоны в нем составила 4,92 эВ. У образцов S_{Ru} и S_{0_Ru} наблюдалась 2 края поглощения, что вероятно, определяется собственным поглощением ионов рутения в результате перехода $\text{Ru}^{3+} \rightarrow \text{Ru}^{4+}$. Энергия запрещенной зоны образцов S_{Ru} и S_{0_Ru} составила 4,4 и 4,54 эВ соответственно.

Таким образом, материал, полученный при введении легирующего агента на стадии деагломерации керамического порошка, имеет более высокий показатель светопропускания и меньший сдвиг края полосы поглощения, что позволяет определить данный способ получения керамики YAG:Ru как наиболее оптимальный.

Заключение

Таким образом, осуществлен синтез керамических порошков YAG:Ru методом совместного осаждения солей и определены оптимальные условия



Рис. 6. Фотографии образцов керамики S₀, S_{Ru} и S_{0_Ru}
Режим съемки: камера Pixel 8 Pro ISO 41, f/1.95; выдержка 1/336 с; дневное освещение (D65); контроль: образец S₀

Fig. 6. Photographs of ceramic samples S₀, S_{Ru}, and S_{0_Ru}
Captured with Pixel 8 Pro, ISO 41, f/1.95, exposure 1/336 s, D65 daylight; reference sample: S₀

введения хлорида рутения в систему. По данным ДТА при добавке рутения в структуру граната наблюдается смещение экзотермического пика формирования YAG в сторону больших температур, что может быть следствием снижения катионной однородности порошка-прекурсора YAG. Рутений в структуре граната также снижает светопропускание керамики во всем исследуемом диапазоне длин волн (от 200 до 1100 нм): с 77,04 % для нелегированного YAG до минимального значения 65,1 % для YAG:Ru.

Керамика, полученная при введении легирующего агента на стадии деагломерации керамического порошка, имеет более высокий показатель линейного светопропускания (74,5 %) и меньший сдвиг края полосы поглощения: с 4,92 эВ для чистого YAG до 4,54 эВ для YAG:Ru, что делает этот метод синтеза керамики YAG:Ru предпочтительным.

Несмотря на то, что введение рутения в керамическую матрицу YAG приводит к снижению показателя линейного светопропускания, преимуществом керамики YAG:Ru является изменение оптической активности материала по сравнению с чистым гранатом. Такие свойства, как изменение ширины запрещенной зоны и повышение поглощения, могут быть полезны при разработке широкополосных поглотителей нейтральных светофильтров или пассивных оптических ограничивающих устройств.

Список литературы / References

- Ikesue A., Aung Y.L., Taira T., Kamimura T., Yoshida K., Messing G.L., Progress in ceramic lasers. *Annual Review of Materials Research*. 2006;36:397–429.
<https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.36.011205.152926>
- Ali H., Masschelein P., Bruyere S., Pigeat P., Dauscher A., Rinnert H., Horwat D., Khedr M.A., Giba A.E. White light emission from Sm-doped YAG ceramic controlled by the excitation wavelengths. *Optics & Laser Technology*. 2021;142:107223.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107223>
- Lu J., Prabhu M., Song J., Li C., Xu J., Ueda K., Kaminskii A.A., Yagi H., Yanagitani T. Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics. *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2000;71(4):469–473.
<https://doi.org/10.1007/s003400000394>
- Timoshenko A.D., Matvienko O.O., Doroshenko A.G., Parkhomenko S.V., Vorona I.O., Kryzhanovska O.S., Safronova N.A., Vovk O.O., Tolmachev A.V., Baumer VN., Matolínová I., Hau S., Gheorghe C., Yavetskiy R.P. Highly-doped YAG:Sm³⁺ transparent ceramics: Effect of Sm³⁺ ions concentration. *Ceramics International*. 2023;49(5):7524–7533.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.257>
- Boulesteix R., Maître A., Baumard J.-F., Sallé C., Rabinovitch Y. Mechanism of the liquid-phase sintering for Nd:YAG ceramics. *Optical Materials*. 2009;31(5):711–715. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2008.04.005>
- Wu X., Wang S., Wong-Ng W., Gu Q., Jiang Y., Wang C., Ma S., Liu W. Novel optical properties and induced magnetic moments in Ru-doped hybrid improper ferroelectric Ca₃Ti₂O₇. *Journal of Advanced Ceramics*. 2021;28;10(1):120–128.
<https://doi.org/10.1007/s40145-020-0425-2>
- Yagi H., Yanagitani T., Numazawa T., Ueda K. The physical properties of transparent Y₃Al₅O₁₂. *Ceramics International*. 2007;33(5):711–714.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.12.007>
- Banerjee A. Fluoride electrolyte based galvanic cell: Stability of the hollandite BaRu₆O₁₂(s). *Journal of Fluorine Chemistry*. 2021;245:109779.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2021.109779>
- Wu S.-Y., Fu Q., Lin J.-Z., Zhang H.-M. Theoretical studies of the local structures and the EPR parameters for Ru³⁺ in the garnets. *Optical Materials*. 2007;29(8):1014–1018.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2006.03.036>
- Chiang C.H., Chen J., Hu C. Photorefractive and photochromic properties of Ru-doped lithium niobate crystal. In: *Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics Europe-Technical Digest*. Munich, Germany, 2007. CC_15.
<https://doi.org/10.1109/CLEOE-IQEC.2007.4386031>
- Masuda Y., Hosokawa S., Inoue M. Combustion activities of the Ru catalysts supported on hexagonal Yb-FeO₃. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2011;119(1395):850–854.
<https://doi.org/10.2109/jcersj2.119.850>
- Sun N., Li W., Qin Y., Zheng Z., Zhang B., Dong X., Wei P., Zhang Y., He X., Xie X., Huang K., Wu L., Lei M., Gou H., Yu R. Screening A-site ordered quadruple perovskites for alkaline hydrogen evolution reaction via unifying electronic configuration descriptor. *Chinese Physics B*. 2024;33(12):128101.
<https://doi.org/10.1088/1674-1056/ad8074>
- Фесик Е.В., Гребнев В.В., Заражевский В.И., Мальчиков Г.Д. Рутениевые покрытия на керамике из диоксида циркония: физико-химические и функциональные свойства. *Журнал прикладной химии*. 2014;87(5):601–606.
Fesik E.V., Grebnev V.V., Zarazhevskii V.I., Mal'chikov G.D. Ruthenium coatings on zirconium dioxide ceramic: Physicochemical and functional properties. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2014;87(5):591–595.
<https://doi.org/10.1134/S1070427214050097>
- Salimi A., Pourbeyram S., Amini M.K. Renewable-surface sol–gel derived carbon ceramic electrode fabricated by [Ru(bpy)(tpy)Cl]PF₆ and its application as an amperometric sensor for sulfide and sulfur oxoanions. *The Analyst*. 2002;127(12):1649–1656.
<https://doi.org/10.1039/B209194A>
- Hu D., Wang R., Du P., Li G., Wang Y., Fan D., Pan X. Electrospinning Ru doped Co₃O₄ porous nanofibers as promising bifunctional catalysts for oxygen evolution and oxygen reduction reactions. *Ceramics International*. 2022;48(5):6549–6555.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.202>
- Veselinović L., Mitrić M., Mančić L., Jardim P.M., Škapin S.D., Cvjetićanin N., Milović M.D., Marković S.

- Crystal Structure and Electrical Properties of Ruthenium-Substituted Calcium Copper Titanate. *Materials*. 2022;29;15(23):8500.
<https://doi.org/10.3390/ma15238500>
17. Li W., Zhang T., Liu S., Lu Z., Xiong R. Decrease in the dielectric loss of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ at high frequency by Ru doping. *Ceramics International*. 2017;43(5):4366–4371.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.082>
18. Annamalai S., Vidensky I., Pegg I.L., Dutta B. Effect of cation stoichiometry on the transport properties of calcium ruthenium oxide ceramics. *Journal of Materials Science*. 2008;43(14):4996–5004.
<https://doi.org/10.1007/s10853-008-2739-2>
19. Dergacheva P.E., Kulbakin I.V., Fedorov S.V., Lysenkov A.S., Artemov V.V. Ceramic composite membranes based on $\text{Bi}_3\text{Ru}_3\text{O}_{11}-\text{Bi}_{1.6}\text{Er}_{0.4}\text{O}_3$ for obtaining of oxygen. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2021;12(5):1326–1331.
<https://doi.org/10.1134/S2075113321050087>
20. Mizumaki M., Mizokawa T., Agui A., Tanaka S., Takatsu H., Yonezawa S., Maeno Y. Oxygen hole state in A-site ordered perovskite $\text{ACu}_3\text{Ru}_4\text{O}_{12}$ ($\text{A} = \text{Na}, \text{Ca}, \text{and La}$) probed by resonant X-ray emission spectroscopy. *Journal of the Physical Society of Japan*. 2013;82(2):024709.
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.82.024709>
21. Супрунчук В.Е., Кравцов А.А., Тарала Л.В., Медянин Е.В., Малявин Ф.Ф., Лапин В.А., Бедраков Д.П. Синтез керамического порошка иттрий-алюминиевого граната, легированного рутением. *Физико-химические аспекты изучения кластеров,nanoструктур и наноматериалов*. 2024;16:1016–1024.
<https://doi.org/10.26456/pcascnn/2024.16.1016>
- Suprunchuk V.E., Kravtsov A.A., Tarala L.V., Medyanik E.V., Malyavin F.F., Lapin V.A., Bedrakov D.P. Synthesis of yttrium aluminum garnet ceramic powder doped with ruthenium. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*.
22. Kravtsov A.A., Nikova M.S., Vakalov D.S., Tarala V.A., Chikulina I.S., Malyavin F.F., Chapura O.M., Krandievsky S.O., Kuleshov D.S., Lapin V.A. Combined effect of MgO sintering additive and stoichiometry deviation on YAG crystal lattice defects. *Ceramics International*. 2019;45(16):20178–20188.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.287>
23. Jing W., Li F., Yu S., Ji X., Xu T., Zhang J., Pan Z., Yuan Z., Kang B., Deng J., Yin W., Huang H. High efficiency synthesis of Nd:YAG powder by a spray co-precipitation method for transparent ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2018;38(5):2454–2461.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.059>
24. Kravtsov A.A., Chapura O.M., Tarala V.A., Medyanik E.V., Tarala L.V., Suprunchuk V.E., Malyavin F.F., Kuznetsov S.V., Tsvetkov V.S., Dobretsova E.A., Kalachev Y.L., Lapin V.A. Fabrication and characterization of LuAG: Er ceramics with high optical transmission. *Journal of the European Ceramic Society*. 2025;45(3):117033.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117033>
25. Ru Y., Jie Q., Min L., Guoqiang L. 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;28(15):2903–2914.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.005>
26. Zhang W., Lu T., Wei N., Ma B., Li F., Lu Z., Qi J. Effect of annealing on the optical properties of Nd:YAG transparent ceramics. *Optical Materials*. 2012;34(4):685–690.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2011.10.001>
27. Huang C.H., Zhang G., Chen Z.Q., Huang X.J., Shen H.Y. Calculation of the absorption coefficients of optical materials by measuring the transmissivities and refractive indices. *Optics & Laser Technology*. 2002;34(3):209–211.
[https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(01\)00112-8](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(01)00112-8)

Сведения об авторах



Information about the Authors

Виктория Евгеньевна Супрунчук – к.х.н., доцент, ст. науч. сотрудник Сектора синтеза нанопорошков Научно-исследовательской лаборатории перспективных материалов и лазерных сред (НИЛ ПМиЛС) Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ)

ID ORCID: 0000-0002-5587-8262

E-mail: vikasuprunchuk@gmail.com

Александр Александрович Кравцов – к.т.н., зав. Сектором синтеза нанопорошков НИЛ ПМиЛС, СКФУ

ID ORCID: 0000-0002-0645-1166

E-mail: sanya-kravtsov@yandex.ru

Вячеслав Анатольевич Лапин – к.т.н., ст. науч. сотрудник Сектора физико-химических методов исследования и анализа НИЛ ПМиЛС, СКФУ

ID ORCID: 0000-0002-1938-4134

E-mail: viacheslavlapin@yandex.ru

Федор Федорович Малявин – зав. Сектором спекания керамики НИЛ ПМиЛС, СКФУ

ID ORCID: 0000-0002- 5255-9346

E-mail: fedormalyavin@mail.ru

Viktoria E. Suprunchuk – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Senior Researcher, Sector of Nanopowder for Synthesis, Research Laboratory Advanced Materials and Laser Media (RL AMLM), North-Caucasus Federal University (NCFU)

ID ORCID: 0000-0002-5587-8262

E-mail: vikasuprunchuk@gmail.com

Alexander A. Kravtsov – Cand. Sci. (Eng.), Head, Sector of Nanopowder Synthesis, RL AMLM, NCFU

ID ORCID: 0000-0002-0645-1166

E-mail: sanya-kravtsov@yandex.ru

Vyacheslav A. Lapin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Sector of Physicochemical Methods of Analysis, RL AMLM, NCFU

ID ORCID: 0000-0002-1938-4134

E-mail: viacheslavlapin@yandex.ru

Fedor F. Malyavin – Head, Ceramics Sintering Sector, RL AMLM, NCFU

ID ORCID: 0000-0002- 5255-9346

E-mail: fedormalyavin@mail.ru

Дмитрий Павлович Бедраков – инженер Сектора эксплуатации и обслуживания НИЛ ПМиЛС, СКФУ
 **ORCID:** 0009-0001-8207-7436
 **E-mail:** dima.bedracov@mail.ru

Dmitry P. Bedrakov – Engineer, Operations and Maintenance Sector, RL AMLM, NCFU
 **ORCID:** 0009-0001-8207-7436
 **E-mail:** dima.bedracov@mail.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

V. E. Супрунчук – концептуализация, проведение экспериментальной работы по подготовке и синтезу образцов, анализ результатов, написание и оформление статьи.

A. A. Кравцов – определение методики работы, проведение первичного анализа результатов.

В. А. Лапин – проведение физико-химического исследования образцов, участие в обсуждении результатов.

Ф. Ф. Малевин – проведение прессования и спекания подготовленных керамических порошков под вакуумом, участие в обсуждении результатов.

Д. П. Бедраков – проведение полировки керамики, участие в обсуждении результатов.

V. E. Suprunchuk – conceptualization; experimental work on sample preparation and synthesis; data analysis; writing and manuscript preparation.

A. A. Kravtsov – methodology; preliminary data analysis.

V. A. Lapin – physicochemical characterization of samples; participation in data interpretation.

F. F. Malyavin – uniaxial pressing and vacuum sintering of ceramic powders; participation in discussion of results.

D. P. Bedrakov – polishing of ceramic specimens; participation in discussion of results.

Статья поступила 07.04.2025 г.

Received 07.04.2025

Доработана 24.07.2025 г.

Revised 24.07.2025

Принята к публикации 06.08.2025 г.

Accepted 06.08.2025