
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ, АКТИВИРОВАННЫХ СЕРЕБРОМ И ЛАНТАНОМ

© 2023 г. М. А. Гирсова¹, *, Л. Н. Куриленко¹, И. Н. Анфимова¹, Т. В. Антропова¹

¹Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия
*e-mail: girsovama@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.06.2023 г.

После доработки 02.08.2023 г.

Принята к публикации 07.08.2023 г.

Синтезированы композиционные материалы (КМ) на основе матриц из высококремнеземных нанопористых стекол, активированных серебром и лантаном. Установлено, что образцы КМ в зависимости от состава обладают люминесценцией в УФ, фиолетово-синем, зеленом, красном и инфракрасном спектральных диапазонах, обусловленной присутствием изолированных Ag^+ -ионов, парных центров Ag^+-Ag^+ , молекулярных кластеров и наночастиц серебра, кислородных вакансий в La_2O_3 наряду с различными кремниевыми дефектными центрами.

Ключевые слова: композиционные материалы, высококремнеземное нанопористое стекло, серебро, лантан, люминесценция

DOI: 10.31857/S0132665123600425, **EDN:** ERCREP

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что различные материалы (стекла, наноккомпозиты, покрытия, цеолиты), активированные серебром (в присутствии или без La_2O_3), обладают люминесценцией в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах за счет ионов, молекулярных кластеров (МК), наночастиц (НЧ) серебра [1–7]. Для наночастиц La_2O_3 характерна люминесценция в диапазоне 370–650 нм, которую приписывают одиночно ионизированным кислородным вакансиям в La_2O_3 , и излучение является результатом радиоактивной рекомбинации фотогенерированной дырки с электроном, занимающим кислородную вакансию [1, 8–12].

Известно, что на интенсивность и положение полос фотолюминесценции влияет режим (температура и длительность) тепловой обработки материалов [1, 3–7].

Тепловая обработка (отжиг) материалов, активированных серебром либо серебром и лантаном, приводит к формированию НЧ серебра (НЧ Ag) и НЧ La_2O_3 [1–5]. В такого рода полупроводниковых материалах формирование наночастиц приводит к межфазному взаимодействию между НЧ Ag и НЧ La_2O_3 , к возникновению явления поверхностного плазмонного резонанса (ППР) НЧ Ag [1, 2]. Увеличение концентрации НЧ Ag в материале приводит к агрегации плазмонных частиц и их более тесной упаковке, благодаря чему происходит снижение интенсивности фотолюминесценции и скорости рекомбинации электронно-дырочных пар в процессе переноса заряда из возбужденного состояния в основное состояние, а фотокаталитическая активность материала, наоборот, увеличивается [13, 14].

С учетом вышесказанного представляло интерес исследовать люминесцентные свойства термообработанных композиционных материалов, в которых одновременно присутствует и серебро, и лантан.

В настоящей работе методом люминесцентной спектроскопии проведено исследование композиционных материалов на основе высококремнеземных нанопористых стекол, активированных серебром либо серебром и лантаном, подвергнутых высоко-температурной изотермической выдержке.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись композиционные материалы (КМ) на основе нанопористых высококремнеземных стекол (ПС-8В-НТ-120), активированных серебром либо серебром и лантаном.

Образцы ПС-8В-НТ-120 (средний диаметр пор в диапазоне 3–5 нм, пористость ~30%) состава по анализу, мас. %: 0.30 Na₂O, 3.14 B₂O₃, 0.11 Al₂O₃, 96.45 SiO₂ были получены по методике [15]. Для получения КМ образцы ПС-8В-НТ-120 были пропитаны в водно-солевых растворах AgNO₃ с добавлением или без La(NO₃)₃ (массовое соотношение нитратов в растворе Ag/La составляло 1 : 1 и 10 : 1, далее КМ обозначены как 100Ag, 100Ag/10La, 100Ag/100La) с последующей тепловой обработкой КМ в воздушной атмосфере по специально разработанному температурно-временному режиму с изотермической выдержкой при температуре $T_{т.о} = 800^{\circ}\text{C}$ [16]. При приготовлении растворов для синтеза КМ использовали нитрат серебра AgNO₃ (марка реактива “х. ч.”, 99.9%) и 6-водный нитрат лантана La(NO₃)₃·6H₂O (марка реактива “х. ч.”, 99.0%). По данным химического анализа КМ содержат, мас. %: (0.14–0.20) Na₂O, (0.01–0.05) K₂O, (0.60–0.79) Ag₂O. Содержание серебра и щелочных металлов определяли методом пламенной фотометрии на спектрометре iCE 3000 (Thermo Fisher Scientific). Стандартное квадратичное отклонение для Na₂O составляло 0.2–1.1%, для K₂O – 0.1–0.5%, для Ag₂O – 0.1–0.8%. Исследования КМ 100Ag/10La, 100Ag/100La в сравнении с КМ 100Ag (образцы КМ в форме плоскопараллельных пластин толщиной 1.50 ± 0.15 мм) методом люминесцентной спектроскопии были выполнены при комнатной температуре с помощью спектрофлуориметра RF 6000, SHIMADZU Corp. (источник возбуждения – ксеноновая лампа 150 Вт).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее было установлено, что для ПС-8В-НТ-120 характерна УФ люминесценция с максимумом при $\lambda_{\text{люм}} = 320$ нм (при $\lambda_{\text{возб}} = 250$ нм) [17], которая может быть связана с $=\text{Si}^0$ центрами (электронный переход $S_1 \rightarrow S_0$) [18], а также сине-зеленая люминесценция с максимумом при $\lambda_{\text{люм}} = 450$ нм (при $\lambda_{\text{возб}} = 380$ нм) [19]. Авторы [18, 20, 21] связывают такую люминесценцию с $=\text{Si}^0$ центрами (электронный переход $T_1 \rightarrow S_0$) и с нейтральными вакансиями кислорода $\text{O}_3=\text{Si}-\text{Si}=\text{O}_3$ (the neutral oxygen vacancy, NOV).

Для всех синтезированных КМ характерна ИК люминесценция в области 800–900 нм (с максимумом в диапазоне 850–880 нм (~1.41–1.46 эВ)) вне зависимости от длины волны возбуждения в диапазоне 200–380 нм. На рис. 1 представлены в качестве примера спектры ИК люминесценции для КМ 100Ag при $\lambda_{\text{возб}}$ от 220 до 380 нм. Следует отметить, что у образцов КМ 100Ag с ростом длины волны возбуждения (350, 360, 380 нм) была обнаружена только ИК люминесценция в области 800–900 нм вне зависимости от $\lambda_{\text{возб}}$ (интенсивность ИК люминесценции сохраняется), а люминесценция в диапазоне 380–790 нм для этих образцов не наблюдалась.

На рис. 2 показаны спектры УФ люминесценции для образцов всех синтезированных КМ при $\lambda_{\text{возб}} = 200$ нм. Следует отметить, что интенсивность люминесценции у

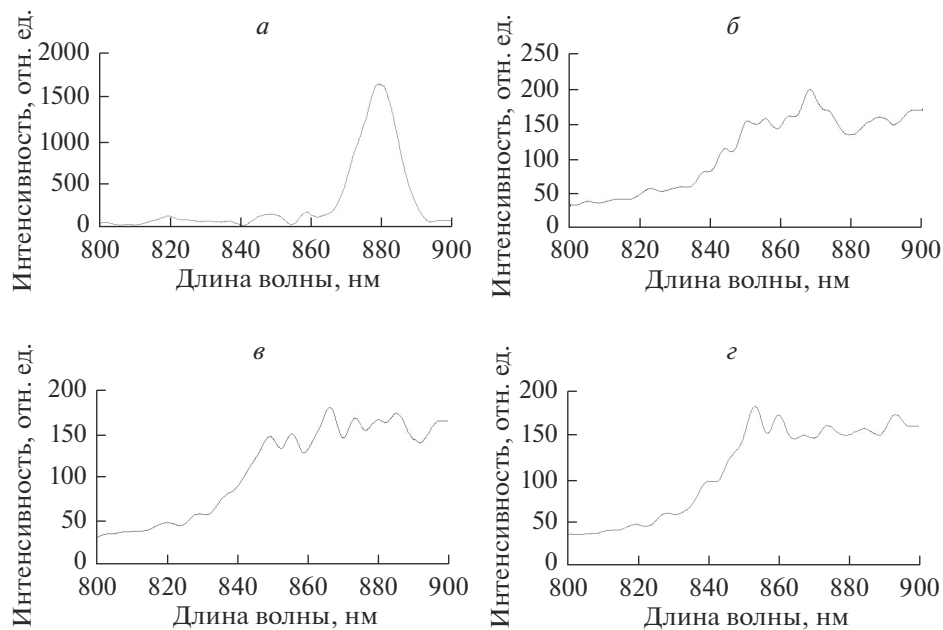


Рис. 1. Спектры ИК люминесценции КМ 100Ag в зависимости от длины волны возбуждения $\lambda_{\text{возб}}$: *a* – 220, *б* – 350, *в* – 360, *г* – 380 нм.

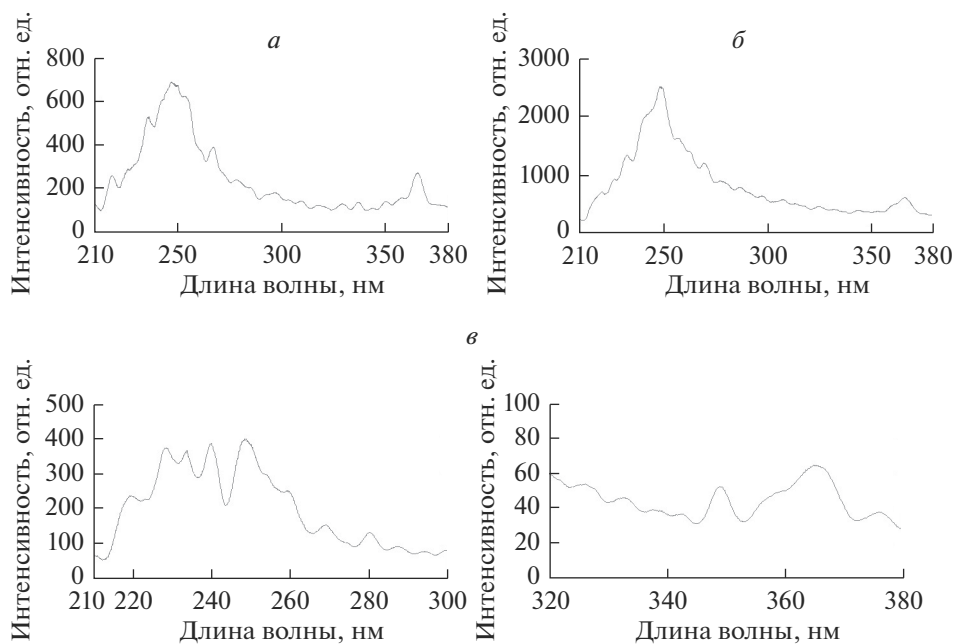


Рис. 2. Спектры УФ люминесценции (при $\lambda_{\text{возб}} = 200$ нм) в зависимости от состава КМ: *a* – 100Ag, *б* – 100Ag/10La, *в* – 100Ag/100La.

КМ 100Ag/10La гораздо выше по сравнению с КМ 100Ag и 100Ag/100La. Для КМ 100Ag характерна широкополосная УФ люминесценция в области 210–270 нм (с максимумами при 218, 235, 247 (основной максимум), 266 нм) и узкая полоса люминесценции с максимумом при 365 нм, а для КМ 100Ag/10La – широкая полоса с максимумом при 249 нм и узкая полоса при 367 нм. Для КМ 100Ag/100La обнаружены узкие полосы УФ люминесценции с максимумами при 220, 228, 233, 240, 248, 260, 270, 280, 350, 365, 375 нм.

Следует отметить, что при $\lambda_{\text{возб}} = 220$ нм (рис. 3) у всех исследованных образцов КМ было отмечено снижение интенсивности полос УФ люминесценции в диапазоне 210–380 нм примерно в 1.3–4.5 раза по сравнению со спектрами, представленным на рис. 2. Форма спектров и положение полос люминесценции при 245 и 366 нм сохраняется только у КМ 100Ag/10La по сравнению со спектром при $\lambda_{\text{возб}} = 200$ нм (рис. 26). Для КМ 100Ag и КМ 100Ag/100La, помимо снижения интенсивности люминесценции при $\lambda_{\text{возб}} = 220$ нм), было установлено следующее. Для КМ 100Ag была обнаружена только одна узкая полоса люминесценции слабой интенсивности с максимумом при 365 нм, а

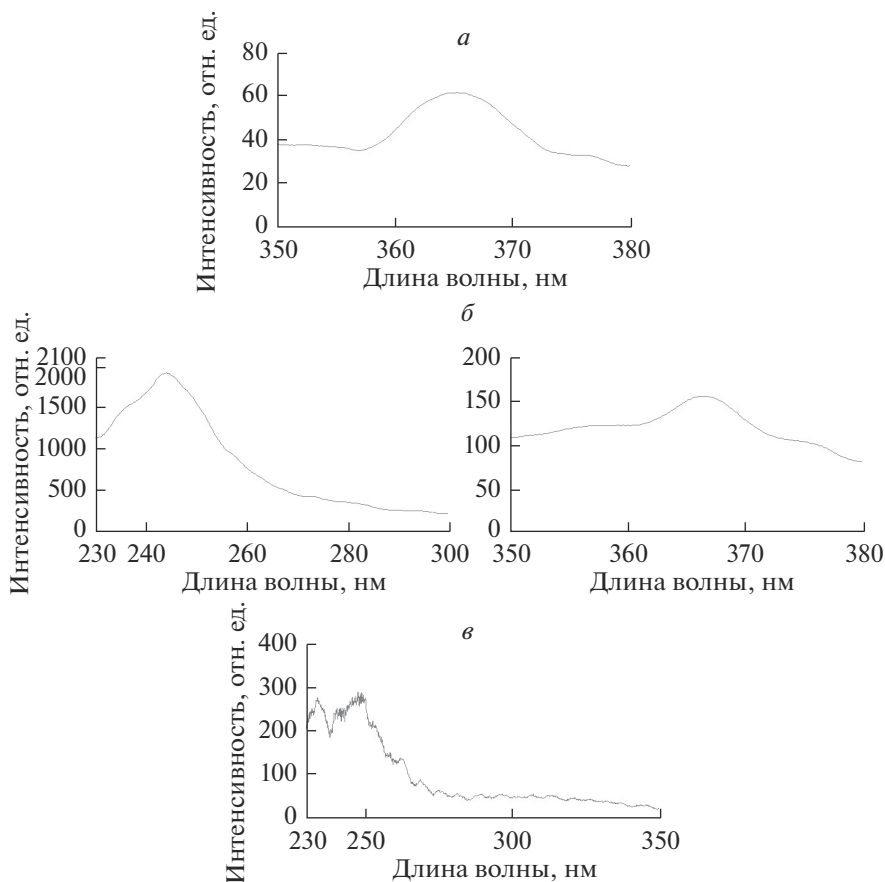


Рис. 3. Спектры УФ люминесценции (при $\lambda_{\text{возб}} = 220$ нм) в зависимости от состава КМ: *a* – 100Ag, *b* – 100Ag/10La, *c* – 100Ag/100La.

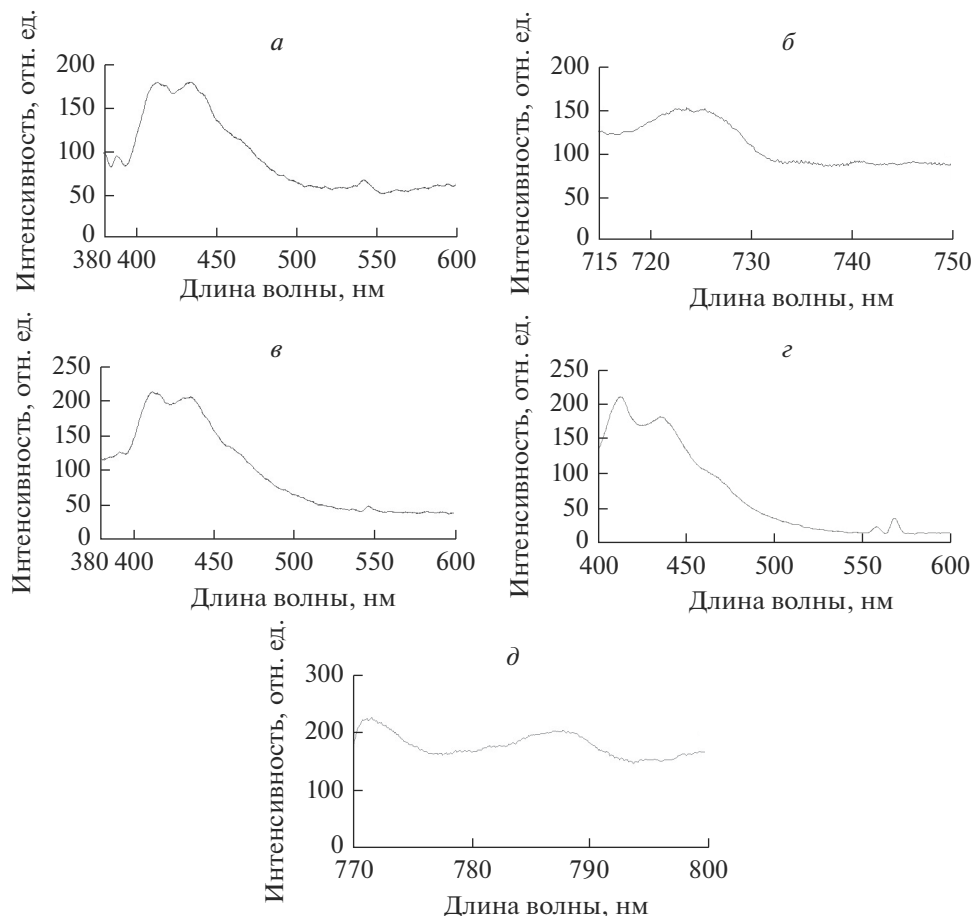


Рис. 4. Спектры люминесценции КМ 100Ag/10La в зависимости от длины волны возбуждения $\lambda_{\text{возб}}$: а, б – 350, в – 360, г, д – 380 нм.

для КМ 100Ag/100La – слабые полосы в диапазоне 230–270 нм с максимумами при 234, 241, 247, 262, 268 нм.

Спектры видимой и ИК люминесценции (в диапазоне 380–810 нм) образцов КМ 100Ag/10La и 100Ag/100La при $\lambda_{\text{возб}} = 350, 360, 380$ нм представлены на рис. 4 и 5.

При $\lambda_{\text{возб}} = 350$ нм (рис. 4а, б) на спектрах люминесценции КМ 100Ag/10La присутствует пять полос видимой люминесценции с максимумами при $\lambda_{\text{люм}} = 389, 413, 435, 542, 725$ нм. При $\lambda_{\text{возб}} = 360$ нм (рис. 4в) на спектре люминесценции КМ 100Ag/10La обнаружена фиолетово-синяя люминесценция ($\lambda_{\text{люм}} = 392, 413, 435$ нм) и зеленая люминесценция ($\lambda_{\text{люм}} = 546$ нм). При $\lambda_{\text{возб}} = 380$ нм на спектре люминесценции КМ 100Ag/10La (рис. 4г, д) видны полосы фиолетово-синей люминесценции ($\lambda_{\text{люм}} = 413, 436$ нм), зеленой люминесценции ($\lambda_{\text{люм}} = 558$ нм), желтой люминесценции ($\lambda_{\text{люм}} = 568$ нм), инфракрасной люминесценции ($\lambda_{\text{люм}} = 771$ и 787 нм). Следует отметить, что в отличие от $\lambda_{\text{возб}} = 350$ нм, при большей длине волны возбуждения ($\lambda_{\text{возб}} = 360$ и 380 нм) красная люминесценция в указанных КМ не обнаружена.

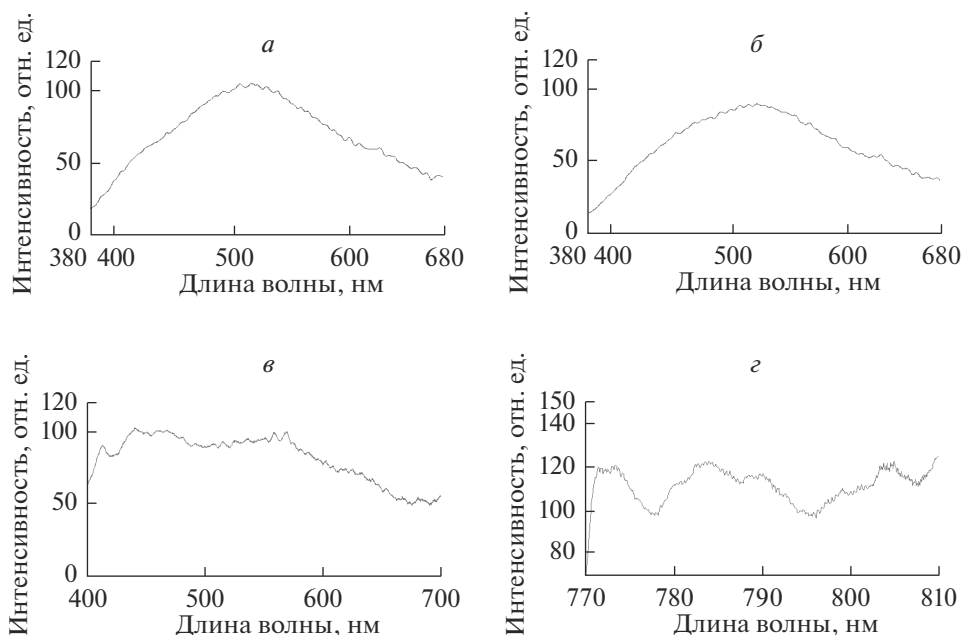


Рис. 5. Спектры люминесценции КМ 100Ag/100La в зависимости от длины волны возбуждения $\lambda_{\text{возб}}$: а – 350, б – 360, в, з – 380 нм.

У КМ 100Ag/100La при $\lambda_{\text{возб}} = 350$ и 360 нм (рис. 5а, б) обнаружена широкополосная люминесценция в диапазоне 380–680 нм с максимумами при $\lambda_{\text{люм}} = 515$ нм и $\lambda_{\text{люм}} = 523$ нм. У КМ 100Ag/100La при $\lambda_{\text{возб}} = 380$ нм (рис. 5в, з) была выявлена фиолетово-синяя ($\lambda_{\text{люм}} = 413, 442, 468$ нм), зелено-желтая ($\lambda_{\text{люм}} = 559, 570$ нм) и ИК люминесценция ($\lambda_{\text{люм}} = 774, 784, 790, 804$ нм) слабой интенсивности.

Рассмотрим возможные причины возникновения люминесценции исследованных материалов.

Обнаруженная у всех синтезированных КМ ИК люминесценция в области 800–900 нм может быть связана с МК и НЧ Ag [4, 22], а также с немостиковыми кислородными дефектами (nonbridging oxygen defects, NBO) [23].

УФ ($\lambda_{\text{люм}} = 350, 365\text{--}367, 375$ нм) и фиолетовая ($\lambda_{\text{люм}} = 389, 392$ нм) люминесценция, возможно, связана с Ag^+ ионами [7, 24, 25]. Возникновение узких полос фиолетово-синей люминесценции ($\lambda_{\text{люм}} = 413, 468$ нм) может быть связано с кислородными вакансиями в La_2O_3 [8, 9]. Кроме того, полосы фиолетово-синей люминесценции при 413, 435, 436, 442 и 468 нм, по всей вероятности, следует отнести к люминесценции МК серебра [6, 7, 26–30]. Обнаруженная зеленая люминесценция ($\lambda_{\text{люм}} = 515, 523, 542, 546, 558$ нм) может быть связана с МК $\text{Ag}_1, \text{Ag}_2, \text{Ag}_3$ и с $\text{Ag}^+ \text{--} \text{Ag}^+$ парами [6, 7, 25, 31]. Появление желтой люминесценции ($\lambda_{\text{люм}} = 568, 570$ нм) и красной люминесценции ($\lambda_{\text{люм}} = 725$ нм) может быть обусловлено люминесценцией МК Ag_3 [6, 31] и НЧ Ag [31]. ИК люминесценция ($\lambda_{\text{люм}} = 771, 774, 784, 787, 790, 804$ нм), скорее всего, возникает из-за НЧ Ag [6, 22].

Обнаруженная УФ люминесценция в области 218–280 нм (~ 4.43 – 5.69 эВ), возможно, относится к различным кремниевым дефектным центрам и кислородным вакансиям в ПС-матрице [32–36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы образцы композиционных материалов на основе матриц из нанопористых высококремнеземных стекол путем их пропитки в водных растворах AgNO_3 без, либо в присутствии $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ с последующей тепловой обработкой в воздушной атмосфере при 800°C .

Установлено, что синтезированные композиционные материалы обладают люминесценцией в широком спектральном диапазоне от УФ до ближней ИК области, благодаря присутствию различных активных центров, включая изолированные Ag^+ ионы, $\text{Ag}^+ - \text{Ag}^+$ пары, молекулярные кластеры и наночастицы серебра, кислородные вакансии в La_2O_3 .

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХС РАН при поддержке Минобрнауки России (Государственная регистрация № 1021050501068-5-1.4.3 (проект FFEM-2022-0004)).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jbeli R., Boukhachem A., Jemaa I.B., Mahdhi N., Saadallah F., Elhouichet H., Alleg S., Amlouk M., Ezzaouia H.* An enhancement of photoluminescence property of Ag doped La_2O_3 thin films at room temperature // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2017. V. 184. № 5. P. 71–81.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.04.072>
2. *Venkataswamy P., Sudheera M., Vaishnavi K., Ramaswamy K., Ravi G., Vithal M.* A New Ag/AgBr/ LaAlO_3 Plasmonic Composite: Synthesis, Characterization, and Visible-Light Driven Photocatalytic Activity // *Journal of Electronic Materials*. 2020. V. 49. № 4. P. 2358–2370.
<https://doi.org/10.1007/s11664-019-07938-5>
3. *Kumar P., Mathpal M.C., Tripathi A.K., Prakash J., Agarwal A., Ahmad M.M., Swart H.C.* Plasmonic resonance of Ag nanoclusters diffused in soda-lime glasses // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2015. V. 17. № 14. P. 8596–8603.
<https://doi.org/10.1039/c4cp05679e>
4. *Lin H., Imakita K., Gui S.C.R., Fujii M.* Near infrared emission from molecule-like silver clusters confined in zeolite A assisted by thermal activation // *Journal of Applied Physics*. 2014. V. 116. P. 013509/1–013509/5.
<https://doi.org/10.1063/1.4886697>
5. *Véron O., Blondeau J.P., Abdelkrim N., Ntsoenzok E.* Luminescence Study of Silver Nanoparticles Obtained by Annealed Ionic Exchange Silicate Glasses // *Plasmonics*. 2010. V. 5. P. 213–219.
<https://doi.org/10.1007/s11468-010-9136-9>
6. *Sgibnev Y.M., Nikonorov N.V., Ignatiev A.I.* High efficient luminescence of silver clusters in ion-exchanged antimony-doped photo-thermo-refractive glasses: Influence of antimony content and heat treatment parameters // *Journal of Luminescence*. 2017. V. 188. P. 172–179.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.04.028>
7. *Dubrovina V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S.* Luminescence of silver molecular clusters in photo-thermo-refractive glasses // *Optical Materials*. 2014. V. 36. № 4. P. 753–759.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2013.11.018>
8. *Hu C., Liu H., Dong W., Zhang Y., Bao G., Lao C., Wang Z.L.* $\text{La}(\text{OH})_3$ and La_2O_3 Nanobelts-Synthesis and Physical Properties // *Advanced Materials*. 2007. V. 19. P. 470–474.
<https://doi.org/10.1002/adma.200601300>
9. *Mu Q., Wang Y.* Synthesis, characterization, shape-preserved transformation, and optical properties of $\text{La}(\text{OH})_3$, $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$, and La_2O_3 nanorods // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011.

- V. 509. № 2. P. 396–401.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.041>
10. Anastasiadou T., Loukatzikou L.A., Costa C.N., Efstathiou A.M. Understanding the Synergistic Catalytic Effect between La_2O_3 and CaO for the CH_4 Lean De- NO_x Reaction: Kinetic and Mechanistic Studies // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2005. V. 109. P. 13693–13703.
<https://doi.org/10.1021/jp0515582>
11. Bilel C., Jbeli R., Jemaa I.B., Dabaki Y., Alzaid M., Saadallah F., Bouaicha M., Amlouk M. Synthesis and physical characterization of Ni-doped La_2O_3 for photocatalytic application under sunlight // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021. V. 32. P. 5415–5426.
<https://doi.org/10.1007/s10854-021-05264-3>
12. Kabir H., Nandyala S.H., Rahman M.M., Kabir M.A., Pikramenou Z., Laver M., Stamboulis A. Polyethylene glycol assisted facile sol-gel synthesis of lanthanum oxide nanoparticles: Structural characterizations and photoluminescence studies // *Ceramics International*. 2019. V. 45. № 1. P. 424–431.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.18>
13. Dal'Toé A.T.O., Colpani G.L., Padoin N., Fiori M.A., Soares C. Lanthanum doped titania decorated with silver plasmonic nanoparticles with enhanced photocatalytic activity under UV-visible light // *Applied Surface Science*. 2018. V. 441. P. 1057–1071.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.291>
14. Kuzman S., Periša J., Đorđević V., Zeković I., Vukoje I., Antić Ž., Dramićanin M.D. Surface Plasmon Enhancement of Eu^{3+} Emission Intensity in LaPO_4/Ag Nanoparticles // *Materials*. 2020. V. 13. P. 3071/1–3071/10.
<https://doi.org/10.3390/ma13143071>
15. Antropova T., Girsova M., Anfimova I., Drozdova I., Polyakova I., Vedishcheva N. Structure and spectral properties of the photochromic quartz-like glasses activated by silver halides // *J. Non-Cryst. Solids*. 2014. V. 401. P. 139–141.
16. Girsova M.A., Golovina G.F., Kurilenko L.N., Anfimova I.N. Infrared Spectroscopy Study of Composite Materials Based on Nanoporous High-Silica Glasses Activated with Silver and Lanthanum Ions // *Glass Physics and Chemistry*. 2021. V. 47. Suppl. 1. P. S36–S40.
<https://doi.org/10.1134/S1087659621070051>
17. Гирцова М.А., Фирстов С.В., Анфимова И.Н., Головина Г.Ф., Куриленко Л.Н., Костырева Т.Г., Полякова И.Г., Антропова Т.В. Высококремнеземные стекла, легированные висмутом // *Физика и химия стекла*. Письма в журнал. 2012. Т. 38. № 6. С. 861–863.
18. Sokolov V.O., Sulimov V.B. Theory of Twofold Coordinated Silicon and Germanium Atoms in Solid Silicon Dioxide // *Phys. Stat. Sol. B*. 1994. V. 186. № 3. P. 185–198.
19. Antropova T.V., Girsova M.A., Anfimova I.N., Drozdova I.A. Spectral properties of the high-silica porous glasses doped by silver halides // *Journal of Luminescence*. 2018. V. 193. P. 29–33.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.09.005>
20. Gong-Ru L., Chung-Jung L., Chi-Kuan L., Li-Jen C., Yu-Lun C. Oxygen defect and Si nanocrystal dependent white-light and near-infrared electroluminescence of Si-implanted and plasma-enhanced chemical-vapor deposition-grown Si-rich SiO_2 // *Journal of Applied Physics*. 2005. V. 97. P. 094306/1–094306/8.
<https://doi.org/10.1063/1.1886274>
21. López J.A., López J.C., Valerdi D.E.V., Salgado G.G., Díaz-Becerril T., Pedraza A.P., Gracia F.J.F. Morphological, compositional, structural, and optical properties of Si-nc embedded in SiO_x films // *Nanoscale Research Letters*. 2012. V. 7. N 1. P. 604/1–604/10.
<https://doi.org/10.1186/1556-276x-7-604>
22. Andolina C.M., Crawford S.E., Smith A.M., Johnston K.A., Straney P.J., Marbella L.E., Tolman N.L., Hochuli T.J., Millstone J.E. Near-Infrared Photoluminescence from Small Copper, Silver, and Gold Nanoparticles // *ChemNanoMat*. 2018. V. 4. № 3. P. 265–268.
<https://doi.org/10.1002/cnma.201700382>
23. Zyubin A.S., Glinka Y.D., Mebel A.M., Lin S.H., Hwang L.P., Chen Y.T. Red and near-infrared photoluminescence from silica-based nanoscale materials: Experimental investigation and quantum-chemical modeling // *The Journal of Chemical Physics*. 2002. V. 116. № 1. P. 281–294.
<https://doi.org/10.1063/1.1425382>
24. Gaft M., Reisfeld R., Panczer G., Boulon G., Saraidarov T., Erlish S. The luminescence of Bi, Ag and Cu in natural and synthetic barite BaSO_4 // *Optical Materials*. 2001. V. 16. № 1–2. P. 279–290.
[https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(00\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(00)00088-4)
25. Belharouak I., Weill F., Parent C., Flem G.L., Moine B. Silver particles in glasses of the “ Ag_2O – ZnO – P_2O_5 ” system // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2001. V. 293–295. P. 649–656.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00843-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00843-2)
26. González B.S., Blanco M.C., López-Quintela M.A. Single step electrochemical synthesis of hydrophilic/hydrophobic Ag_5 and Ag_6 blue luminescent clusters // *Nanoscale*. 2012. V. 4. P. 7632–7635.
<https://doi.org/10.1039/c2nr31994b>
27. Yang J.-S., Zhang M.-M., Han Z., Li H.-Y., Li L.-K., Dong X.-Y., Zang S.-Q., Mak T.C.W. A new silver cluster emitting brightly blue phosphorescence // *Chemical Communications*. 2020. V. 56.

- P. 2451–2454.
<https://doi.org/10.1039/c9cc09439c>
28. *Fares H., Castro T., Orives J.R., Franco D.F., Nalin M.* White light and multicolor emission tuning in Ag nanocluster doped fluorophosphate glasses // *RSC Advances*. 2017. V. 7. P. 44356–44365.
<https://doi.org/10.1039/c7ra08778k>
 29. *Rao T.U.B., Pradeep T.* Luminescent Ag₇ and Ag₈ Clusters by Interfacial Synthesis // *Angewandte Chemie International Edition*. 2010. V. 49. № 23. P. 3925–3929.
<https://doi.org/10.1002/anie.200907120>
 30. *Cai Z.-F., Deng C.-H., Wang J., Zuo Y., Wu J.-I., Wang X.-P., Lv T.-Z., Wang Y.-Y., Feng D.-Y., Zhao J., Zhang C.-F., Zhang J.-M.* Sensitive and selective determination of aloin with highly stable histidine-capped silver nanoclusters based on the inner filter effect // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. V. 627. P. 127224.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127224>
 31. *Klyukin D.A., Dubrovin V.D., Pshenova A.S., Putilin S.E., Shakhverdov T.A., Tsypkin A.N., Nikonov N.V., Sidorov A.I.* Formation of luminescent and nonluminescent silver nanoparticles in silicate glasses by near-infrared femtosecond laser pulses and subsequent thermal treatment: the role of halogenides // *Optical Engineering*. 2016. V. 55. № 6. P. 067101/1–067101/7.
<https://doi.org/10.1117/1.OE.55.6.067101>
 32. *Trukhin A.N., Smits K., Jansons J., Berzins D., Chikvaidze G., Griscom D.L.* UV and yellow luminescence in phosphorus doped crystalline and glassy silicon dioxide // *Journal of Luminescence*. 2015. V. 166. P. 346–355.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.05.045>
 33. *Trukhin A.N., Fitting H.-J.* Investigation of optical and radiation properties of oxygen deficient silica glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1999. V. 248. № 1. P. 49–64.
[https://doi.org/10.1016/s0022-3093\(99\)00089-7](https://doi.org/10.1016/s0022-3093(99)00089-7)
 34. *Trukhin A., Liblik P., Lushchik C., Jansons J.* UV cathodoluminescence of crystalline α -quartz at low temperatures // *Journal of Luminescence*. 2004. V. 109. № 2. P. 103–109.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2004.01.087>
 35. *Зацепин А.Ф.* Статика и динамика возбужденных состояний кислородно-дефицитных центров в SiO₂ // *Физика твердого тела*. 2010. Т. 52. Вып. 6. С. 1104–1114. [*Zatsepin A.F.* Statics and dynamics of excited states of oxygen-deficient centers in SiO₂ // *Physics of the Solid State*. 2010. V. 52. № 6. P. 1176–1187. DOI: 10.1134/s1063783410060107.]
 36. *Skuja L.* Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1998. V. 239. № 1–3. P. 16–48.
[https://doi.org/10.1016/s0022-3093\(98\)00720-0](https://doi.org/10.1016/s0022-3093(98)00720-0)