

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-936-942

УДК 535.343.2: 535.372: 666.22

Спектрально-люминесцентные свойства серебряных кластеров Ag_{1-5} в ионообменном слое силикатного стекла

Владислав Викторович Песняков¹✉, Дмитрий Вячеславович Марасанов²,
Сергей Константинович Евстропьев³, Николай Валентинович Никоноров⁴

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

³ Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

³ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

¹ v.pesnyackoff@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0009-0003-6052-7517>

² dmitriymarasanov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8480-2016>

³ evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

⁴ nikonorov@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

Аннотация

Введение. В работе впервые показана селективность люминесценции молекулярных кластеров серебра в силикатном стекле, сформированных методом ионного обмена из солевого расплава, содержащего 0,1 % $AgNO_3/99,9\%$ $NaNO_3$ мол.%. **Метод.** В исследовании использованы коммерческие силикатные предметные стекла системы: $SiO_2-Na_2O-K_2O-CaO-MgO-Al_2O_3$ с примесями $Fe_2O_3-SO_3$. Молекулярные кластеры были получены методом низкотемпературного ионного обмена в расплаве 0,1 % $AgNO_3/99,9\%$ $NaNO_3$ мол.% в течение 10 и 15 мин при температуре 320 °С. **Основные результаты.** Исследованы люминесцентные свойства серебряных молекулярных кластеров в ионообменном слое предметных стекол. На спектрах люминесценции обнаружены полосы кластеров серебра различного размера (Ag_{1-5}). При этом кластеры Ag_{1-3} возбуждаются излучением с более короткими длинами волн, а кластеры Ag_{4-5} — только излучением дальнего ультрафиолетового диапазона и видимого диапазона с длиной волны до 500 нм. В процессе ионного обмена длительностью до 10 мин выявлено появление селективности люминесценции, которая возникает за счет присутствия в ионообменном слое малой концентрации кластеров различного размера Ag_{1-5} . **Обсуждение.** Полученные результаты могут найти применение при разработке фоточувствительного элемента селективного детектора ультрафиолетового излучения.

Ключевые слова

серебряные молекулярные кластеры, ионный обмен, силикатное стекло, люминесценция, селективность

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00559).

Ссылка для цитирования: Песняков В.В., Марасанов Д.В., Евстропьев С.К., Никоноров Н.В. Спектрально-люминесцентные свойства серебряных кластеров Ag_{1-5} в ионообменном слое силикатного стекла // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 6. С. 936–942. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-936-942

Spectral-luminescent properties of silver clusters Ag_{1-5} in the ion-exchange layer of silicate glass

Vladislav V. Pesnyakov¹, Dmitriy V. Marasanov², Sergey K. Evstropiev³, Nikolay V. Nikonorov⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

³ JVC “RPA Vavilov State Optical Institute”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation

³ Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

¹ v.pesnyackoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6052-7517>

² dmitrymarasanov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8480-2016>

³ evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

⁴ nikonorov@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

Abstract

This work demonstrates for the first time the selectivity of silver molecular clusters luminescence in silicate glass formed by the ion exchange method from a salt melt containing 0.1 mol.% silver nitrate ($AgNO_3$) and 99.9 mol.% sodium nitrate ($NaNO_3$). Commercial silicate microscope slides of the following system were used: $SiO_2-Na_2O-K_2O-CaO-MgO-Al_2O_3$ with $Fe_2O_3-SO_3$ impurities. Molecular clusters were obtained by low-temperature ion exchange in a melt of 0.1 % $AgNO_3/99.9$ % $NaNO_3$ mol.% for 10 and 15 min at 320 °C. The luminescent properties of silver molecular clusters in the ion-exchange layer of microscope slides were studied. Bands of silver clusters of different sizes (Ag_{1-5}) were found in the luminescence spectra. In this case, clusters Ag_{1-3} are excited by shorter wavelengths, and clusters Ag_{4-5} only by far ultraviolet and visible radiation up to 500 nm. In the process of ion exchange lasting up to 10 minutes, the appearance of luminescence selectivity was revealed, which occurs due to the presence of a low concentration of silver clusters of different sizes Ag_{1-5} in the ion-exchange layer. The obtained results can be used in the development of a photosensitive element for a selective ultraviolet radiation detector.

Keywords

silver clusters, ion exchange, silicate glass, luminescence, selectivity

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 20-19-00559).

For citation: Pesnyakov V.V., Marasanov D.V., Evstropiev S.K., Nikonorov N.V. Spectral-luminescent properties of silver clusters Ag_{1-5} in the ion-exchange layer of silicate glass. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 6, pp. 936–942 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-936-942

Введение

Ионообменная обработка стекла широко используется на практике для упрочнения (механического, термического, оптического) или окрашивания стеклянных изделий [1–3], формирования волноводных слоев [4, 5], элементов градиентной оптики [6, 7] и создания различных сенсоров [7–9]. При ионном обмене применяется замещение щелочных ионов стекла (например, натрия) на одновалентные ионы из расплава солей (например, серебра, калия, рубидия, цезия) или специальных паст, предварительно наносимых на поверхность стекла [10, 11].

Особый интерес представляет низкотемпературный ионный обмен ионов натрия в стекле на ионы серебра из расплава соли. Такой обмен позволяет:

- получить в приповерхностном слое стекла высокую концентрацию серебра (до 20–30 мол.%), которую невозможно получить при высокотемпературном синтезе силикатного стекла из шихтных компонент (обычно это единицы процентов) [11–13];
- управлять концентрацией ионов серебра в поверхностном слое стекла за счет состава солевой ванны, температуры и времени ионного обмена;
- формировать не только ионы серебра в поверхностном слое, но и серебряные молекулярные кластеры и металлические наночастицы за счет восстановительных процессов (термообработка) или добавок (например, железа, церия и т. д.);

— управлять концентрацией и размерами серебряных молекулярных кластеров и металлических наночастиц.

На сегодняшний день серебряные молекулярные кластеры и серебряные металлические наночастицы в стекле представляют практический интерес, поскольку на их основе возможно создание люминофоров белого свечения для светодиодной техники [14], люминесцентных датчиков температуры [15] и ультрафиолетового (УФ) излучения [16], фотокатализаторов для разложения воды на кислород и водород [17], а также химических и биологических датчиков на основе усиленного рамановского рассеяния [18, 19].

Существует большое количество научных работ, посвященных технологиям получения и изучению молекулярных кластеров. При этом мало работ, направленных на изучение спектрально-люминесцентных свойств серебряных молекулярных кластеров, особенно когда в ионообменном слое кластеры могут присутствовать разного размера и разного вида. Отметим, что при ионном обмене концентрация серебряных молекулярных кластеров и их размер может меняться не только от температуры и длительности ионного обмена, а также и по глубине диффузионного слоя. В связи с этим разные длины волн УФ возбуждения кластеров должны возбуждать разные типы кластеров, которые будут люминесцировать в разных спектральных диапазонах. Таким образом, различие в спектрах люминесценции серебряных молекулярных кластеров

может иметь практическое применение для получения информации о спектральном диапазоне возбуждающего УФ излучения. В результате появляется возможность не просто создания датчиков УФ излучения, а разработка селективных УФ датчиков, в которых по положению спектров люминесценции можно определять длину волны (или спектральный диапазон) возбуждающего УФ излучения и проводить градуацию УФ излучения (например, УФ-А = 320–400 нм, УФ-В = 280–320 нм, УФ-С = 100–280 нм).

Целью настоящей работы стало исследование спектрально-люминесцентных свойств серебряных молекулярных кластеров, полученных ионным обменом в силикатном стекле, при разных длинах волн возбуждения.

Материалы и методы

В работе использовались коммерческие силикатные стекла системы $73,04SiO_2-14,3Na_2O-0,29K_2O-7,21CaO-3,72MgO-1,3Al_2O_3$ (вес.%) с незначительными примесями $0,13Fe_2O_3-0,01SO_3$ (вес.%). Пластины помещались в расплав 0,1 % $AgNO_3/99,9$ % $NaNO_3$ мол.% на 10 и 15 мин при температуре 320 °С, после чего в образцах образовывался ионообменный серебросодержащий слой из нанокластеров, наночастиц и ионов серебра. Спектры люминесценции были получены на флуориметре Perkin Elmer LS50B, а спектры поглощения на спектрофотометре Lambda 650 (Perkin Elmer) в диапазоне длин волн 200–600 нм.

В работах [20, 21] сообщено о наличии у молекулярных кластеров серебра нано- и микросекундной люминесценции. Исходя из этого, используются измерения люминесценции с временным разрешением, чтобы разделить полный спектр на компоненты с разным временем жизни. Для получения полного спектра люминесценции применяется время накопления сигнала 5 мс. За это время происходит сбор всего излучения от образца после импульсного возбуждения. Частота следования импульсов составляла 10 Гц, которая обеспечивала полное затухание излучения между импульсами. Используя раствор родамина 6G в качестве эталона наносекундного излучения, определено время задержки сигнала, после которого возможны измерения микросекундной люминесценции, так как люминесценция родамина 6G исчезает. Время задержки сигнала составило 40 мкс. При измерении люминесценции после времени задержки часть сигнала флуоресценции теряется, поэтому красный край люминесценции домножался на коэффициент, при котором он совпадал с красным краем полного спектра. Спектр флуоресценции был получен путем вычитания из общего спектра люминесценции спектр флуоресценции.

Результаты

В начале выполненного исследования были получены спектры поглощения образцов при различных длительностях ионного обмена. На рис. 1 представлен разностный спектр поглощения исходного стекла и образцов после 10 и 15 мин обработки в солевом расплаве.

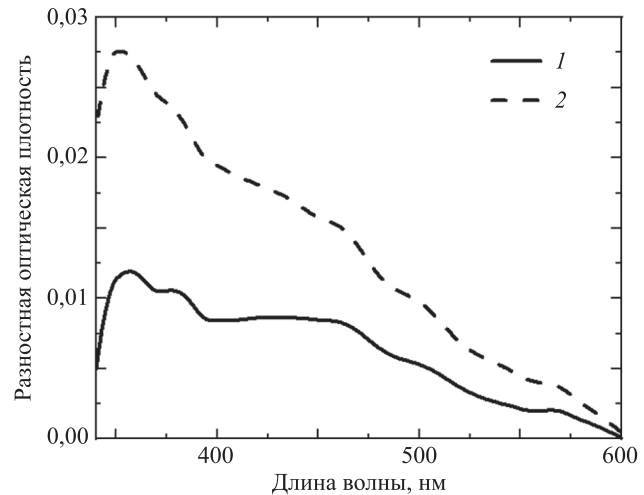


Рис. 1. Разностный спектр поглощения исходного стекла и образцов стекла после 10 мин (кривая 1) и 15 мин (кривая 2) ионного обмена в расплаве 0,1 % $AgNO_3/99,9$ % $NaNO_3$ мол.% при температуре 320 °С

Fig. 1. Difference absorption spectrum of the original glass and glass samples after 10 and 15 minutes of ion exchange in a melt of 0.1 % $AgNO_3/99,9$ % $NaNO_3$ mol.% at a temperature of 320 °С

На спектрах заметен пик поглощения, расположенный на 350 нм с пологим длинноволновым хвостом, который появляется из-за кластеров разного размера, поглощающих на разных длинах волн. Можно заметить, что при увеличении длительности ионного обмена с 10 до 15 мин происходит увеличение поглощения в данной области, что свидетельствует о росте концентрации кластеров серебра в ионообменном слое [22].

Как было рассмотрено в разделе «Материал и методы», люминесценция серебряных кластеров при большой их концентрации представляет собой широкополосную суммарную люминесценцию кластеров различного размера в видимом спектральном диапазоне. В настоящей работе при используемых параметрах ионного обмена получение большого количества серебряных кластеров разных типов не представляется возможным. По этой причине люминесценция, полученная у исследуемых образцов и показанная на рис. 2, является отдельным набором полос.

Из рис. 2 видно, что достаточно узкие полосы люминесценции соответствуют определенной длине волны возбуждения. Например, при возбуждении длиной волны 250 нм пик люминесценции расположен на 356 нм для образца после 10 мин ионного обмена, и на 346 нм для образца после 15 мин ионного обмена. Известно, что кластеры серебра Ag_{4-5} имеют более длинноволновую люминесценцию при возбуждении видимым диапазоном. В то же время при возбуждении кластеров Ag_{1-3} на длине волны 250 нм, их люминесценция перекрывается поглощением кластеров Ag_{4-5} . В этом случае можно предположить наличие переноса энергии или переизлучения света между поглощающими УФ излучение кластерами Ag_{1-3} и Ag_{4-5} , излучающими в красной области спектра. В связи с чем на спектре люминесценции (рис. 2) показано, что при

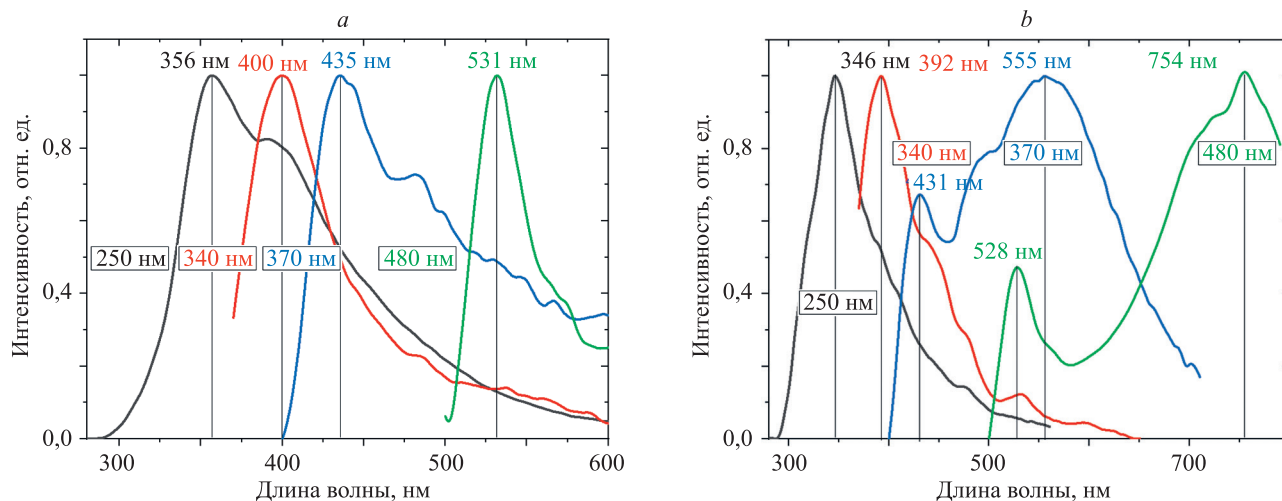


Рис. 2. Нормированные спектры люминесценции образцов стекла после ионного обмена в расплаве 0,1 % $\text{AgNO}_3/99,9\%$ NaNO_3 мол.% при температуре 320 °С длительностью 10 мин (а) и 15 мин (б) при длинах волн возбуждения: 250 нм, 340 нм, 370 нм и 480 нм

Fig. 2. Normalized luminescence spectra of glass samples after ion exchange in 0.1 % $\text{AgNO}_3/99,9\%$ NaNO_3 mol.% melt at 320 °С for 10 min (a), 15 min (b). Excitation wavelengths: 250 nm, 340 nm, 370 nm and 480 nm

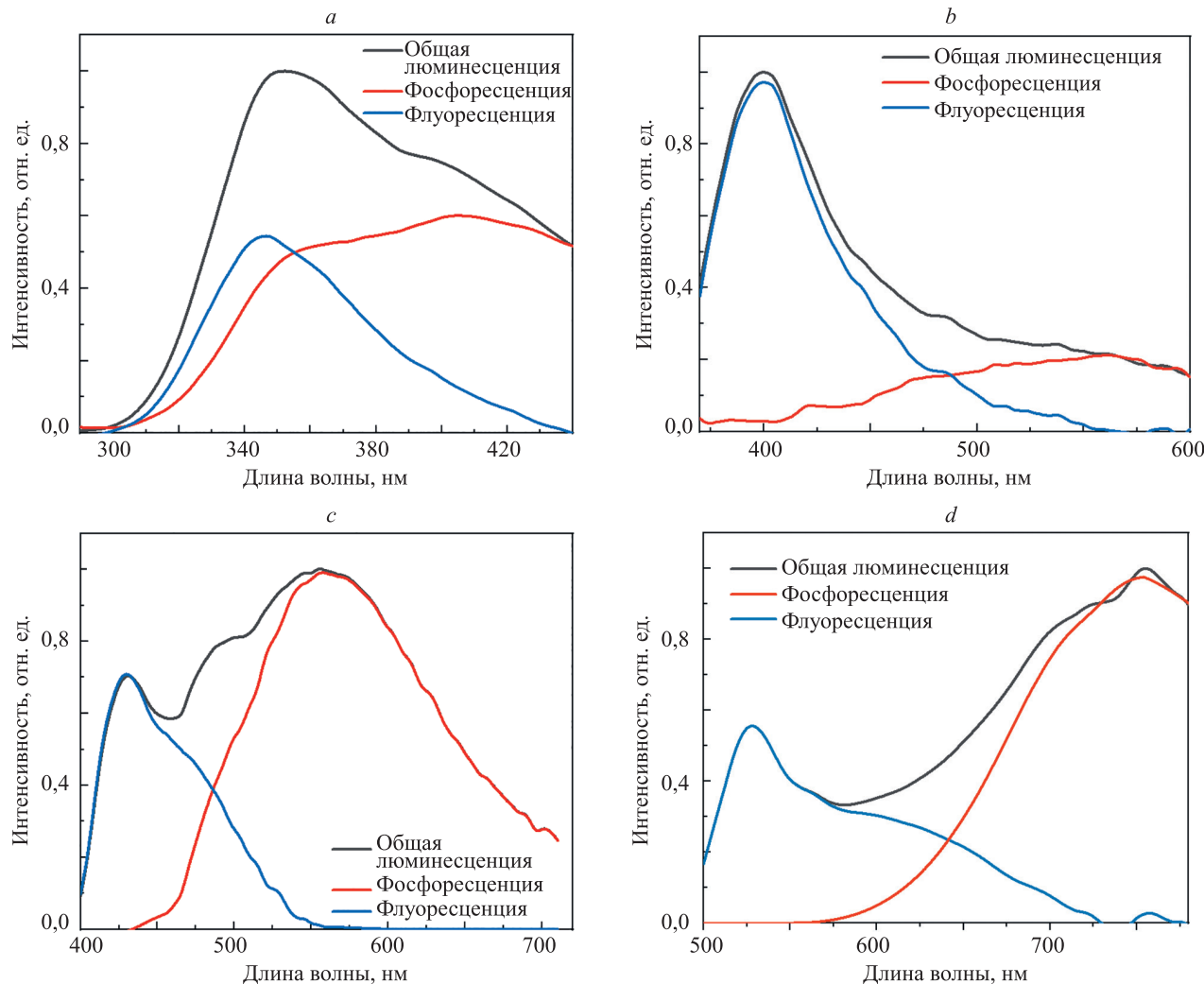


Рис. 3. Разложение люминесценции на фосфоресценцию и флуоресценцию образцов стекла после ионного обмена длительностью 15 мин при разных длинах волн возбуждения: 250 нм (а), 340 нм (б), 370 нм (с) и 480 нм (д)

Fig. 3. Luminescence decomposition into phosphorescence and fluorescence of glass samples after ion exchange lasting 15 min at different excitation wavelengths: 250 nm (a), 340 nm (b), 370 nm (c), and 480 nm (d)

возбуждению на длине волны 250 нм люминесценция более широкая. При возбуждении более длинноволновым излучением наблюдается только люминесценция кластеров Ag₄₋₅.

Также существует другая точка зрения, что люминесценция кластеров обладает двумя время-разрешенными компонентами, связанными с синглет-синглетным (переход S₁-S₀) и триплет-синглетными (T₁-S₀) переходами с нано- и микросекундной люминесценциями [20, 21]. При большей концентрации кластеров серебра электроны более вероятно переходят с S₁ уровня на уровень T₁ с помощью интеркомбинационной конверсии. На рис. 3 показаны спектры полной люминесценции, а также компоненты флуоресценции и фосфоресценции для образца после ионного обмена длительностью 15 мин.

В результате наблюдается наличие фосфоресценции, т. е. микросекундной компоненты, которая отчетливо видна у образцов после ионного обмена длительностью 15 мин при возбуждении на длинах волн 370 и 480 нм и, которая смещена относительно флуоресценции (наносекундной компоненты) в длинноволновую часть спектра. При возбуждении на длинах волн 250 и 340 нм флуоресценция превышает фосфоресценцию в общем спектре люминесценции в связи с малой концентрацией кластеров серебра Ag₄₋₅. Отметим, что при длине волны возбуждения 250 нм интенсивность флуоресценции и фосфоресценции равны, так как при таком возбуждении люминесцируют не только кластеры серебра, но и ионы серебра, и исключить их вклад как из общей люминесценции, так и флуоресценции или фосфоресценции не представляется возможным. При этом на длине волны 340 нм фосфоресценция вносит минимальный вклад в общую люминесценцию, а в основном наблюдается флуоресценция с пиком 392 нм. При дальнейшем увеличении длины волны возбуждающего излучения происходит изменение соотношений интенсивностей пиков флуоресценции и фосфоресценции с преобладанием последней. В образцах после

ионного обмена длительностью 10 мин преобладание флуоресценции выявлялось при всех длинах волн возбуждения.

Как показано на рис. 2, спектры люминесценции исследуемых образцов зависят от длины волны возбуждающего излучения. Это объясняется тем, что различные серебряные кластеры в стекле возбуждаются разными длинами волн. Более короткие длины волн возбуждают молекулярные кластеры Ag₁₋₃, в то время как более длинноволновая часть спектра — Ag₄₋₅. Таким образом, происходит селективное возбуждение молекулярных кластеров в стекле. Отметим, что для создания фоточувствительного элемента для селективного датчика УФ излучения на основе полученных результатов более подходит образец длительностью ионного обмена 10 мин в связи с преобладанием флуоресценции у молекулярных кластеров серебра. При дальнейшем увеличении длительности ионного обмена люминесценция становится ближе к белой и отличить длину волны становится сложнее.

Заключение

В работе исследованы серебряные кластеры, сформированные после ионного обмена в течение 10 и 15 мин в предметных стеклах. Полученные спектры поглощения и люминесценции свидетельствуют о формировании кластеров серебра различного размера (Ag₁₋₅). При этом кластеры Ag₁₋₃ возбуждаются более короткими длинами волн (УФ-С и УФ-В), а кластеры Ag₄₋₅ только диапазонами УФ-А и видимым до 500 нм. Вместе с тем, ограничивая длительность ионного обмена до 10 мин, спектры люминесценции представляют собой отдельные полосы, спектрально разделенные от люминесценции при возбуждении на других длинах волн. Данную особенность полученных стекол можно использовать в качестве фоточувствительного элемента для селективного детектора ультрафиолетового излучения.

Литература

1. Gy R. Ion exchange for glass strengthening // *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. 2008. V. 149. N 2. P. 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.11.029>
2. Guldiren D., Erdem İ., Aydin S. Influence of silver and potassium ion exchange on physical and mechanical properties of soda lime glass // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2016. V. 441. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.03.007>
3. Jiang X., Lin X., Li C., Pang M., Liu L., Yu Y., Wang Z., Luo Y., Lu A., Bai Z. Effect of potassium and silver ion-exchange on the strengthening effect and properties of aluminosilicate glass // *Ceramics International*. 2023. V. 49. N 19. P. 31351–31363. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.083>
4. Fares H., Santos S.N.C., Santos M.V., Franco D.F., Souza A.E., Manzani D., Mendonça C.R., Nalin M. Highly luminescent silver nanocluster-doped fluorophosphate glasses for microfabrication of 3D waveguides // *RSC Advances*. 2017. V. 7. N 88. P. 55935–55944. <https://doi.org/10.1039/c7ra11792b>
5. de Castro T., Fares H., Khalil A.A., Laberdesque R., Petit Y., Strutinski C., Danto S., Jubera V., Ribeiro S.J.L., Nalin M., Cardinal T., Canioni L. Femtosecond laser micro-patterning of optical properties and functionalities in novel photosensitive silver-containing

References

1. Gy R. Ion exchange for glass strengthening. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 2008, vol. 149, no. 2, pp. 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.11.029>
2. Guldiren D., Erdem İ., Aydin S. Influence of silver and potassium ion exchange on physical and mechanical properties of soda lime glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016, vol. 441, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.03.007>
3. Jiang X., Lin X., Li C., Pang M., Liu L., Yu Y., Wang Z., Luo Y., Lu A., Bai Z. Effect of potassium and silver ion-exchange on the strengthening effect and properties of aluminosilicate glass. *Ceramics International*, 2023, vol. 49, no. 19, pp. 31351–31363. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.083>
4. Fares H., Santos S.N.C., Santos M.V., Franco D.F., Souza A.E., Manzani D., Mendonça C.R., Nalin M. Highly luminescent silver nanocluster-doped fluorophosphate glasses for microfabrication of 3D waveguides. *RSC Advances*, 2017, vol. 7, no. 88, pp. 55935–55944. <https://doi.org/10.1039/c7ra11792b>
5. de Castro T., Fares H., Khalil A.A., Laberdesque R., Petit Y., Strutinski C., Danto S., Jubera V., Ribeiro S.J.L., Nalin M., Cardinal T., Canioni L. Femtosecond laser micro-patterning of optical properties and functionalities in novel photosensitive silver-containing

- fluorophosphate glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019. V. 517. P. 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.04.012>
6. Broquin J.-E., Honkanen S. Integrated photonics on glass: A review of the ion-exchange technology achievements // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. N 10. P. 4472. <https://doi.org/10.3390/app11104472>
 7. Gut K., Blahut M. Influence of ion exchange process parameters on broadband differential interference // *Sensors*. 2023. V. 23. N 13. P. 6092. <https://doi.org/10.3390/s23136092>
 8. Dong X., Si Y., Yang J., Zhang C., Han Z., Luo P., Wang Z., Zang S., Mak T.C.W. Ligand engineering to achieve enhanced ratiometric oxygen sensing in a silver cluster-based metal-organic framework // *Nature Communications*. 2020. V. 11. N 1. P. 3678. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17200-w>
 9. Qian S., Wang Z., Zuo Z., Wang X., Wang Q., Yuan X. Engineering luminescent metal nanoclusters for sensing applications // *Coordination Chemistry Reviews*. 2022. V. 451. P. 214268. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214268>
 10. Yanic M.C.Ö., Sargüzel M., Öztürk Y., Günay E. An investigation of nanometal-glass hybrid nanocomposites produced by ion exchange and annealing process // *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2017. V. 53. N 1. P. 193–206. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0025-y>
 11. Zhao J., Yang Z., Yu C., Qiu J., Song Z. Preparation of ultra-small molecule-like Ag nano-clusters in silicate glass based on ion-exchange process: Energy transfer investigation from molecule-like Ag nano-clusters to Eu³⁺ ions // *Chemical Engineering Journal*. 2018. V. 341. P. 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.028>
 12. Li L., Yang Y., Zhou D., Yang Z., Xu X., Qiu J. Influence of the Eu²⁺ on the silver aggregates formation in Ag⁺-Na⁺ ion-exchanged Eu³⁺-doped sodium–aluminosilicate glasses // *Journal of the American Ceramic Society*. 2014. V. 97. N 4. P. 1110–1114. <https://doi.org/10.1111/jace.12745>
 13. Li L., Yang Y., Zhou D., Yang Z., Xu X., Qiu J. Investigation of the role of silver species on spectroscopic features of Sm³⁺-activated sodium–aluminosilicate glasses via Ag⁺-Na⁺ ion exchange // *Journal of Applied Physics*. 2013. V. 113. N 19. P. 193103. <https://doi.org/10.1063/1.4807313>
 14. Samuel A.B., Ravi Kanth Kumar V.V. Role of silver on the photoluminescence and structural studies of sodium antimony zinc borate glass // *Journal of Materials Science*. 2023. V. 58. N 26. P. 10660–10676. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08684-0>
 15. Agafonova D.S., Egorov V.I., Ignat'ev A.I., Sidorov A.I. The effect of temperature on the luminescence of molecular clusters of silver in photothermorefractive glasses // *Journal of Optical Technology*. 2013. V. 80. N 8. P. 506–509. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000506>
 16. Chernakov D.I., Sidorov A.I. UV radiation dosimeter with double spectral conversion // *Optics and Spectroscopy*. 2017. V. 122. N 3. P. 416–419. <https://doi.org/10.1134/S0030400X17030067>
 17. Liu L., Corma A. Metal catalysts for heterogeneous catalysis: from single atoms to nanoclusters and nanoparticles // *Chemical Reviews*. 2018. V. 118. N 10. P. 4981–5079. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00776>
 18. Manikandan P., Manikandan D., Manikandan E., Ferdinand C.A. Surface enhanced Raman scattering (SERS) of silver ions embedded nanocomposite glass // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2014. V. 124. P. 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.01.033>
 19. Eremina O.E., Sergeeva E.A., Ferree M.V., Shekhovtsova T.N., Goodilin E.A., Veselova I.A. Dual-purpose SERS sensor for selective determination of polycyclic aromatic compounds via electron donor–acceptor traps // *ACS Sensors*. 2021. V. 6. N 3. P. 1057–1066. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c02294>
 20. Velázquez J.J., Tikhomirov V.K., Chibotaru L.F., Cuong N.T., Kuznetsov A.S., Rodríguez V.D., Nguyen M.T., Moshchalkov V.V. Energy level diagram and kinetics of luminescence of Ag nanoclusters dispersed in a glass host // *Optics Express*. 2012. V. 20. N 12. P. 13582–13591. <https://doi.org/10.1364/OE.20.013582>
 21. Amaro A.A., da Silva Mattos G.R., de Morais Nishimura M.V., Dipold J., Wetter N.U., Kassab L.R.P. Silver nanoclusters tunable visible emission and energy transfer to Yb³⁺ ions in co-doped GeO₂-PbO glasses for photonic applications // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. N 7. P. 1177. <https://doi.org/10.3390/nano13071177>
 22. Stolyarchuk M.V., Sidorov A.I. Electronic absorption spectra of neutral and charged silver molecular clusters // *Optics and Spectroscopy*. 2018. V. 125. N 3. P. 305–310. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18090229>
- fluorophosphate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, vol. 517, pp. 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.04.012>
6. Broquin J.-E., Honkanen S. Integrated photonics on glass: A review of the ion-exchange technology achievements. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 10, pp. 4472. <https://doi.org/10.3390/app11104472>
 7. Gut K., Blahut M. Influence of ion exchange process parameters on broadband differential interference. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 13, pp. 6092. <https://doi.org/10.3390/s23136092>
 8. Dong X., Si Y., Yang J., Zhang C., Han Z., Luo P., Wang Z., Zang S., Mak T.C.W. Ligand engineering to achieve enhanced ratiometric oxygen sensing in a silver cluster-based metal-organic framework. *Nature Communications*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 3678. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17200-w>
 9. Qian S., Wang Z., Zuo Z., Wang X., Wang Q., Yuan X. Engineering luminescent metal nanoclusters for sensing applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 2022, vol. 451, pp. 214268. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214268>
 10. Yanic M.C.Ö., Sargüzel M., Öztürk Y., Günay E. An investigation of nanometal-glass hybrid nanocomposites produced by ion exchange and annealing process. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 193–206. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0025-y>
 11. Zhao J., Yang Z., Yu C., Qiu J., Song Z. Preparation of ultra-small molecule-like Ag nano-clusters in silicate glass based on ion-exchange process: Energy transfer investigation from molecule-like Ag nano-clusters to Eu³⁺ ions. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 341, pp. 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.028>
 12. Li L., Yang Y., Zhou D., Yang Z., Xu X., Qiu J. Influence of the Eu²⁺ on the silver aggregates formation in Ag⁺-Na⁺ ion-exchanged Eu³⁺-doped sodium–aluminosilicate glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, vol. 97, no. 4, pp. 1110–1114. <https://doi.org/10.1111/jace.12745>
 13. Li L., Yang Y., Zhou D., Yang Z., Xu X., Qiu J. Investigation of the role of silver species on spectroscopic features of Sm³⁺-activated sodium–aluminosilicate glasses via Ag⁺-Na⁺ ion exchange. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 19, pp. 193103. <https://doi.org/10.1063/1.4807313>
 14. Samuel A.B., Ravi Kanth Kumar V.V. Role of silver on the photoluminescence and structural studies of sodium antimony zinc borate glass. *Journal of Materials Science*, 2023, vol. 58, no. 26, pp. 10660–10676. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08684-0>
 15. Agafonova D.S., Egorov V.I., Ignat'ev A.I., Sidorov A.I. The effect of temperature on the luminescence of molecular clusters of silver in photothermorefractive glasses. *Journal of Optical Technology*, 2013, vol. 80, no. 8, pp. 506–509. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000506>
 16. Chernakov D.I., Sidorov A.I. UV radiation dosimeter with double spectral conversion. *Optics and Spectroscopy*, 2017, vol. 122, no. 3, pp. 416–419. <https://doi.org/10.1134/S0030400X17030067>
 17. Liu L., Corma A. Metal catalysts for heterogeneous catalysis: from single atoms to nanoclusters and nanoparticles. *Chemical Reviews*, 2018, vol. 118, no. 10, pp. 4981–5079. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00776>
 18. Manikandan P., Manikandan D., Manikandan E., Ferdinand C.A. Surface enhanced Raman scattering (SERS) of silver ions embedded nanocomposite glass. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, vol. 124, pp. 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.01.033>
 19. Eremina O.E., Sergeeva E.A., Ferree M.V., Shekhovtsova T.N., Goodilin E.A., Veselova I.A. Dual-purpose SERS sensor for selective determination of polycyclic aromatic compounds via electron donor–acceptor traps. *ACS Sensors*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 1057–1066. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c02294>
 20. Velázquez J.J., Tikhomirov V.K., Chibotaru L.F., Cuong N.T., Kuznetsov A.S., Rodríguez V.D., Nguyen M.T., Moshchalkov V.V. Energy level diagram and kinetics of luminescence of Ag nanoclusters dispersed in a glass host. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 12, pp. 13582–13591. <https://doi.org/10.1364/OE.20.013582>
 21. Amaro A.A., da Silva Mattos G.R., de Morais Nishimura M.V., Dipold J., Wetter N.U., Kassab L.R.P. Silver nanoclusters tunable visible emission and energy transfer to Yb³⁺ ions in co-doped GeO₂-PbO glasses for photonic applications. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, no. 7, pp. 1177. <https://doi.org/10.3390/nano13071177>
 22. Stolyarchuk M.V., Sidorov A.I. Electronic absorption spectra of neutral and charged silver molecular clusters. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 125, no. 3, pp. 305–310. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18090229>

Авторы

Песняков Владислав Викторович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57221338366](https://orcid.org/0009-0003-6052-7517), [https://orcid.org/0009-0003-6052-7517, v.pesnyackoff@yandex.ru](mailto:v.pesnyackoff@yandex.ru)

Марасанов Дмитрий Вячеславович — кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195673419](https://orcid.org/0000-0001-8480-2016), <https://orcid.org/0000-0001-8480-2016>, dmitrymarasanov@bk.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 11.09.2024
Одобрена после рецензирования 03.10.2024
Принята к печати 22.11.2024

Aurhors

Vladislav V. Pesnyakov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57221338366](https://orcid.org/0009-0003-6052-7517), <https://orcid.org/0009-0003-6052-7517>, v.pesnyackoff@yandex.ru

Dmitriy V. Marasanov — PhD (Physics & Mathematics), Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195673419](https://orcid.org/0000-0001-8480-2016), <https://orcid.org/0000-0001-8480-2016>, dmitrymarasanov@bk.ru

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

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

Received 11.09.2024
Approved after reviewing 03.10.2024
Accepted 22.11.2024



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»