

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственной
университет, 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ YAG: Ce, ДОПИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА

А.А. Кравцов^{1,2}, И.С. Чикулина², Д.С. Вакалов², О.М. Чапура², С.О. Крандиевский²,
О.В. Девицкий^{1,2}, В.А. Лапин^{1,2}

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»

344006, Россия, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

²ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1

sanya-kravtsov@ya.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.220

Аннотация: В работе впервые было исследовано влияние наночастиц серебра на люминесценцию иттрий-алюминиевого граната, легированного церием. С помощью метода химического восстановления был синтезирован золь с размером наночастиц серебра ≈ 100 нм. Керамический порошок люминофора иттрий-алюминиевого граната, легированного церием, был получен методом двухстадийного осаждения в уротропин. Золь наночастиц серебра в концентрациях от 0,125 до 0,1 мл вводили в порошок-прекурсор перед прокаливанием. Было показано, что при данном способе введения наночастиц серебра интенсивность фотолюминесценции возрастала по сравнению с эталоном. Оптимальной концентрацией в рамках исследования являлась концентрация 0,25 мл. При данной концентрации увеличение интенсивности фотолюминесценции на длине волны 540 нм составило порядка 10%. Проведенные исследования показали, что наночастицы серебра могут с успехом применяться для увеличения яркости люминофора иттрий-алюминиевого граната, легированного церием, без искажения и ухудшения спектральных характеристик.

Ключевые слова: наночастицы серебра, керамический порошок, люминесценция, иттрий-алюминиевый гранат, легированный церием, оптические свойства.

1. Введение

Светодиоды белого свечения на сегодняшний день используются повсеместно благодаря их высокой эффективности преобразования энергии, долговечности, низкой стоимости и компактности. Они с успехом заменяют энергоёмкие и неэффективные лампы накаливания. Несмотря на то, что было исследовано множество люминесцентных материалов для создания диодов белого свечения, наиболее популярным желтым люминофором является иттрий-алюминиевый гранат, легированный церием ($Y_3Al_5O_{12}:Ce$, YAG:Ce), который в сочетании с синим светоизлучающим чипом (например, GaN и InGaN) даёт белое излучение светодиода [1]. Это связано с тем, что YAG:Ce имеет интенсивную и широкую желтую полосу излучения, которая пропускает остаточный синий цвет для получения белого цвета [2].

YAG:Ce известен как люминофор в течение многих лет, и используется для изготовления различных источников белого света,

например, фар для автомобилей. Однако исследования, направленные на разработку новых способов получения люминесцентных порошков и керамики $YAG:Ce$ с более высокой эффективностью люминесценции, остаются актуальными и проводятся научными группами по всему миру [3].

В то же время известно, что плазмонный эффект является многообещающим методом значительного улучшения интенсивности люминесценции при взаимодействии излучающих центров (например, редкоземельных ионов) с плазмонным резонансом (ПР) благородных металлов (серебра и золота) [4, 5]. Когда частота возбуждающего пучка и/или частота люминесценции редкоземельных ионов близки к частоте полосы ПР металлических наночастиц, сильное индуцированное локальное поле может способствовать повышению эффективности люминесценции ионов в окрестности [6]. Солегирирование люминофоров наночастицами Ag интенсивно изучается как перспективный метод усиления люминесценции редкоземельных ионов [7].

В литературных данных отсутствуют исследования, о возможности увеличения люминесценции $YAG:Ce$ при помощи допирования наночастицами серебра, в связи с этим актуальной задачей является изучение влияния поверхностного плазмонного резонанса наночастиц серебра на люминесценцию иттрий-алюминиевого граната, легированного церием.

2. Материалы и методы

Наночастицы серебра в форме золя были синтезированы методом химического восстановления боргидридом натрия [8, 9]. Керамический порошок $YAG:Ce$ был получен методом двухстадийного осаждения в уротропин [10,11]. Образцы люминесцентных порошков $YAG:Ce$ с наносеребром готовили следующим образом. В одинаковые навески (2 г) порошка гидроксидов (керамического прекурсора) добавляли различные аликвоты золя наносеребра (0,125 мл; 0,25 мл; 0,5 мл; 1 мл). Далее полученную смесь перетирали с помощью ступки и пестика. Затем образцы прокаливали при температуре 1150°C в течение 2 ч. Таким образом было получено 4 образца с различными концентрациями наносеребра и 1 эталонный образец без добавления наносеребра.

Спектры поглощения золя серебра в диапазоне длин волн 355–605 нм были измерены на спектрофотометре СФ-56. Размер наночастиц серебра в золе был оценен методом фотонно-корреляционной спектроскопии на приборе Photocor Complex. Микрофотографии люминесцентных порошков $YAG:Ce$ и наночастиц серебра были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA3-LMN с

системой определения элементного состава AZtecEnergy Standard/X-max20. Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре Empyrean (PANalytical) при 40 кВ/40 мА с использованием излучения CuK_{α} с никелевым фильтром при скорости сканирования $1,5^{\circ} 2\theta/\text{мин}$ и шаге $0,01^{\circ} 2\theta$. Фотолюминесценцию порошков исследовали с помощью спектрометрического комплекса, собранного на базе монохроматоров МДР-23 (ЛОМО) и МДР-41 (ЛОМО). Возбуждали люминофор излучением с длиной волны $\lambda = 436 \text{ нм}$. Интенсивность люминесценции измеряли в диапазоне длин волн 456–696 нм.

3. Обсуждение результатов

Известно, что выраженным эффектом плазмонного резонанса обладают наночастицы серебра с размерами $\approx 5 - 200 \text{ нм}$. Следовательно, для изучения влияния плазмонного эффекта наночастиц серебра на люминесценцию $YAG:Ce$ необходимо, чтобы размер наночастиц находился в указанном интервале.

Полученные в рамках данной работы наночастицы серебра были исследованы методами спектрофотометрии и фотонно-корреляционной спектроскопии (см. рис. 1) [12]. На спектре поглощения золя серебра присутствует явно выраженный максимум поглощения на длине волны около 440 нм, обусловленный плазмонным резонансом (см. рис. 1 а). Результаты измерения размера частиц показали, что средний гидродинамический радиус наночастиц серебра составил около 50 нм (см. рис. 1 б).

Для получения представления о морфологии наночастиц серебра и керамического порошка люминофора $YAG:Ce$ образцы исследовали методом растровой электронной микроскопии (см. рис. 2).

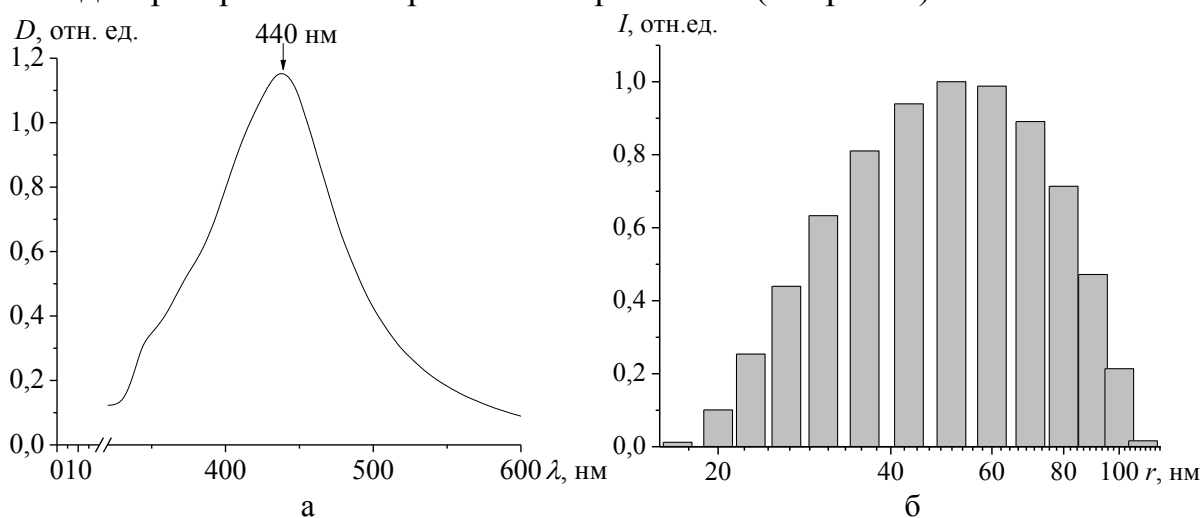


Рис. 1. Спектр поглощения золя серебра (а), и гистограмма распределения гидродинамических радиусов наночастиц серебра (б).

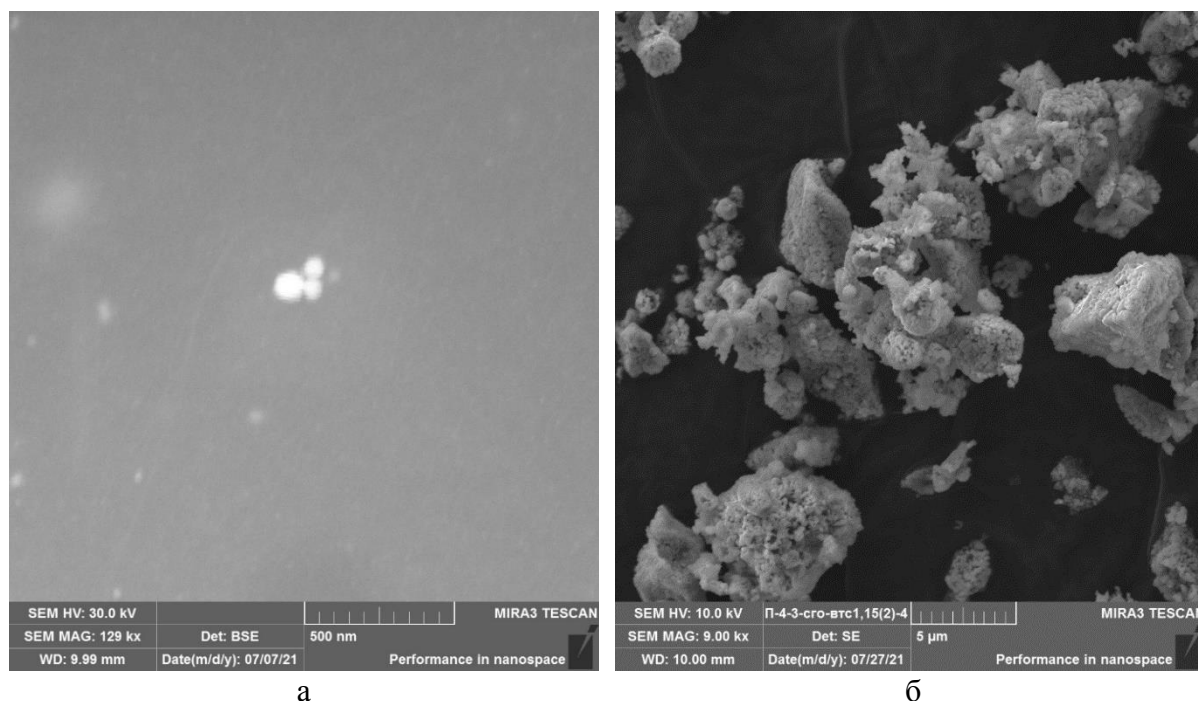


Рис. 2. Микрофотографии РЭМ наночастиц серебра (а), и керамического порошка $YAG:Ce$ (б).

Анализ микрофотографий показал, что наночастицы серебра имеют сферическую форму (см. рис. 2 а). Размер частиц $\approx 100 \pm 20$ нм, что отлично согласуется с результатами фотонно-корреляционной спектроскопии. Частицы не агломерированы и располагаются отдельно друг от друга, либо образуют небольшие ассоциаты (3–5 частиц).

Керамический порошок сильно агломерирован (см. рис. 2 б). Агломераты характеризуются неправильной формой и размерами от 1 до 10 мкм. Керамические кристаллиты имеют квазисферическую форму и размеры 80–130 нм.

Фазовый состав керамического порошка $YAG:Ce$ был изучен с помощью рентгенофазового анализа. Дифрактограмма образца представлена на рис. 3. Расшифровка дифрактограммы показала, что в результате прокаливании прекурсора при 1150°C был получен монофазный гранат с кубической кристаллической решеткой симметрии $Ia-3d$ с параметром ячейки $12,015 \text{ \AA}$. Номинальная формула соединения с учетом концентрации введенного церия – $Y_{2,982}Ce_{0,018}Al_5O_{12}$.

Таким образом, представленные выше результаты исследований показывают, что в рамках работы были получены керамические порошки иттрий-алюминиевого граната, активированного церием и допированные наночастицами серебра. Однако с прикладной точки зрения наиболее важными являются исследования фотолюминесценции образцов, поскольку они дают информацию о влиянии наночастиц серебра на интенсивность люминесценции. На рис. 4 представлены спектры

люминесценции образцов $YAG:Ce$ с различными концентрациями наночастиц серебра.

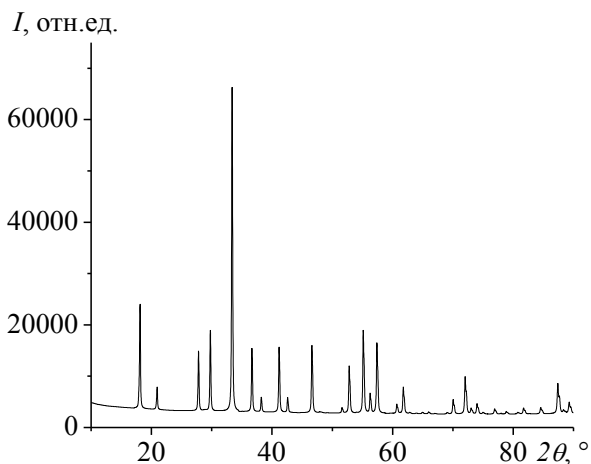


Рис. 3. Дифрактограмма керамического порошка $YAG:Ce$.

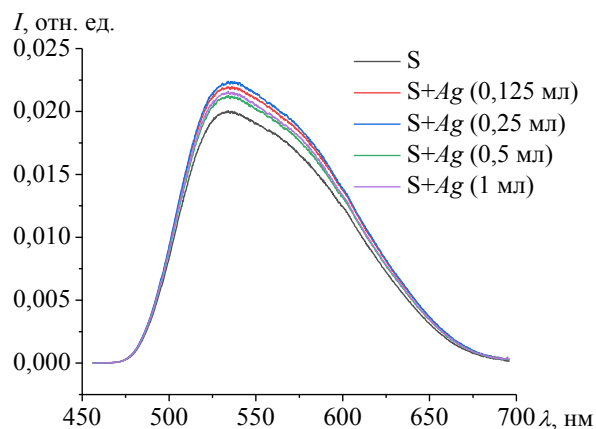


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции образцов $YAG:Ce$ с различными концентрациями наночастиц серебра (длина волны возбуждения $\lambda = 436$ нм).

Все синтезированные образцы обладают выраженной фотолюминесценцией. На спектрах присутствует широкая полоса люминесценции от 480 до 680 нм. Такая форма спектра является типичной для люминофора $YAG:Ce$. Добавление серебра не оказывает влияния на форму спектра и не вызывает появления новых полос люминесценции. Анализируя спектры можно с уверенностью заключить, что все 4 образца $YAG:Ce$ с наночастицами серебра имеют более интенсивную люминесценцию по сравнению с эталонным образцом без наносеребра. Наилучший результат был достигнут при концентрации серебра 0,25 мл. Интенсивность данного образца на длине волны 540 нм превосходит интенсивность образца сравнения на $\approx 10\%$.

4. Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что введение наночастиц серебра с размерами ≈ 100 нм в люминофор $YAG:Ce$ на стадии порошка прекурсора (перед прокаливанием) оказывает положительное влияние на интенсивность фотолюминесценции при возбуждении длиной волны $\lambda = 436$ нм. Оптимальной концентрацией наночастиц серебра в рамках работы являлась концентрация 0,25 мл. При данной концентрации было достигнуто увеличение интенсивности люминесценции на длине волны 540 нм порядка 10%. В свете представленных данных актуальными и необходимыми являются дальнейшие исследования в данном направлении. В частности, изучение влияния размера наночастиц серебра, а также способа его введения на люминесценцию $YAG:Ce$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МК-3786.2021.1.3). Исследования проводились на оборудовании Центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0029 (соглашение № 075-15-2021-687).

Библиографический список:

1. **Nishiura, S** Properties of transparent *Ce:YAG* ceramic phosphors for white LED / S. Nishiura, S. Tanabe, K. Fujioka, Y. Fujimoto // *Optical Materials*. – 2010. – V. 33. – I. 5. – P. 688-691. DOI: 10.1016/j.optmat.2010.06.005.
2. **Pan, Y.** Tailored photoluminescence of *YAG:Ce* phosphor through various methods / Y. Pan, M. Wu, Q. Su // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2003. – V. 65. – I. 5. – P. 845-850. DOI: 10.1016/j.jpcs.2003.08.018.
3. **Yao, Q.** Simple mass-preparation and enhanced thermal performance of *Ce:YAG* transparent ceramics for high power white LEDs / Q. Yao, L. Zhang, J. Zhang et al. // *Ceramics International*. – 2019. – V. 45. – I. 5. – P. 6356-6362. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.12.121.
4. **Haouari, M.** Structural and spectroscopic properties of *Eu3+* doped tellurite glass containing silver nanoparticles / M. Haouari, F.B. Slimen, A. Maaoui, N. Gaumer // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – V. 743. – P. 586-596. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.192.
5. **Zhu, Y.** Plasmon multiwavelength-sensitized luminescence enhancement of highly transparent *Ag/YVO₄:Eu3+* / PMMA film / Y. Zhu, Y. Wang, J. Zhu et al. // *Journal of Luminescence*. – 2018. – V. 200. – P. 158-163. DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.03.081.
6. **Rajesh, D.** Enhanced VIS and NIR emissions of *Pr3+* ions in TZYNG glasses containing silver ions and nanoparticles / D. Rajesh, R.J. Amjad, M.R. Dousti, A.S.S. de Camargo // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – V. 695. – P. 607-612. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.11.058.
7. **Malta, O.L.** Fluorescence enhancement induced by the presence of small silver particles in *Eu3+* doped materials / O.L. Malta, P.A. Santa-Cruz, G.F. De Sá, F. Auzel // *Journal of Luminescence*. – 1985. – V. 33. – I. 3. – P. 261-272. DOI: 10.1016/0022-2313(85)90003-1.
8. **Lunin, L.S.** Effect of the *Ag* nanoparticle concentration in *TiO₂-Ag* functional coatings on the characteristics of *GaN/P/GaAs/Ge* photoconverters / L.S. Lunin, M.L. Lunina, A.A. Kravtsov et al. // *Semiconductors*. – 2018. – V. 52. – I. 8. – P. 993-996. DOI: 10.1134/S1063782618080122.
9. **Lunin, L.S.** Polymer films with silver nanoparticles improve the spectral characteristics of photovoltaic converters / L.S. Lunin, O.V. Devitskii, A.A. Kravtsov, A.S. Pashchenko // *Technical Physics Letters*. – 2020. – V. 46. – I. 1. – P. 98-101. DOI: 10.1134/S1063785020010265.
10. **Kravtsov, A.A.** Combined effect of *MgO* sintering additive and stoichiometry deviation on *YAG* crystal lattice defects / A.A. Kravtsov, M.S. Nikova, D.S. Vakalov et al. // *Ceramics International*. – 2019. – V. 45. – I. 16. – P. 20178-20188. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.06.287.
11. **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.
12. **Кравцов, А.А.** Исследование микроструктуры полимерных функциональных покрытий с наночастицами серебра для солнечных элементов / А.А. Кравцов, О.В. Девицкий, Д.С. Кулешов, А.С. Пашченко // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2020. – Вып. 12. – С. 617-627. DOI: 10.26456/pcasenn/2020.12.617.

References:

1. Nishiura S, Tanabe S., Fujioka K., Fujimoto Y. Properties of transparent *Ce:YAG* ceramic phosphors for white LED, *Optical Materials*, 2010, vol. 33, issue 5, pp. 688-691. DOI: 10.1016/j.optmat.2010.06.005.
2. Pan Y., Wu M., Su Q. Tailored photoluminescence of *YAG:Ce* phosphor through various methods, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2003, vol. 65, issue 5, pp. 845-850. DOI: 10.1016/j.jpcs.2003.08.018.
3. Yao Q., Zhang L., Zhang J. et al. Simple mass-preparation and enhanced thermal performance of *Ce:YAG* transparent ceramics for high power white LEDs, *Ceramics International*, 2019, vol. 45, issue 5, pp. 6356-6362.

DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.12.121.

4. Haouari M., Slimen F.B., Maaoui A., Gaumer N. Structural and spectroscopic properties of Eu^{3+} doped tellurite glass containing silver nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 743, pp. 586-596. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.192.

5. Zhu Y., Wang Y., Zhu J. et al. Plasmon multiwavelength-sensitized luminescence enhancement of highly transparent $Ag/YVO_4:Eu^{3+}/PMMA$ film, *Journal of Luminescence*, 2018, vol. 200, pp. 158-163. DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.03.081.

6. Rajesh D., Amjad R.J., Dousti M.R., de Camargo A.S.S. Enhanced VIS and NIR emissions of Pr^{3+} ions in TZYn glasses containing silver ions and nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 695, pp. 607-612. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.11.058.

7. Malta O.L., Santa-Cruz P.A., De Sá G.F., Auzel F. Fluorescence enhancement induced by the presence of small silver particles in Eu^{3+} doped materials, *Journal of Luminescence*, 1985, vol. 33, issue 3, pp. 261-272. DOI: 10.1016/0022-2313(85)90003-1.

8. Lunin L.S., Lunina M.L., Kravtsov A.A., et al. Effect of the Ag nanoparticle concentration in $TiO_2 - Ag$ functional coatings on the characteristics of $GaN/P/GaAs/Ge$ photoconverters, *Semiconductors*, 2018, vol. 52, issue 8, pp. 993-996. DOI: 10.1134/S1063782618080122.

9. Lunin L.S., Devitskii O.V., Kravtsov A.A., Pashchenko A.S. Polymer films with silver nanoparticles improve the spectral characteristics of photovoltaic converters, *Technical Physics Letters*, 2020, vol. 46, issue 1, pp. 98-101. DOI: 10.1134/S1063785020010265.

10. Kravtsov A.A., Nikova M.S., Vakalov D.S. et al. Combined effect of MgO sintering additive and stoichiometry deviation on YAG crystal lattice defects, *Ceramics International*, 2019, vol. 45, issue 16, pp. 20178-20188. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.06.287.

11. 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.

12. Kravtsov A.A., Devitsky O.V., Kuleshov D.S., Pashchenko A.S. Issledovanie mikrostruktury polimernykh funktsional'nykh pokrytij s nanochastitsami serebra dlya solnechnykh elementov [The microstructure of polymer functional coatings with silver nanoparticles for solar cells], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue 12, pp. 617-627. (In Russian) DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.617. (In Russian).

Original paper

LUMINESCENCE OF YAG:Ce DOPED WITH SILVER NANOPARTICLES

A.A. Kravtsov^{1,2}, I.S. Chikulina², D.S. Vakalov², O.M. Chapura², S.O. Krandievsky², O.V. Devitsky^{1,2},
V.A. Lapin^{1,2}

¹*Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of The Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia*

²*North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.220

Abstract: This work was the first to study the effect of silver nanoparticles on the luminescence of cerium doped yttrium-aluminum garnet. A sol with the size of silver nanoparticles of ≈ 100 nm was synthesized using the method of chemical reduction. Phosphor ceramic powder of the yttrium-aluminum garnet doped with cerium was obtained by the two-stage precipitation method. The silver nanoparticles sol was introduced into the precursor powder before calcination in concentrations from 0,125 to 0,1 ml. It was shown that the photoluminescence intensity increased in comparison with the reference when we used this method of introducing silver nanoparticles. The optimal concentration within the study was 0,25 ml. At this concentration, the increase in the photoluminescence intensity at a wavelength of 540 nm was about 10 %. Studies have shown that silver nanoparticles can be successfully used to increase the brightness of the phosphor of the yttrium-aluminum garnet doped with cerium without distortion and deterioration of spectral characteristics.

Keywords: *silver nanoparticles, ceramic powder, luminescence, yttrium-aluminum garnet doped with cerium, optical properties.*

Кравцов Александр Александрович – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физики и

технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ электроники и фотоники ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории керамики и технохимии научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Чикulina Ирина Сергеевна – заведующий научно-исследовательской лабораторией керамики и технохимии научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Вакалов Дмитрий Сергеевич – к.ф.-м.н., заведующий научно-исследовательской лабораторией физико-химических методов анализа научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Чапура Олег Михайлович – инженер кафедры физической электроники физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Крандиевский Святослав Олегович – инженер научно-исследовательской лаборатории физико-химических методов анализа научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Девицкий Олег Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», старший научный сотрудник научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Лалин Вячеслав Анатольевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физико-химических методов анализа научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Aleksandr A. Kravtsov – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Center The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Researcher, Scientific-research Laboratory of Ceramics and Technochemistry, Scientific-laboratory Complex of Clean Rooms, Physics and Technology Faculty, North-Caucasus Federal University

Irina S. Chikulina – Head of the Research Laboratory of Ceramics and Technochemistry, Scientific-laboratory Complex of Clean Rooms, Physics and Technology Faculty, North-Caucasus Federal University

Dmitry S. Vakalov – Ph. D., Head of the Research Laboratory of Physicochemical Methods of Analysis, Scientific-laboratory Complex of Clean Rooms, Physics and Technology Faculty, North-Caucasus Federal University

Oleg M. Chapura – Engineer of the Department of Physical Electronics, Physics and Technology Faculty, North-Caucasus Federal University

Svyatoslav O. Krandievsky – Engineer of the Research Laboratory of Physicochemical Methods of Analysis, Scientific-laboratory Complex of Clean Rooms, Physics and Technology Faculty, North-Caucasus Federal University

Oleg V. Devitskiy – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Center Federal Research Center The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Senior Researcher of the Scientific and Educational Center for Photovoltaics and Nanotechnology, North-Caucasus Federal University

Viacheslav A. Lapin – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Center The Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Researcher of the Research Laboratory of Physicochemical Methods of Analysis, Scientific and Laboratory Complex of Clean Rooms, Physics and Technology Faculty, North-Caucasus Federal University

Поступила в редакцию/received: 24.08.2021; после рецензирования/ revised: 10.09.2021; принята/accepted 20.09.2021.