Физическое материаловедение

Обзорная статья
УДК 538.9 + 538.975
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19210

ПЛАЗМОННЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ МЕТОДОМ ИОННОГО ОБМЕНА В СТЕКЛЕ: СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

В. В. Журихина [1, 2] ✉, Е. С. Бабич [2], А. Н. Терпицкий [2], И. Нуритдинов [3], М. А. Рахматов [4], А. А. Эшбеков [4]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;

[2] Академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

[3] Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан;

[4] Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова, г. Самарканд, Республика Узбекистан

✉ zhurihina_vv@spbstu.ru

Аннотация. Плазмонные материалы на основе наноструктур благородных металлов обладают уникальными оптическими свойствами в видимом диапазоне. В настоящее время плазмоны, которые поддерживаются металлическими наночастицами или распространяются вдоль металлических интерфейсов, привлекают все большее внимание в сенсорике, медицине, визуализации, нанофотонных и оптоэлектронных технологиях. В статье представлен краткий обзор двух основных плазмонных мод: поверхностных плазмонных поляритонов на металлических интерфейсах и локализованных плазмонов в наноструктурах, а также физических основ плазмонно-усиленных датчиков, таких как колориметрические сенсоры, сенсоры на основе плазмонно-усиленной флуоресценции и сенсоры на основе гигантского комбинационного рассеяния. Такие датчики широко используются в здравоохранении, безопасности, пищевой промышленности и мониторинге окружающей среды. Рассмотрено получение плазмонных наноструктур в стеклах методом ионного обмена и их применение для детектирования химических соединений и биообъектов.

Ключевые слова: локализация световой волны, наноструктура, ионный обмен, плазмон, усиление электромагнитного поля, сенсор

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSRM-2026-0005).

Для цитирования: Журихина В. В., Бабич Е. С., Терпицкий А. Н., Нуритдинов И., Рахматов М. А., Эшбеков А. А. Плазмонные наноматериалы, формируемые методом ионного обмена в стекле: свойства и применение // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 2. С. 107–135. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19210

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Журихина В. В., Бабич Е. С., Терпицкий А. Н., Нуритдинов И., Рахматов М. А., Эшбеков А. А., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Overview article
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19210

PLASMONIC NANOMATERIALS FORMED BY ION EXCHANGE IN GLASS: PROPERTIES AND APPLICATIONS

V. V. Zhurikhina [1, 2] ✉, E. S. Babich [2], A. N. Terpitskiy [2], I. Nuritdinov [3], M. A. Rakhmatov [4], A. A. Eshbekov [4]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

[2] Alferov University, RAS, St. Petersburg, Russia;

[3] Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan;

[4] Sharof Rashidov Samarkand State University, Samarkand, Republic of Uzbekistan

✉ zhurihina_vv@spbstu.ru

Abstract. Plasmonic materials based on noble metal nanostructures exhibit unique optical properties in the visible range. Currently, plasmons supported by metal nanoparticles or propagating along metal interfaces are attracting increasing attention in sensorics, medicine, imaging, nanophotonics, and optoelectronic technologies. This article has provided a brief overview of two main plasmonic modes: surface plasmon polaritons at metal interfaces and localized plasmons in nanostructures. It also discussed the physical principles of plasmon-enhanced sensors, such as colorimetric, plasmon-enhanced fluorescence, and surface enhanced Raman scattering ones. These sensors are widely used in healthcare, security, food processing, and environmental monitoring. The fabrication of plasmonic nanostructures in glasses using ion exchange and their application for detecting chemical compounds and biological objects are discussed.

Keywords: localization of light, nanostructure, ion exchange, plasmon, electromagnetic field amplification, sensor

Funding: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FSRM-2026-0005)

For citation: Zhurikhina V. V., Babich E. S., Terpitskiy A. N., Nuritdinov I., Rakhmatov M. A., Eshbekov A. A., Plasmonic nanomaterials formed by ion exchange in glass: properties and applications, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (2) (2026) 107–135. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19210

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Введение

Хорошо известно, что на оптических длинах волн электромагнитные свойства благородных металлов – золота, серебра и меди – очень похожи на свойства электронного газа. Классическая электронная теория предсказывает (и многочисленные эксперименты подтверждают) отрицательную вещественную часть диэлектрической проницаемости для благородных металлов на оптических длинах волн или вблизи них [1]. Благодаря этому колебания заряда могут распространяться вдоль поверхности благородных и ряда других металлов на оптических частотах. В электромагнитном отклике наночастиц с размерами порядка нескольких нанометров доминируют колебания поверхностного заряда.

Поверхностный плазмон (ПП) – это явление, вызванное коллективными колебаниями электронов проводимости в наноструктурированных металлических системах [2]. Уникальным свойством таких систем выступает способность сохранять оптическую энергию сконцентрированной на наномасштабном уровне благодаря поверхностным плазмонам. При совпадении частоты внешнего возбуждения с частотой поверхностного плазмона наблюдается явление поверхностного плазмонного резонанса.

© Zhurikhina V. V., Babich E. S., Terpitskiy A. N., Nuritdinov I., Rakhmatov M. A., Eshbekov A. A., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Как интенсивность, так и положение поверхностного плазмонного резонанса существенным образом зависят от размера, формы и состава наноструктур, а также от диэлектрических свойств окружающей среды [3 – 5]. Последнее открывает возможности для спектроскопических методов исследования, которые позволяют в режиме реального времени отслеживать взаимодействия между аналитом и поверхностью сенсора [6]. Более того, сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса требуют использования минимальных количеств исследуемого вещества и не нуждаются в маркировке образцов, что устраняет необходимость их предварительной подготовки [7]. Это приводит к высокочувствительной, универсальной и очень эффективной технологии, которая интенсивно развивается в течение последних двух десятилетий.

Поверхностные плазмон-поляритоны и плазмоны в наночастицах

Обычно рассматривают две различные формы плазмонного резонанса (рис. 1):

поверхностные плазмонные поляритоны (ППП), распространяющиеся вдоль металлических интерфейсов;

локализованный поверхностный плазмонный резонанс в металлических наночастицах (ЛППР) [8].

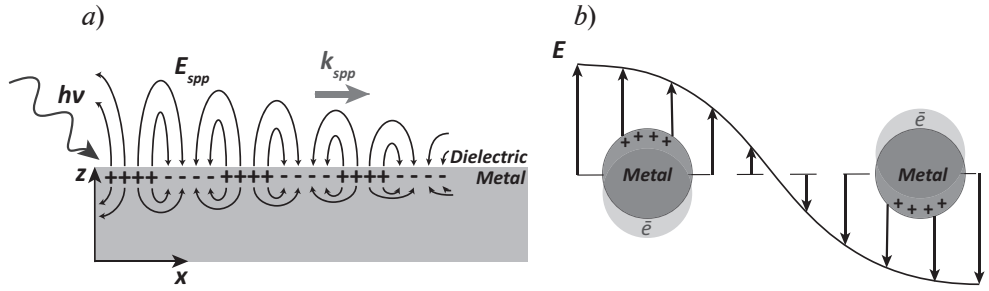


Рис. 1. Схематическое изображение двух типов плазмонного резонанса:
a – поверхностный плазмон-поляритон (ППП); распространяется вдоль интерфейса металл–диэлектрик;
b – локализованный поверхностный плазмонный резонанс (ЛППР) в наночастицах;
возбуждается при падении на наночастицу электромагнитной волны

ЛППР наблюдается, если размеры металлической наноструктуры много меньше длины волны падающего света. Для оптического диапазона оптимальный размер наночастиц составляет 10 – 15 нм [9]. При взаимодействии с внешней электромагнитной волной, в металлической наноструктуре возникают коллективные нераспространяющиеся колебания поверхностных электронов. При этом частота плазмонного колебания зависит от морфологии наночастицы и поляризации волны. В эллипсоидальной наночастице частота ЛППР ω_α вдоль оси α определяется следующей формулой [10]:

$$\omega_\alpha = \omega_p \Big/ \sqrt{1+\varepsilon_d\left(1/L_\alpha - 1\right)}, \qquad (1)$$

где ω_p – плазменная частота Друде, ε_d – диэлектрическая проницаемость окружающей среды, L_α – геометрический фактор для данной оси (для сферы $L_\alpha = 1/3$).

Как следует из формулы (1), резонансная частота зависит от диэлектрической проницаемости окружающей среды, что является основой для плазмонных сенсоров. Кроме того, плазмонный резонанс приводит к высокой концентрации электромагнитного поля вокруг наноструктуры. Усиленные локальные поля увеличивают эффективность излучательных и неизлучательных процессов, в которых участвует молекула, расположенная в ближнем поле наночастицы. Этот эффект часто называют эффектом наноантенны [11]; он обусловливает эффекты поверхностно-усиленной флуоресценции [12] и поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния света [13]. Оба этих явления можно использовать для сенсорики.

В отличие от ЛППР, ППП поддерживают электронные колебания на поверхности металл – диэлектрик, в частности, на поверхности тонких металлических пленок. Такие волны, поляризованные в направлении, перпендикулярном к поверхности металла

(ТМ-поляризация), возможны только на интерфейсах между материалами, имеющими разные знаки вещественной части диэлектрической проницаемости (в металле на оптических частотах вещественная часть диэлектрической проницаемости отрицательная). В случае интерфейса металл–диэлектрик, на оптических частотах эти волны распространяются как электромагнитные поля, связанные с поверхностными плазменными колебаниями – колебаниями электронов проводимости в металле [14]. Это, по своей сути, двумерное возбуждение, электромагнитное поле которого экспоненциально затухает с расстоянием от поверхности интерфейса [14].

Волновой вектор ППП Q на частоте ω можно записать как [10]

$$Q = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}}, \qquad (2)$$

где ε_m – диэлектрическая функция металла.

Из-за несоответствия волновых векторов падающего света и распространяющегося плазмон-поляритона (волновой вектор ППП всегда больше волнового вектора падающей электромагнитной волны), ППП невозможно возбудить излучением в свободном пространстве. Для его возбуждения требуется согласование импульсов, например, за счет нарушенного полного внутреннего отражения или периодической структуры.

Классической установкой для возбуждения ППП служит конфигурация Кречмана [15]. В этой конфигурации металлическая пленка (обычно благородный металл, чаще всего золото), нанесенная на призму, почти полностью отражает падающее излучение, за исключением определенного угла, называемого углом возбуждения ППП. Как можно заключить из анализа выражения (2), этот угол зависит от показателя преломления среды, что и используется при создании датчиков.

Распространяющиеся ППП или смешанный режим ППП/ЛППР могут использоваться для обнаружения изменений диэлектрической проницаемости окружающей среды. Если молекулы аналита в водном растворе связываются с плазмонной металлической пленкой, то угол возбуждения ППП изменяется, а длина волны ППП возрастает ввиду более высокого показателя преломления молекул [16, 17].

Также сообщалось об изготовлении оптоволоконных датчиков на основе ППП [18, 19]. Основой таких датчиков служили одномодовые конические волокна, покрытые тонким металлическим слоем с одной стороны. Распространяющаяся в волокне оптическая мода может возбуждать различные гибридные поверхностные плазмонные моды в металлическом слое. В результате спектр пропускания волокна с металлическим покрытием показывает несколько пиков ППП, положение которых зависит от параметров системы и показателя преломления внешней среды [18]. Волоконно-оптические датчики на основе ППП имеют ряд преимуществ, например малый вес, а также возможности дистанционного зондирования и мультиплексирования.

Сенсоры на основе плазмонов в наночастицах

Наночастицы благородных металлов, таких как золото, серебро и медь (Au, Ag и Cu), демонстрируют ЛППР в оптическом диапазоне и широко используются для создания плазмонных сенсоров [20]. Согласно формуле (1), положение ЛППР зависит от формы наночастицы и диэлектрического окружения: длина волны резонанса плазмонов смещается, когда аналит связывается с поверхностью наночастицы (иногда для этого необходима функционализация наночастицы), изменяя локальный показатель преломления (рис. 2).

Изменение показателя преломления n внешней среды на заданную величину Δn смещает положение максимума кривой плазмонного резонанса λ_{res} (в единицах длины волны) или E_{res} (в единицах энергии). Соответствующую константу пропорциональности, или чувствительность можно выражать в единицах длины волны (S_λ) или энергии (S_E) [21]:

$$S_\lambda = d\lambda_{res}/dn,\ S_E = dE_{res}/dn = -1{,}240\ S_\lambda/\lambda^2\ (\text{нм/эВ}).$$

Относительно большая ширина плазмонного резонанса Γ (ширина на полувысоте) усложняет анализ, поскольку для наноструктур с разной геометрией эта величина может различаться более чем в десять раз. Очевидно, что легче обнаружить сдвиг резонанса для узких линий, поэтому отношение сдвига резонанса к ширине линии является более

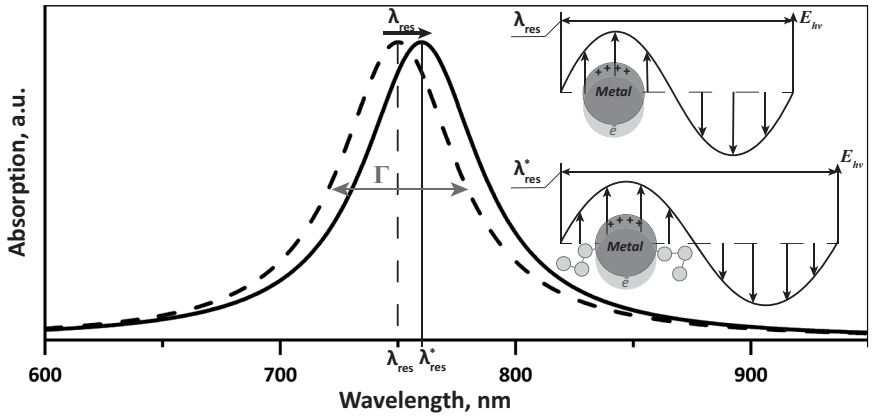


Рис. 2. Сдвиг положения ЛППР при изменении внешней среды; ключевые параметры: Г – ширина плазмонного резонанса на полувысоте максимума и λ_{res} – положение максимума плазмонного резонанса на шкале длин волн

корректной мерой качества сенсора на основе плазмонов. Отношение сдвига резонанса к ширине линии – это безразмерная величина, добротность резонансной структуры (FOM) [21]:

$$\text{FOM} = S/\Gamma.$$

Добротность можно легко определить экспериментально, и эта величина удобна для сравнения плазмонных свойств различных структур. Можно показать [22], что для малых металлических наночастиц добротность зависит только от природы металла. Она имеет наибольшее значение при малом затухании (малых значениях мнимой части диэлектрической проницаемости) и в точке, где вещественная часть диэлектрической проницаемости имеет наиболее сильную зависимость от частоты. Меняя геометрию наночастицы, можно настроить резонансную частоту и, в свою очередь, добротность плазмонных датчиков. Из всех сенсоров на благородных металлах наибольшую добротность демонстрируют сенсоры на основе серебряных наночастиц, что связано с низкими потерями для серебра в оптическом диапазоне частот.

Колориметрические плазмонные сенсоры, основанные на смещении пика ЛППР в коллоидных растворах с наночастицами, являются простым и удобным методом обнаружения аналитов в растворе, поскольку этот метод часто обеспечивает прямую визуализацию концентрации аналита. Например, функционализированные золотые наночастицы использовались для колориметрического обнаружения тяжелых металлов, малых биологических молекул и биомакромолекул [23 – 25].

В работе [26] был предложен новый колориметрический анализ для сверхчувствительного визуального обнаружения глюкозы на основе золотых наночастиц в форме бипирамид. Предлагаемый колориметрический анализ глюкозы демонстрировал предел детектирования 0,02 мМ. Более того, с помощью предложенного датчика приблизительные уровни глюкозы можно оценивать по изменению цвета невооруженным глазом и таким образом провести различие между здоровыми людьми и пациентами с диабетом без использования какого-либо сложного инструмента.

Усиление электромагнитного поля вблизи поверхности наночастиц за счет ЛППР можно применять для плазмонно-усиленной флуоресцентной спектроскопии. Усиление флуоресценции сенсоров на основе ЛППР возможно путем повышения эффективности возбуждения аналита и/или испускания им света [27]. В обоих случаях более сильные локальные электромагнитные поля приведут к большему усилению. Согласно формуле (1), усиление электромагнитного поля вблизи острой структуры будет выше благодаря геометрическому фактору (эффект иглы или громоотвода). Таким образом, наностержни, вытянутые эллипсоиды и дендриты будут демонстрировать повышенную, по сравнению с наносферами, плазмонно-усиленную флуоресценцию. Фактор усиления плазмонной флуоресценции обычно находится в диапазоне 10 – 100, но может быть и выше в оптимизированных плазмонных наноструктурах, достигая в некоторых случаях значения 10^3 [28].

В частности, исследователь Ф. Се с соавторами использовали массив нанотреугольников серебра Ag для усиления флуоресценции красителей в ближнем инфракрасном диапазоне [29]. Авторы показали, что низкий квантовый выход (4%) флуоресценции красителя в ближнем ИК-диапазоне можно увеличить на два порядка, если использовать нанорешетку серебряных треугольников.

Поверхностно-усиленное комбинационное рассеяние света (гигантское комбинационное рассеяние (ГКР)) является одним из самых мощных и перспективных аналитических методов для био- и химического анализа благодаря следующим преимуществам [30 – 33]:

высокая селективность метода за счет уникальных спектральных характеристик аналитов;

высокая чувствительность, вплоть до обнаружения отдельных молекул, простота эксплуатации;

возможность обнаружения многокомпонентных соединений с помощью одного возбуждающего лазера за счет узких спектральных полос.

Само комбинационное рассеяние (КР) обладает низкой эффективностью из-за малого сечения рассеяния (порядка 10^{-28} – 10^{-30} см^2/молекула). Однако повышенное локальное электромагнитное поле в плазмонных наноструктурах обеспечивает усиление сигнала КР от 10^4 до 10^8 [34]. Повышение величины локального электромагнитного поля вблизи плазмонных наноструктур определяет эффективность датчиков на основе ГКР, поэтому в настоящее время существенные усилия исследователей направлены на разработку ГКР-подложек [35 – 37].

Одной из эффективных методик, отличающихся относительной простотой и дешевизной технологии, является методика изготовления плазмонных структур в объеме и на поверхности стекла с помощью ионного обмена [38 – 41]. Формирование наноструктур в стекле с использованием методики ионного обмена в сочетании с поляризацией стекла и его травлением позволяет формировать в стекле микроканалы с плазмонными наночастицами, что перспективно для использования в микрофлюидике [42, 43].

Плазмонные структуры, формируемые методом ионного обмена в стеклах

Стекла – это уникальные материалы, обладающие особыми свойствами, критически важными для применения в ряде технологий. Стекла обладают прозрачностью и твердостью при комнатной температуре, механической прочностью и высокой химической стойкостью. Великий российский ученый М. В. Ломоносов в 1752 году в письме к куратору Московского университета И. И. Шувалову писал [44]:

«Неправо о вещах те думают, Шувалов,
Которые Стекло чтут ниже Минералов,
. . . . . .
Пою перед тобой в восторге похвалу
Не камням дорогим, ни злату, но Стеклу».

Ионный обмен из расплавленных солей является хорошо зарекомендовавшей себя технологией, способной изменять химико-физические свойства стекла. Эта методика использовалась, например, в производстве керамик в эпоху Возрождения. Такая керамика была покрыта тонкой стеклянной пленкой с наночастицами серебра и меди различных размеров, образованных в результате процесса ионного обмена между ионами металлов и ионами щелочных элементов в стекле с последующим восстановлением металлических ионов и их агрегацией в наночастицы [45].

Как правило, оптическое стекло представляет собой аморфный материал, состоящий из нескольких типов оксидов [46]:

сеткообразователи (SiO_2, GeO_2 или P_2O_5);

промежуточные сеткообразователи (Al_2O_3, TiO_2), которые не могут создавать стекло сами по себе, но могут быть объединены с сеткообразователями;

оксиды-модификаторы (Na_2O, K_2O, CaO или BaO), которые слабее связаны с сеткой стекла.

Ионный обмен – это, по сути, химическая реакция, в которой подвижные ионы твердого тела обмениваются на ионы с аналогичным зарядом из раствора. Поскольку щелочные ионы-модификаторы слабо связаны с матрицей стекла, они больше всего пригодны для ионного обмена. Для применения в оптике и фотонике в подавляющем большинстве случаев используется обмен ионов Na^+ или K^+ в составе стекла на ионы Ag^+, K^+ или Tl^+ из солевого расплава (рис. 3).

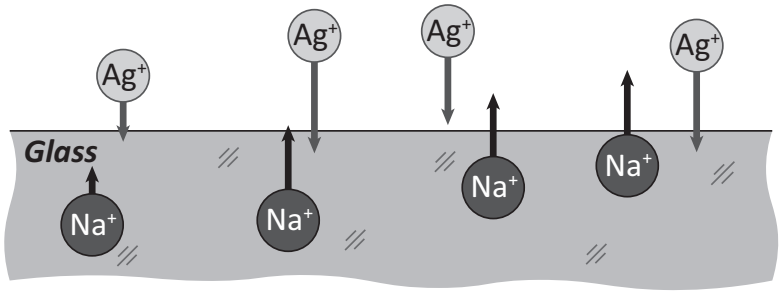


Рис. 3. Схематическое представление ионного обмена в стекле

В настоящее время технология ионного обмена успешно применяется для упрочнения стекла [47], создания оптических волноводов и активных оптических устройств [48, 49], формирования металлических наноструктур в стекле [50]. На последней из перечисленных технологий остановимся более подробно.

Формирование металлических наночастиц в объеме и на поверхности стекла.

Среди множества различных металлических наночастиц синтез и изучение наночастиц серебра кажутся особенно интересными, поскольку серебро демонстрирует самую высокую электро-и теплопроводность среди всех металлов [51]. Электронные и оптические свойства наночастиц серебра можно контролировать путем подбора режимов синтеза.

К распространенным способам получения металлических наночастиц в стеклах относятся метод быстрой закалки стекла при его синтезе из расплава [52], золь-гель методика [53], ионная имплантация [54] и метод ионного обмена [55].

Ионный обмен обладает рядом преимуществ:

может обеспечивать внедрение в стекло достаточно высоких концентраций ионов металлов;

в результате обмена стекло остается неповрежденным (в отличие от метода ионной имплантации, который вносит существенные дефекты в матрицу стекла);

позволяет производить большие объемы стекла с металлическими наночастицами.

После внедрения ионов серебра в стеклянную матрицу путем ионного обмена необходимо создать условия для фазового распада пересыщенного твердого раствора стекло-металл и выпадения второй фазы – металлических наночастиц. Для этого используется отжиг (температурная обработка) ионообменного стекла в воздушной атмосфере или атмосфере водорода, а также ионизирующее излучение совместно с термической обработкой или без нее. Кроме того, наночастицы можно получать при проведении ионного обмена в стекло, содержащее в своем составе восстановители – ионы переменной валентности.

Главное ограничение метода – сложность получения монодисперсных ансамблей наночастиц с узким распределением по размерам. Это связано с самой природой процесса, который состоит из двух этапов: диффузии ионов и их последующей агрегации. Метод ионного обмена приводит к образованию полидисперсных наночастиц ввиду стохастической нуклеации и диффузионного роста [56]. Даже при оптимизации параметров процесса распределение по размерам остается широким [57]. При этом глубина залегания наночастиц зависит от времени и температуры проведения процесса, а также от заряда диффундирующего иона; глубина составляет от сотен нанометров до нескольких микрометров. Для многозарядных ионов (например, Cu^{2+}) глубина проникновения существенно меньше, чем для однозарядных (Ag^+, Na^+) [58]. Термообработка при температурах, превышающих температуру стеклования, может приводить к формированию структур типа ядро-оболочка [59].

Состав стекла критическим образом влияет на диффузию и восстановление ионов. Добавление в стекло ионов переменной валентности, например церия, железа или сурьмы, способствует восстановлению серебра при ионном обмене и росту фотолюминесцентных молекулярных кластеров серебра и плазмонных наночастиц серебра [60]. В стеклах, легированных галогенидами, такими как хлор или бром, и подвергнутых ионному обмену $Na^+ \leftrightarrow Ag^+$ и термообработке, наблюдается образование фото- и термохромных нанокристаллов AgCl или AgBr [61]. При этом методика формирования наночастиц методом ионного обмена воспроизводима при незначительном отклонении в составе стекла или параметров процесса.

При термической обработке, проводимой на воздухе и при температуре ниже некоторого порогового значения, в стекле образуются молекулярные кластеры (размерами менее 1 нм), которые, скорее всего, представляют собой димеры серебра [62]. Происходящие процессы можно записать следующим образом [62]:

$$2(\equiv Si - O - Ag^+) \leftrightarrow \equiv Si - O - Si\equiv + O^- + (Ag_2)^+,$$

$$O^- + (Ag_2)^+ \rightarrow 2\,Ag^0 + (1/2)\,O_2.$$

С увеличением продолжительности отжига при температуре ниже порогового значения возрастает лишь количество кластеров, но не их размер. Термическая обработка выше порогового значения температуры приводит к росту размеров наночастиц серебра [62]. Электронная структура молекулярных кластеров существенно отличается от электронной структуры металлических наночастиц, в частности, молекулярные кластеры демонстрируют люминесценцию в видимом диапазоне при накачке УФ-излучением, что позволяет их использовать в различных сенсорных приложениях [63, 64]. При этом в молекулярных кластерах, ввиду их малых размеров, отсутствует коллективное колебание электронов – плазмонный резонанс.

Другой способ термической обработки ионообменного стекла для формирования металлических наночастиц состоит в отжиге образца в восстанавливающей атмосфере водорода H_2. Этот способ приводит к формированию нанокомпозита стекло-металл внутри стекла и наноостровковой пленки металла на поверхности стекла, вследствие диффузии атомов металлов, восстановленных в результате проникновения водорода в стекло [56]. Восстановление ионов металла описывается реакцией [65]:

$$\equiv Si - O - Ag^+ + (1/2)\,H_2 \rightarrow \equiv Si - O - H^+ + Ag^0.$$

При отжиге ионообменного стекла в водороде при определенных условиях, можно способствовать преимущественному образованию наночастиц на поверхности или в объеме стекла [66], а также создавать упорядоченные ансамбли металлических наночастиц на поверхности [67].

Ионизирующие излучения, такие как гамма-кванты, электроны, тяжелые ионы, рентгеновские или лазерные лучи, можно использовать совместно с термической обработкой или вместо нее для получения серебряных наночастиц в ионообменном стекле [68 – 70]. Ионизирующее излучение создает в диэлектрической матрице стекла экситоны, которые приводят к образованию стабильных дефектов и изменению валентного состояния легирующих и примесных ионов в стеклах.

Гамма-облучение диэлектрической матрицы стекла приводит к образованию в ней электронно-дырочных пар. Часть электронов восстанавливает ионы серебра до нейтрального состояния [71]:

$$\text{glass} \xrightarrow{\gamma\text{-rays}} h^+ + e^-,$$

$$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag^0.$$

Последующее образование наночастиц происходит за счет активации диффузии нейтральных атомов серебра в стеклянной матрице при термической обработке по такой реакции [71] (рис. 4):

$$nAg^0 \rightarrow Ag_n.$$

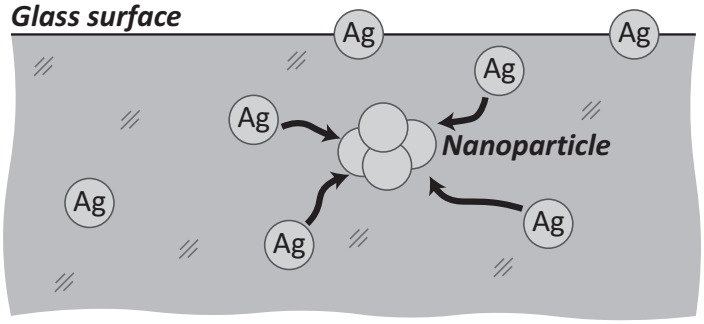


Рис. 4. Схема формирования серебряных наночастиц в стекле

Образование наночастиц серебра сопровождается возникновением пиков на длинах волн плазмонного резонанса 400 – 420 нм в спектрах оптического поглощения, а также окрашиванием исходно прозрачного стекла в светло-желтый или интенсивно-желтый цвет, в зависимости от объемной доли наночастиц. Процесс образования наночастиц серебра зависит от дозы облучения, и его скорость увеличивается по сравнению с термическим отжигом, поскольку гамма-облучение увеличивает коэффициент диффузии серебра в стекле на несколько порядков [71, 72].

Формирование наночастиц в стекле может также осуществляться под действием лазера без дополнительного термического отжига. Лазерное облучение приводит к разогреву облучаемой области стекла и ее размягчению [73], а также (в случае ионообменного стекла) к разрыву связей серебро – немостиковый кислород с последующим восстановлением ионов серебра электронами из отрицательно заряженных атомов немостикового кислорода [66]. Кроме того, лазерное облучение на длине волны 355 нм приводит к образованию свободных электронов в стекле за счет многофотонного поглощения [74]. Это, в свою очередь, вызывает восстановление ионов серебра до металлического состояния путем захвата электронов. Пересыщение приповерхностной области стекла атомами серебра обусловливает его склонность к фазовому распаду с выпадением металлических наночастиц [75].

Металлические дендритные структуры в стекле. Дендритные (или фрактальные) наноструктуры привлекают повышенное внимание исследователей ввиду их разветвленной структуры и большой площади поверхности, что представляет интерес для многих практических приложений, в частности ГКР и катализа [76, 77]. Были проведены исследования по получению дендритов серебра с использованием различных методов:

фотовосстановление в присутствии поливинилового спирта [78],

восстановление с использованием аскорбиновой кислоты в присутствии полиакрилата натрия [79],

жидкий гальвано-химический синтез [80] с использованием импульсной соноэлектрохимической техники [81] и другие.

Однако большинство методов «мокрой химии» для получения дендритных наноструктур основаны на использовании поверхностно-активных веществ или полимерных шаблонов, что усложняет процедуру синтеза и процесс очистки образцов. В некоторых случаях трудно избежать загрязнения конечного продукта из-за образования нежелательных (побочных) химических соединений в реакционной среде, делающих дендриты непригодными для дальнейшего применения. Поэтому поиск методов синтеза дендритных наноструктур без шаблонов – это актуальное направление исследований.

Перспективным методом синтеза дендритов серебра, не требующим сложного оборудования и использования «мокрой химии», является ионный обмен в стекле в сочетании с приложением постоянного электрического напряжения к противоположным сторонам [82] или к одной и той же стороне стеклянной подложки [40]. Получаемые таким способом структуры представлены на рис. 5.

Механизм образования дендритов при подаче напряжения на ионообменное стекло, содержащее ионы металла, можно представить следующим образом [82].

На первом этапе, в результате дрейфа ионов серебра под действием электрического поля и их восстановления на катоде, на поверхности стекла формируются зародыши

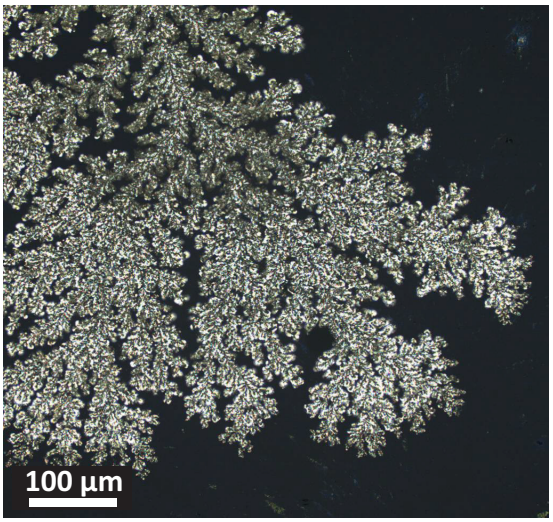


Рис. 5. Оптическое изображение серебряных дендритов в ионообменном стекле

металлической фазы. На втором этапе происходит диффузионный рост зародышей и образование металлических островков, находящихся в контакте с катодом; некоторые из них выступают в качестве вторичного катода и таким образом становятся источниками роста дендритов. Поскольку после ионного обмена ионы серебра сосредоточены в приповерхностной области стекла, рост дендритов происходит главным образом в плоскости, параллельной поверхности образца, внутри стекла. Последующее травление стекла в разбавленном растворе плавиковой кислоты/фторида аммония (HF/NH_4F) приводит к «прорастанию» на поверхности стекла игольчатых структур высотой до ~100 нм и более мелких разветвлений дендритов [40]. Образованные таким образом металлические наноструктуры перспективны для применения в катализе и датчиках ГКР.

Использование плазмонных наноструктур в качестве подложек для сенсоров на основе гигантского комбинационного рассеяния

Взаимодействие между светом и наноструктурами благородных металлов служит ключевым моментом для использования одного из наиболее эффективных оптических методов исследования: поверхностно-усиленного (гигантского) комбинационного рассеяния. Металлические наноструктуры выполняют роль «горячих точек» для электрического поля падающей световой волны ввиду эффекта локализованного поверхностного плазмонного резонанса в наноструктурах [83]. Когда молекула аналита находится близко к одной из этих «точек», ее сигнал комбинационного рассеяния возрастает на несколько порядков за счет усиления электрического поля, действующего на молекулу. Это обеспечивает датчикам-сенсорам, основанным на эффекте ЛППР, сверхчувствительные пределы детектирования в сочетании с высокой избирательностью, присущей спектроскопии комбинационного рассеяния света [84].

Для разработки высокопроизводительных сенсоров на основе ГКР необходима оптимизация подложек. Идеальные подложки для ГКР должны обеспечивать высокий уровень усиления сигнала, воспроизводимый отклик, возможность многократного использования, стабильность металлических наночастиц, низкую стоимость и простоту метода изготовления [85].

Сопоставление метода ионного обмена с другими методиками изготовления плазмонных структур для ГКР

Основными параметрами, характеризующими плазмонные структуры, использующиеся как подложки для ГКР, служат размерное распределение наночастиц, плотность горячих точек и коэффициент усиления сигнала комбинационного рассеяния. Ниже представлен краткий сравнительный анализ методик формирования металлических наноструктур для ГКР.

Ионный обмен в стекле. Наночастицы, получаемые методом ионного обмена в стекле, имеют довольно широкое полидисперсное распределение по размерам, что обусловлено диффузионным характером их формирования [86]. При этом размер частиц можно варьировать от 2 до 250 нм через управление временами ионного обмена и режимами отжига [87, 88]. Среднеквадратичное отклонение размеров может достигать 30 – 40% [86]. Плотность горячих точек средняя, и есть возможность ее варьирования, например, при сочетании метода ионного обмена и термической поляризации стекла [66]. Также сочетание двух этих методов позволяет формировать горячие точки в соответствии с заранее заданным рисунком. Коэффициент усиления ГКР – средний по величине (до 10^7 [89]).

Фемтосекундная лазерная запись плюс восстановление. При фемтосекундной лазерной записи с последующим восстановлением мощные фемтосекундные лазерные импульсы фокусируются в объем стекла или раствора прекурсора. Многофотонное поглощение инициирует локальное восстановление ионов металла (например, Ag^{+} или Au^{3+}) до нейтрального состояния, что сопровождается формированием наночастиц в области фокуса. Такая методика позволяет получать частицы контролируемого размера (обычно 20 – 200 нм), меняя мощность лазера и скорость сканирования, и формировать структуры с заданной геометрией [91]. Дисперсия размеров составляет порядка 10% [92]. Плотность горячих точек при этом высокая. Также можно создавать массивы димеров или цепочек частиц с зазорами менее 10 нм, включая 3D-структуры в объеме материала [92]. Высокий коэффициент усиления ГКР в таких структурах (до 10^{10} [93]) достигается за счет точного контроля размера наночастиц и создания ансамблей частиц с управляемыми характеристиками [91, 94].

Наноимпринт-литография плюс напыление. По этой технологии на подложку наносится полимерный резист, в котором механическим штампом формируется рельеф (лунки или столбики). Затем путем напыления (например, термического или электронно-лучевого) осаждается слой металла (Ag, Au); после удаления резиста, на подложке остаются строго упорядоченные металлические структуры [95, 96]. Размерное распределение, которое при этом получается, – чрезвычайно узкое (фактически монодисперсное). Кроме того, описанная технология обеспечивает наилучшую воспроизводимость формы и размера (от 10 нм до нескольких микрометров), соответствующую форме штампа [97]. Методика наноимпринт-литографии обеспечивает максимальную плотность горячих точек и позволяет проектировать массивы с усилением поля в строго заданных узких областях (например, в зазорах между нанодисками) [97]. Это обеспечивает высокий коэффициент усиления сигнала ГКР (до 10^{7} [97]) для структур с субнанометровыми зазорами.

Химическое травление плюс металлизация. Для получения плазмонных наноструктур методом химического травления с последующей металлизацией поверхность (например, кремния, меди или алюминиевой фольги) обрабатывается химическим травителем для создания шероховатости. Далее на эту шероховатую поверхность химически или гальванически осаждается слой благородного металла [98, 99]. Процесс трудно контролировать, и часто при его проведении образуются дендритные структуры. Формируемое размерное распределение наноструктур при использовании этой методики – широкое и фрактальное; размеры варьируются от нано- до микромасштаба [100], плотность горячих точек довольно высокая. Последнее обеспечивает достаточно высокий коэффициент усиления сигнала ГКР (до 10^{8} для металлизированного мезапористого кремния [101]).

В таблице представлено сравнение вышеперечисленных методик по трем основным характеристикам.

Таблица

Сравнение значений параметров плазмонных структур при использовании различных методов

Метод	Размерное распределение	Плотность «горячих точек»	Коэффициент усиления сигнала ГКР
Ионный обмен в стекле	Широкое (полидисперсное) [86]	Средняя/низкая (случайное распределение) [88]	10^{3} – 10^{7} [89, 90]
Фемтосекундная лазерная запись + восстановление	Узкое (контролируемое) [91, 92]	Высокая [92]	10^{8} – 10^{10} [93, 102]
Наноимпринт-литография + напыление	Очень узкое (монодисперсное) [10]	Очень высокая (детерминированное расположение) [96]	10^{6} – 10^{7} [97]
Химическое травление + металлизация	Широкое (случайное, дендритное) [100]	Очень высокая (субнанометровые зазоры) [14]	10^{7} – 10^{8} [101]

Несмотря на сравнительно низкую плотность горячих точек и относительно невысокий коэффициент усиления сигнала ГКР, по сравнению с другими технологиями, метод ионного обмена обладает рядом уникальных преимуществ, которые делают его привлекательным для создания ГКР-активных подложек.

Следует выделить такие преимущества метода ионного обмена для формирования ГКР-структур:

1. Технологическая простота и масштабируемость. Это простой и недорогой процесс, пригодный для крупномасштабного производства ГКР-активных подложек. Метод не требует сложного литографического оборудования и высокого вакуума.

2. Низкая стоимость исходных материалов. В качестве основы для подложек используется многокомпонентное стекло, которое представляет собой дешевый и технологичный материал. Сама процедура ионного обмена также не требует дорогостоящего оборудования или расходных материалов.

3. Наночастицы защищены от внешней среды. В отличие от многих других методов, где наночастицы находятся непосредственно на поверхности и подвержены окислению и сульфидизации, в объеме ионообменного стекла над наночастицами металла находится тонкий слой стекла. Это обеспечивает долговечность и сохранность подложки без потери свойств и возможность многократного использования при последовательном травлении; последнее позволяет обнажать новые слои с неповрежденными наночастицами для повторного использования подложки.

4. Высокий коэффициент усиления сигнала (до $10^5 – 10^6$), достигаемый при использовании метода, что достаточно для многих аналитических задач, включая проблемы биомедицины.

5. Гибкость метода и возможность контроля параметров. Процесс позволяет варьировать и состав, и структуру наночастиц. Например, при последовательном внедрении ионов разных металлов (медь и серебро) и контроле температуры отжига можно формировать наноструктуры типа «ядро-оболочка» и структуры смешанного состава, положение плазмонного резонанса в которых зависит от соотношения концентраций металлов. Кроме того, комбинация ионного обмена с лазерным облучением позволяет создавать («рисовать») структуры заданной формы.

6. Возможность интеграции в оптические схемы. Формирование наночастиц в стекле – это идеальный вариант для разработки интегрированных сенсорных чипов, объединяющих оптические волноводы и микрофлюидику.

7. Хорошая изученность и возможность моделирования. Процессы ионного обмена и последующего формирования наночастиц хорошо изучены и поддаются математическому моделированию, что позволяет прогнозировать свойства конечных наноструктур.

Таким образом, при целом комплексе перечисленных преимуществ метода главными можно считать уникальное сочетание простоты и экономичности производства, а также открывающиеся возможности повысить долговечность ГКР-подложек благодаря естественной защите наночастиц стеклянной матрицей. Это делает технологию особенно привлекательной для создания практичных и стабильных сенсоров, пригодных даже для полевых условий. Хотя и имеются некоторые ограничения в контроле дисперсии наночастиц по размерам, характерные для этого метода, они не служат серьезным препятствием для его применения.

Серебряные наночастицы обеспечивают лучшее усиление ГКР среди всех наноструктур благородных металлов, хотя и склонны к окислению и сульфидированию.

С учетом оценок значений параметров подложек (они приведены выше), изготовленных различными методами, подложки для ГКР на основе ионообменных стекол со сформированными наноструктурами серебра представляются самыми перспективными по следующим причинам:

серебряные наноструктуры обеспечивают высокое усиление сигнала ГКР;

серебряные наноостровковые пленки можно удалять с поверхности после использования и сформировывать новые наночастицы на поверхности простым нагревом подложки с ионами серебра; другими словами, подложка пригодна для многоразового использования [38];

при нахождении серебряных наноструктур в объеме стекла они не повреждаются, при

этом перед непосредственным использованием наноструктуры можно выводить на поверхность путем травления стекла [40];

методика проста и низкозатратна, результаты хорошо воспроизводятся.

Детектирование различных веществ с помощью ГКР-методики на подложках с серебряными наноструктурами, сформированными методом ионного обмена

Исследование усиления сигнала комбинационного рассеяния света наноостровковыми пленками серебра, образованными на поверхности стекла в результате ионного обмена и термического отжига, а также влияние взаимного расположения «горячих точек» в ансамбле самоорганизующихся серебряных наноостровков, проводилось в работе [39]. Для нерезонансного возбуждения был зарегистрирован сигнал комбинационного рассеяния света от водного раствора 1,2-ди(4-пиридил)этилена (BPE) с концентрацией 10^{-3} М. Проведенное сравнение характеристик поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния света пленками наноостровков на разных стадиях их роста показало, что на стадии коалесценции наноостровков усиление доминировало вследствие повышения напряженности электрического поля близкорасположенными группами наноостровков. На более ранних стадиях роста была установлена линейная зависимость между сигналом ГКР и поверхностной плотностью наноостровков. Максимальное усиление сигнала наноостровками наблюдалось на пороге коалесценции.

Серебряные наноостровковые пленки, сформированные на поверхности ионообменного стекла при термическом отжиге, демонстрируют стабильность в биосовместимых буферах, что открывает новые возможности их применения для ГКР-диагностики биообъектов, растворенных в буферах. В статье [41] было показано, что серебряные наноостровковые пленки стабильны в одном из наиболее распространенных (в биологических исследованиях) буферов – фосфатно-солевом (PBS), в PBS, разбавленном водой в соотношении 1:100, а также в буфере на основе PBS, в котором хлорид натрия NaCl заменен на такое же количество перхлората натрия $NaClO_4$, и в кислом фосфатном буфере. Показано, что после воздействия PBS пленки наноостровков обеспечивают хороший сигнал ГКР от монослоя BPE (концентрация 10^{-4} М), что делает их перспективными для применения в биосенсорах.

Метод ГКР с успехом применяется для диагностики аминокислот и белковых соединений. Было продемонстрировано [103], что спектры ГКР D-аланина и DL-серина можно наблюдать, если использовать подложки из серебряных наноостровковых пленок, погруженные в стандартные растворы PBS с миллимолярными концентрациями этих аминокислот. При этом полученные спектры существенно отличаются по интенсивности пиков и их положению от спектров комбинационного рассеяния объемных растворов и ГКР кристаллитов соответствующих аминокислот на подложках, не погруженных в буфер, и их КР на чистом стекле. Этот эффект предположительно приписывается электростатической ориентации цвиттер-ионов аминокислот наночастицами серебра, которые приобретают отрицательный заряд из-за десорбции Ag(I) хлоридом в растворе.

Таким образом, несмотря на достаточное усиление сигнала за счет металлических наноостровков, при идентификации аминокислот в различных биосовместимых буферах необходимо учитывать взаимодействие аминокислот с металлическим субстратом.

В работе [104] было проведено сравнительное исследование методов ГКР и иммуноферментного анализа для обнаружения нуклеопротеинов вируса SARS-CoV-2. В качестве подложек для ГКР использовались наноостровковые пленки серебра на поверхности ионообменного стекла. Было установлено, что спектры ГКР позволяют различать признаки антигенов, антител и признаки, показывающие связь между ними. При этом методика ГКР демонстрирует гораздо более низкий предел обнаружения, по сравнению с иммуноферментным анализом: 1 пг/мл против примерно 50 – 100 пг/мл, а также позволяет существенно снизить время диагностики: для проведения иммуноферментного анализа необходимо около двух часов, тогда как измерения ГКР занимают всего несколько секунд.

Разветвленная структура дендритов делает их весьма привлекательными для сенсорных приложений. Применение дендритов для ГКР-диагностики исследовалось в ряде работ [105 – 107]. Так, например, в работе [108] было проанализировано применение дендритных наноструктур, сформированных методом электролиза в стекле, обогащенном

ионами серебра, для ГКР-детектирования малых концентраций вредных веществ. Полученный предел обнаружения пестицида тирама соответствовал поверхностной концентрации $4{,}6 \cdot 10^{-10}$ г/мм^2 (монослой). Коэффициент усиления комбинационного рассеяния, обеспечиваемый дендритами, составлял $4 \cdot 10^5$.

Серебро известно своими антибактериальными свойствами, что позволяет успешно использовать его в медицине и фармакологии [109]. Однако токсическое действие серебра на живые клетки может оказаться препятствием для использования подложек на основе серебряных наночастиц для ГКР-анализа биологических объектов. В этом случае можно использовать наночастицы других металлов, в частности золота. Перспективным представляется также использование биметаллических наночастиц, например, серебро-золото. Такие наночастицы смогут объединить преимущества каждого из металлов – высокую добротность ЛППР, обеспечиваемую серебром, а также химическую и биологическую инертность золота для диагностики биообъектов.

В работе [110] с использованием ионного обмена и обратной диффузии были получены ансамбли биосовместимых наночастиц сплава золота и серебра с различным содержанием серебра, пригодные для использования в качестве подложек для ГКР. Биметаллические наночастицы золото-серебро выращивали методом ионного обмена серебро-натрий в силикатном стекле с последующими нанесением на поверхность образца деперколированной золотой пленки и термообработкой. Варьирование режима термообработки позволяло менять долю серебра в наночастице и корректировать спектральное положение их локального поверхностного плазмонного резонанса в спектральном диапазоне между резонансами наночастиц золота и серебра.

Исследование жизнеспособности клеток на чистых стеклах и стеклянных подложках с наночастицами различного состава показало, что клетки, выращенные на контрольных предметных стеклах и предметных стеклах с золотыми наночастицами, а также с наночастицами, имеющими долю серебра 40 – 50 мас. %, демонстрируют одинаковую жизнеспособность в пределах референтной точности. При этом для подложек с чисто серебряными наночастицами было зарегистрировано заметное снижение жизнеспособности и примерно 100%-е падение функциональности/адгезии [110].

Перспективные направления развития

Универсальность процесса ионного обмена в стекле открывает новые перспективы его применения в области плазмоники и фотоники, некоторые из которых уже находятся в стадии разработки, а другие еще только начинают изучаться.

Интегрированная фотонная платформа. Ионный обмен в стекле – это одна из основных технологических платформ для производства недорогих и высокопроизводительных планарных волноводов [111]. Этот процесс, который обычно включает обмен ионов K^+ или Ag^+ на ионы Na^+ в стекле, создает локальное увеличение показателя преломления, формируя основу для каналирования световой волны. Эта технология развивалась в течение последних 30 лет, что позволило создать широкий спектр устройств для телекоммуникаций, оптической обработки информации и сенсорики [112]. Волноводные структуры включают как пассивные, так и активные компоненты. Пассивные устройства, такие как направленные ответвители, решетки и оптические разветвители, были многократно успешно продемонстрированы [113]. Активные устройства, такие как интегрированные оптические усилители и лазеры, изготавливаются путем легирования стекла ионами редкоземельных элементов (например, неодима Nd^{3+}) и последующего создания волноводов с помощью ионного обмена [114]. Одним из наиболее интересных направлений можно считать применение этой технологии в квантовой фотонике. В перспективе стоит использовать ионообменные волноводы для реализации квантовых схем для криптографии и задач квантовой обработки, интегрируя их с лазерами из ионообменного стекла на одном чипе. Это позволяет рассматривать ионообменное стекло как перспективную платформу для «квантовой интегральной оптики» [115].

Гибкая фотоника на основе стекла. Концепция «гибкой фотоники» представляет собой новый этап для создания устройств на основе ионообменного стекла [116]. Это направление рассматривается как альтернатива гибкой фотонике на полимерной основе, которая имеет свои недостатки: ограниченный диапазон показателей преломления, поглощение в

ближнем ИК-диапазоне и низкую химическую стабильность. Хотя стекло традиционно считается твердым материалом, возможность создания тонких ионообменных слоев открывает перспективу создания фотонных компонентов на гибких стеклянных подложках. Идея состоит в том, что технологию ионного обмена можно адаптировать для создания гибких фотонных структур на основе коммерческого стекла, при сохранении низких оптических потерь и химической стабильности.

Для устройств гибкой фотоники возможно использование сверхтонких листов коммерческого стекла (например, Willow Glass от Corning толщиной менее 100 мкм [117]), демонстрирующих высокое качество поверхности и гибкость, подобную листу бумаги. Для упрочнения этих ультратонких стекол предлагается использовать метод ионного обмена. Для щелочных стекол классический ионный обмен (например, $Na^+ \leftrightarrow K^+$) создает на поверхности сжимающие напряжения, которые компенсируют микротрещины при изгибе, позволяя достигать меньших радиусов изгиба без разрушения. Это открывает путь к созданию полностью стеклянных гибких устройств для портативной электроники.

Фотонные устройства с ионами/наночастицами благородных металлов. Еще одна перспектива процесса ионообменного формирования наночастиц и кластеров металлов связана с возможностью создания недорогих фотонных систем с улучшенными характеристиками для широкого спектра применений. В частности, внесение ионов благородных металлов (Ag, Au) методом ионного обмена в объем или на поверхность микрорезонаторов с модами шепчущей галереи (WGM) (микросфер, микродисков) из многокомпонентных стекол позволяет придать новые свойства этим устройствам. Возможность нуклеации и выращивания наноструктур благородных металлов (в виде димерных кластеров и/или металлических наночастиц размером в несколько нанометров) внутри активной среды резонатора, изготовленного из стекла, легированного ионами редкоземельных элементов, после ионного обмена и термической постобработки может повысить люминесцентную эффективность редкоземельного элемента и его излучение за счет поверхностного плазмонного резонанса и/или механизмов переноса энергии, как это наблюдалось для планарных подложек [118, 119]. Более того, усиление сигнала на конвертированной частоте происходит внутри того же микрорезонатора, который, поддерживая высокую плотность световой энергии, позволяет фотонам многократно взаимодействовать как с ионами редкоземельных элементов, так и с металлическими наноструктурами, обычно расположенными на расстоянии нескольких десятков/сотен нанометров ниже поверхности резонатора, в пределах поля действия волноводных мод. Если эти наноструктуры представлены небольшими плазмонными наночастицами (например, размером в несколько нанометров), то может произойти комбинация двух резонансных явлений: связанного с микрорезонатором волноводных мод и плазмонного резонанса наночастиц; это приведет к дальнейшему значительному усилению сигнала.

Наличие наночастиц благородных металлов, внедренных в полость волновода в стекле, также может способствовать усилению нелинейного оптического отклика среды из-за наличия плазмонных эффектов. Например, наночастицы серебра с их высокой нелинейностью третьего порядка стоят на первом месте для разработки полностью оптических устройств обработки сигналов, таких как эффективные оптические ограничители, которые требуют материалов с высоким нелинейным показателем преломления $n^{(2)}$ [120].

Квантовая и когерентная плазмоника. В этой области внимание исследователей смещается от простого усиления поля плазмонными наночастицами к использованию квантовых явлений, таких как фазовая когерентность и сильная связь между плазмонами и другими квазичастицами (экситонами, электрон-дырочными парами). Это открывает путь к созданию элементов для квантовых компьютеров на графеновых плазмонах и новых типов нанофотонных устройств [121]. Квантовая плазмоника позволяет создавать источники одиночных фотонов, транзисторы посредством фотонной блокады и нанолазеры (спазеры) с беспороговой генерацией. Гибридные плазмонно-фотонные схемы поддерживают генерацию, манипулирование и детектирование одиночных плазмонов на чипе [122, 123].

Заключение

Наноструктуры, демонстрирующие плазмонные резонансы, имеют широкий спектр практических приложений: от визуализации концентрации глюкозы в крови до

детектирования токсичных веществ и диагностики вирусных инфекций. Эффективность плазмонно-усиленных сенсоров непосредственно зависит от геометрии плазмонных структур и методов их изготовления. Существенно, что параметры наноструктур можно легко адаптировать к различным приложениям посредством выбора материала и морфологии структуры. Особенно следует отметить простоту и дешевизну изготовления плазмонных наноструктур в стеклах методом ионного обмена. Все вышеизложенное обеспечивает необходимую гибкость при разработке различных сенсоров, использующих плазмонное усиление электрического поля и открывает большие возможности для использования таких устройств. Развитие плазмоники обеспечит еще более эффективные усиление и визуализацию сигналов, получаемых от исследуемых веществ и разработку новых устройств детектирования химических и биологических соединений на основе флуоресценции и ГКР.

Благодарность

Авторы выражают глубокую благодарность доктору физико-математических наук Андрею Александровичу Липовскому, профессору, заведующему кафедрой функциональных микро- и наноматериалов Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова, за плодотворное обсуждение материалов статьи, которое способствовало улучшению ее качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bass M.** Handbook of optics. Vol. I: Geometrical and physical optics, polarized light, components and instruments. New York: McGraw-Hill, Inc., 1996. 1628 p.

2. **Bohm D., Pines D.** A collective description of electron interactions: III. Coulomb interactions in a degenerate electron gas // Physical Review. 1953. Vol. 92. No. 3. Pp. 609–625.

3. **Albella P., Garcia-Cueto B., González F., Moreno F., Wu P. C., Kim T.-H., Brown A., Yang Y., Everitt H. O., Videen G.** Shape matters: Plasmonic nanoparticle shape enhances interaction with dielectric substrate // Nano Letters. 2011. Vol. 11. No. 9. Pp. 3531–3537.

4. **Jain P. K., El-Sayed M. A.** Surface plasmon resonance sensitivity of metal nanostructures: Physical basis and universal scaling in metal nanoshells // The Journal of Physical Chemistry C. 2007. Vol. 111. No. 47. Pp. 17451–17454.

5. **Scherbak S. A., Shustova O. V., Zhurikhina V. V., Lipovskii A. A.** Electric properties of hemispherical metal nanoparticles: Influence of the dielectric cover and substrate // Plasmonics. 2015. Vol. 10. No. 3. Pp. 519–527.

6. **Rich R.** Advances in surface plasmon resonance biosensor analysis // Current Opinion in Biotechnology. 2000. Vol. 11. No. 1. Pp. 54–61.

7. **Écija-Arenas Á., Kirchner E.-M., Hirsch T., Fernández-Romero J. M.** Development of an aptamer-based SPR-biosensor for the determination of kanamycin residues in foods // Analytica Chimica Acta. 2021. Vol. 1169. 18 July. P. 338631.

8. **Zayats A. V., Smolyaninov I. I.** Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localized surface plasmons // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2003. Vol. 5. No. 4. Pp. S16–S50.

9. **Kosubukin V. A.** Size dependence of light-field enhancement caused by surface plasmon excitation // Physics Letters A. 1991. Vol. 160. No. 6. Pp. 584–588.

10. **Климов В. В.** Наноплазмоника. 2-е изд. М.: Физматлит, 2010. 480 с.

11. **Novotny L.** Effective wavelength scaling for optical antennas // Physical Review Letters. 2007. Vol. 98. No. 26. P. 266802.

12. **Russell K.J., Liu T.-L., Cui S., Hu E.L.** Large spontaneous emission enhancement in plasmonic nanocavities // Nature Photonics. 2012. Vol. 6. No. 7. Pp. 459–462.

13. **Fan M., Andrade G. F. S., Brolo A. G.** A review on the fabrication of substrates for surface enhanced Raman spectroscopy and their applications in analytical chemistry // Analytica Chimica Acta. 2011. Vol. 693. No. 1–2. Pp. 7–25.

14. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред. Сб. статей под ред. Аграновича В. М. и Миллса Д. Л. М.: Наука, 1985. 525 с.

15. **Zayats A. V., Smolyaninov I. I., Maradudin A. A.** Nano-optics of surface plasmon polaritons // Physics Reports. 2005. Vol. 408. No. 3–4. Pp. 131–314.

16. **Bolduc O. R., Pelletier J. N., Masson J.-F.** SPR biosensing in crude serum using ultralow fouling binary patterned peptide SAM // Analytical Chemistry. 2010. Vol. 82. No. 9. Pp. 3699–3706.

17. **Homola J., Yee S. S., Gauglitz G.** Surface plasmon resonance sensors: Review // Sensors and Actuators B: Chemical. 1999. Vol. 54. No. 1–2. Pp. 3–15.

18. **Monzón-Hernández D., Villatoro J., Talavera D., Luna-Moreno D.** Optical-fiber surface-plasmon resonance sensor with multiple resonance peaks // Applied Optics. 2004. Vol. 43. No. 6. P. 1216.

19. **Díez A., Andrés M. V., Cruz J. L.** In-line fiber-optic sensors based on the excitation of surface plasma modes in metal-coated tapered fibers // Sensors and Actuators B: Chemical. 2001. Vol. 73. No. 2–3. Pp. 95–99.

20. **Mayer K. M., Hafner J. H.** Localized surface plasmon resonance sensors // Chemical Reviews. 2011. Vol. 111. No. 6. Pp. 3828–3857.

21. **Becker J., Trügler A., Jakab A., Hohenester U., Sönnichsen C.** The optimal aspect ratio of gold nanorods for plasmonic bio-sensing // Plasmonics. 2010. Vol. 5. No. 2. Pp. 161–167.

22. **Hohenester U.** Nano and quantum optics: An introduction to basic principles and theory (Book series “Graduate texts in physics”). Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2020. 665 p.

23. **Daniel W. L., Han M. S., Lee J.-S., Mirkin C. A.** Colorimetric nitrite and nitrate detection with gold nanoparticle probes and kinetic end points // Journal of the American Chemical Society. 2009. Vol. 131. No. 18. Pp. 6362–6363.

24. **Zhang J., Wang L., Pan D., Song S., Boey F. Y. C., Zhang H., Fan C.** Visual cocaine detection with gold nanoparticles and rationally engineered aptamer structures // Small. 2008. Vol. 4. No. 8. Pp. 1196–1200.

25. **Storhoff J. J., Elghanian R., Mucic R. C., Mirkin C. A., Letsinger R. L.** One-pot colorimetric differentiation of polynucleotides with single base imperfections using gold nanoparticle probes // Journal of the American Chemical Society. 1998. Vol. 120. No. 9. Pp. 1959–1964.

26. **Qin X., Yuan C.-L., Shi R., Wang S.-Z., Wang Y.-L.** Colorimetric detection of dopamine based on iodine-mediated etching of gold nanorods // Chinese Journal of Analytical Chemistry. 2021. Vol. 49. No. 1. Pp. 60–67.

27. **Li M., Cushing S. K., Wu N.** Plasmon-enhanced optical sensors: a review // The Analyst. 2015. Vol. 140. No. 2. Pp. 386–406.

28. **Kinkhabwala A., Yu Z., Fan S., Avlasevich Y., Müllen K., Moerner W. E.** Large single-molecule fluorescence enhancements produced by a bowtie nanoantenna // Nature Photonics. 2009. Vol. 3. No. 11. Pp. 654–657.

29. **Xie F., Pang J. S., Centeno A., Ryan M. P., Riley D. J., Alford N. M.** Nanoscale control of Ag nanostructures for plasmonic fluorescence enhancement of near-infrared dyes // Nano Research. 2013. Vol. 6. No. 7. Pp. 496–510.

30. **Vo-Dinh T.,** SERS chemical sensors and biosensors: new tools for environmental and biological analysis // Sensors and Actuators B: Chemical. 1995. Vol. 29. No. 1–3. Pp. 183–189.

31. **Zhurikhina V., Skvortsov A., Babich E., Redkov A.** Raman spectroscopy of amino acids using metal nanoisland films on glass // Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). IEEE, 14–15 October, St. Petersburg, Russian Federation, 2021. Pp. 168–170.

32. **Li M., Cushing S. K., Zhang J., Lankford J., Aguilar Z. P., Ma D., Wu N.** Shape-dependent surface-enhanced Raman scattering in gold–Raman-probe–silica sandwiched nanoparticles for biocompatible applications // Nanotechnology. 2012. Vol. 23. No. 11. P. 115501.

33. **Zong S., Wang Z., Chen H., Yang J., Cui Y.** Surface enhanced Raman scattering traceable and glutathione responsive nanocarrier for the intracellular drug delivery // Analytical Chemistry. 2013. Vol. 85. No. 4. Pp. 2223–2230.

34. **Ko E., Hwang J., Kim J. H., Lee J. H., Lee S. H., Tran V.-K., Chung W. S., Park C. H., Choo J., Seong G. H.** Electrochemical fabrication of nanostructures on porous silicon for biochemical sensing platforms // Analytical Sciences. 2016. Vol. 32. No. 6. Pp. 681–686.

35. **Babich E., Scherbak S., Lubyankina E., Zhurikhina V., Lipovskii A.** Power spectral density analysis for optimizing SERS structures // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 2. P. 593.

36. **Batista E., Dos Santos D. P., Andrade G. F. S., Sant'Ana A. C., Brolo A. G., Temperini M. L. A.** Using polycarbonate membranes as templates for the preparation of au nanostructures for surface-enhanced Raman scattering // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2009. Vol. 9. No. 5. Pp. 3233–3238.

37. **Miller E. N., Palm D. C., De Silva D., Parbatani A., Meyers A. R., Williams D. L., Thompson D. E.** Microsphere lithography on hydrophobic surfaces for generating gold films that exhibit infrared localized surface plasmon resonances // The Journal of Physical Chemistry B. 2013. Vol. 117. No. 49. Pp. 15313–15318.

38. **Zhurikhina V. V., Brunkov P. N., Melehin V. G., Kaplas T., Svirko Y., Rutckaia V. V., Lipovskii A. A.** Self-assembled silver nanoislands formed on glass surface via out-diffusion for multiple usages in SERS applications // Nanoscale Research Letters. 2012. Vol. 7. 17 December. P. 676.

39. **Babich E., Scherbak S., Asonkeng F., Maurer T., Lipovskii A.** Hot spot statistics and SERS performance of self-assembled silver nanoisland films // Optical Materials Express. 2019. Vol. 9. No. 10. P. 4090.

40. **Babich E., Raskhodchikov D., Redkov A., Hmima A., Nashchekin A., Lipovskii A.** Dendritic structures by glass electrolysis: Studies and SERS capability // Current Applied Physics. 2021. Vol. 24. April. Pp. 54–59.

41. **Skvortsov A., Babich E., Redkov A., Lipovskii A., Zhurikhina V.** Stable in biocompatible buffers silver nanoisland films for SERS // Biosensors. 2021. Vol. 11. No. 11. P. 448.

42. **Babich E., Reduto I., Redkov A., Reshetov I., Zhurikhina V., Lipovskii A.** Thermal poling of glasses to fabricate masks for ion exchange // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1695. 28 December. P. 012107.

43. **Babich E. S., Gangrskaia E. S., Reduto I. V., Béal J., Redkov A. V., Maurer T., Lipovskii A. A.** Self-assembled silver nanoparticles in glass microstructured by poling for SERS application // Current Applied Physics. 2019. Vol. 19. No. 10. Pp. 1088–1095.

44. **Ломоносов М. В.** Избранные философские произведения. М.: Госполитиздат, 1950. 759 с.

45. **Padovani S., Sada C., Mazzoldi P., Brunetti B., Borgia I., Sgamellotti A., Giulivi A., D'Acapito F., Battaglin G.** Copper in glazes of Renaissance luster pottery: Nanoparticles, ions, and local environment // Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 93. No. 12. Pp. 10058–10063.

46. **Zachariasen W. H.** The atomic arrangement in glass // Journal of the American Chemical Society. 1932. Vol. 54. No. 10. Pp. 3841–3851.

47. **Gy R.** Ion exchange for glass strengthening // Materials Science and Engineering: B. 2008. Vol. 149. No. 2. Pp. 159–165.

48. **Giallorenzi T. G., West E. J., Kirk R., Ginther R., Andrews R. A.** Optical waveguides formed by thermal migration of ions in glass // Applied Optics. 1973. Vol. 12. No. 6. P. 1240.

49. **Ashley P. R., Bloemer M. J., Davis J. H.** Measurement of nonlinear properties in Ag-ion exchange waveguides using degenerate four-wave mixing // Applied Physics Letters. 1990. Vol. 57. No. 15. Pp. 1488–1490.

50. **Berger A.** Concentration and size depth profile of colloidal silver particles in glass surfaces produced by sodium-silver ion-exchange // Journal of Non-Crystalline Solids. 1992. Vol. 151. No. 1–2. Pp. 88–94.

51. **Cheng Z., Liu L., Xu S., Lu M., Wang X.** Temperature dependence of electrical and thermal conduction in single silver nanowire // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. 02 June. P. 10718.

52. **Singh S. P., Karmakar B.** Single-step synthesis and surface plasmons of bismuth-coated spherical to hexagonal silver nanoparticles in dichroic Ag: Bismuth glass nanocomposites // Plasmonics. 2011. Vol. 6. No. 3. Pp. 457–467.

53. **Epifani M., Giannini C., Tapfer L., Vasanelli L.** Sol–gel synthesis and characterization of Ag and Au nanoparticles in SiO_2, TiO_2, and ZrO_2 thin films // Journal of the American Ceramic Society. 2000. Vol. 83. No. 10. Pp. 2385–2393.

54. **De Marchi G., Mattei G., Mazzoldi P., Sada C., Miotello A.** Two stages in the kinetics of gold cluster growth in ion-implanted silica during isothermal annealing in oxidizing atmosphere // Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 92. No. 8. Pp. 4249–4254.

55. **Chen Y., Jaakola J. J., Säynätjoki A., Tervonen A., Honkanen S.** Glass-embedded silver nanoparticle patterns by masked ion-exchange process for surface-enhanced Raman scattering // Journal of Raman Spectroscopy. 2011. Vol. 42. No. 5. Pp. 936–940.

56. **Redkov A. V., Zhurikhina V. V., Lipovskii A. A.** Formation and self-arrangement of silver nanoparticles in glass via annealing in hydrogen: The model // Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. Vol. 376. 15 September. Pp. 152–157.

57. **Abdel-Hameed S. A. M., Fathi A. M.** Preparation and characterization of silver nanoparticles within silicate glass ceramics via modification of ion exchange process // Journal of Alloys and Compounds. 2010. Vol. 498. No. 1. Pp. 71–76.

58. **Gonella F., Quaranta A., Cattaruzza E., Padovani S., Sada C., D'Acapito F., Maurizio C.** Cu-alkali ion exchange in glass: a model for the copper diffusion based on XAFS experiments // Computational Materials Science. 2005. Vol. 33. No. 1–3. Pp. 31–36.

59. **Дёмичев И. А., Сидоров А. И., Никоноров Н. В.** Особенности оптических свойств диффузионных слоев, полученных при последовательном обмене ионов натрия на ионы меди и серебра в силикатном стекле // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 11. С. 66–70.

60. **Sgibnev Y. M., Nikonorov N. V., Ignatiev A. I.** Luminescence of silver clusters in ion-exchanged cerium-doped photo-thermo-refractive glasses // Journal of Luminescence. 2016. Vol. 176. August. Pp. 292–297.

61. **Sgibnev Y., Nikonorov N., Ignatiev A.** Governing functionality of silver ion-exchanged photo-thermo-refractive glass matrix by small additives // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 9. P. 3891.

62. **Simo A., Polte J., Pfänder N., Vainio U., Emmerling F., Rademann K.** Formation mechanism of silver nanoparticles stabilized in glassy matrices // Journal of the American Chemical Society. 2012. Vol. 134. No. 45. Pp. 18824–18833.

63. **Qu X., Li Y., Li L., Wang Y., Liang J., Liang J.** Fluorescent gold nanoclusters: synthesis and recent biological application // Journal of Nanomaterials. 2015. Vol. 2015. 13 August. P. 84097.

64. **Саратовский А. С., Гирсова М. А., Анфимова И. Н., Антропова Т. В.** Формирование молекулярных кластеров серебра полимерно-солевым методом в пористых стеклах // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131. № 1. С. 92–94.

65. **Kaganovskii Yu., Lipovskii A., Rosenbluh M., Zhurikhina V.** Formation of nanoclusters through silver reduction in glasses: The model // Journal of Non-Crystalline Solids. 2007. Vol. 353. No. 22–23. Pp. 2263–2271.

66. **Redkov A., Chervinskii S., Baklanov A., Reduto I., Zhurikhina V., Lipovskii A.** Plasmonic molecules via glass annealing in hydrogen // Nanoscale Research Letters. 2014. Vol. 9. 08 November. P. 606.

67. **Chervinskii S., Sevriuk V., Reduto I., Lipovskii A.** Formation and 2D-patterning of silver nanoisland film using thermal poling and out-diffusion from glass // Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 114. No. 22. P. 224301.

68. **Hofmeister H., Thiel S., Dubiel M., Schurig E.** Synthesis of nanosized silver particles in ion-exchanged glass by electron beam irradiation // Applied Physics Letters. 1997. Vol. 70. No. 13. Pp. 1694–1696.

69. **Espiau de Lamaestre R., Béa1 H., Bernas H., Belloni J., Marignier J. L.** Irradiation-induced Ag nanocluster nucleation in silicate glasses: Analogy with photography // Physical Review B. 2007. Vol. 76. No. 20. P. 205431.

70. **Zhang J., Dong W., Qiao L., Li J., Zheng J., Sheng J.** Silver nanocluster formation in soda-lime silicate glass by X-ray irradiation and annealing // Journal of Crystal Growth. 2007. Vol. 305. No. 1. Pp. 278–284.

71. **Farah K., Hosni F., Mejri A., Boizot B., Hamzaoui A. H., Ben Ouada H.** Effect of gamma rays absorbed doses and heat treatment on the optical absorption spectra of silver ion-exchanged silicate glass // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2014. Vol. 323. 15 March. Pp. 36–41.

72. **Евстропьев С. К., Никоноров Н. В., Салимов Ш. К., Эшбеков А. А., Юдин Д. М.** Спектры ЭПР щелочносиликатных стекол, подвергнутых ионному обмену и гамма-облучению // Физика и химия стекла. 1991. Т. 17. № 1. С. 126–129.

73. **Kaganovsky Y. S., Antonov I., Ianetz D., Rosenbluh M., Ihlemann J., Müller S. G., Marowsky G., Lipovskii A. A.** Mass transfer in optical nanocomposites induced by pulsed laser irradiation // Solid State Phenomena. 2003. Vol. 94. June. Pp. 105–114.

74. **Marquestaut N., Petit Y., Royon A., Mounaix P., Cardinal T., Canioni L.** Three-dimensional silver nanoparticle formation using femtosecond laser irradiation in phosphate glasses: Analogy with photography // Advanced Functional Materials. 2014. Vol. 24. No. 37. Pp. 5824–5832.

75. **Rosenbluh M., Antonov I., Ianetz D., Kaganovskii Yu., Lipovskii A. A.** Microfabrication of structures by laser light in metal-doped glasses // Optical Materials. 2003. Vol. 24. No. 1–2. Pp. 401–410.

76. **Lo Faro M. J., D'Andrea C., Leonardi A. A., Morganti D., Irrera A., Fazio B.** Fractal silver dendrites as 3D SERS platform for highly sensitive detection of biomolecules in hydration conditions // Nanomaterials. 2019. Vol. 9. No. 11. P. 1630.

77. **Wang D., Astruc D.** Dendritic catalysis – Basic concepts and recent trends // Coordination Chemistry Reviews. 2013. Vol. 257. No. 15–16. Pp. 2317–2334.

78. **Zhou Y., Yu S. H., Wang C. Y., Li X. G., Zhu Y. R., Chen Z. Y.** A novel ultraviolet irradiation photoreduction technique for the preparation of single-crystal Ag nanorods and Ag dendrites // Advanced Materials. 1999. Vol. 11. No. 10. Pp. 850–852.

79. **Lee G.-J., Shin S.-I., Oh S.-G.** Preparation of silver dendritic nanoparticles using sodium polyacrylate in aqueous solution // Chemistry Letters. 2004. Vol. 33. No. 2. Pp. 118–119.

80. **Gutés A., Carraro C., Maboudian R.** Silver dendrites from galvanic displacement on commercial aluminum foil as an effective SERS substrate // Journal of the American Chemical Society. 2010. Vol. 132. No. 5. Pp. 1476–1477.

81. **Zhu J., Liu S., Palchik O., Koltypin Y., Gedanken A.** Shape-controlled synthesis of silver nanoparticles by pulse sonoelectrochemical methods // Langmuir. 2000. Vol. 16. No. 16. Pp. 6396–6399.

82. **Брунков П. Н., Липовский А. А., Мелехин В. Г., Редьков А. В., Стаценко В. В.** Формирование серебряных фрактальных структур в ионообменных стеклах при полинге // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 2. С. 112–117.

83. **Grand J., de la Chapelle M. L., Bijeon J.-L., Adam P.-M., Vial A., Royer P.** Role of localized surface plasmons in surface-enhanced Raman scattering of shape-controlled metallic particles in regular arrays // Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics. 2005. Vol. 72. No. 3. P. 033407.

84. **Li P., Long F., Chen W., Chen J., Chu P. K., Wang H.** Fundamentals and applications of surface-enhanced Raman spectroscopy – based biosensors // Current Opinion in Biomedical Engineering. 2020. Vol. 13. March. Pp. 51–59.

85. **Mosier-Boss P.** Review of SERS substrates for chemical sensing // Nanomaterials. 2017. Vol. 7. No. 6. P. 142.

86. **Cheng W. D., Wu Z. J., Gu X. H., Lin F., Xing X. Q., Mo G., Wu Z. H.** GISAXS study on the size and distribution evolutions of Ag nanoparticles in ion-exchange glass during annealing // Materials Chemistry and Physics. 2015. Vol. 152. 15 February. Pp. 48–53.

87. **Inozemtsev V. A., Dokukin M. E., Sgibnev Y. M., Sherstyukova E. A., Kandrashina S. S., Shvedov M. A., Shelaev A. V., Nikonorov N. V., Sergunova V. A., Baryshev A. V.** Na-Ag ion-exchanged glass substrates for plasmon-enhanced fluorescence imaging of neutrophils // Sensors. 2025. Vol. 25. No. 7. P. 2278.

88. **Kolobkova E., Kuznetsova M. S., Nikonorov N.** Ag/Na ion exchange in fluorophosphate glasses and formation of Ag nanoparticles in the bulk and on the surface of the glass // ACS Applied Nano Materials. 2019. Vol. 2. No. 11. Pp. 6928–6938.

89. **Simo A., Joseph V., Fenger R., Kneipp J., Rademann K.** Long-term stable silver subsurface ion-exchanged glasses for SERS applications // ChemPhysChem. 2011. Vol. 12. No. 9. Pp. 1683–1688.

90. **Zhao J., Lin J., Zhang W., Wei H., Chen Y.** SERS-active Ag nanoparticles embedded in glass prepared by a two-step electric field-assisted diffusion // Optical Materials. 2015. Vol. 39. January. Pp. 97–102.

91. **Huang H., Hu A., Sivayoganathan M., Duley W. W., Huang Z. H., Zhou Y.** Femtosecond laser fabrication of silver plasmonic structures for application as single particle SERS detectors // Materials Research Express. 2014. Vol. 1. No. 2. P. 025022.

92. **Yao Y., Zhao Y., Zhang H., Pan W., Liang W., Jiang Y., Yan X., Yan Y.** Ultrafast laser-induced 1T′/2H-MoTe2 nanopattern with Au-nanoclusters for Raman monitoring of cellular drug metabolism // ACS Nano. 2025. Vol. 19. No. 17. Pp. 16732–16743.

93. **Lun Y., Zhao B., Geng Y., Du W., Zhao X., Wang X.** Reusable SERS platform of femtosecond laser processed substrate for detection of malachite green // Molecules. 2024. Vol. 29. No. 21. P. 5053.

94. **Ushkov A., Belozerova N., Dyubo D., et al.** Laser-synthesized amorphous $PdSe_{2-x}$ nanoparticles: A defect-rich platform for high-efficiency SERS, photocatalysis, and photothermal conversion // Advanced Materials Interfaces. 2026. 7 December. P. e00902.

95. **Chou S. Y., Krauss P. R., Renstrom P. J.** Nanoimprint lithography // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 1996. Vol. 14. No. 6. Pp. 4129–4133.

96. **Guo L. J.** Nanoimprint lithography: Methods and material requirements // Advanced Materials. 2007. Vol. 19. No. 4. Pp. 495–513.

97. **Cottat M., Lidgi-Guigui N., Tijunelyte I., Barbillon G., Hamouda F., Gogol P., Aassime A., Lourtioz J.-M., Bartenlian B., de la Chapelle M. L.** Soft UV nanoimprint lithography-designed highly sensitive substrates for SERS detection // Nanoscale Research Letters. 2014. Vol. 9. 21 November. P. 623.

98. **Malekian B., Xiong K., Emilsson G., Andersson J., Fager C., Olsson E., Larsson-Langhammer E., Dahlin A.** Fabrication and characterization of plasmonic nanopores with cavities in the solid support // Sensors. 2017. Vol. 17. No. 6. P. 1444.

99. **Gonçalves M. R., Makaryan T., Enderle F., Wiedemann S., Plettl A., Marti O., Ziemann P.** Plasmonic nanostructures fabricated using nanosphere-lithography, soft-lithography and plasma etching // Beilstein Journal of Nanotechnology. 2011. Vol. 2. Pp. 448–458.

100. **Bandarenka H. V., Girel K. V., Zavatski S. A., Panarin A., Terekhov S. N.** Progress in the development of SERS-active substrates based on metal-coated porous silicon // Materials. 2018. Vol. 11. No. 5. P. 852.

101. **Lai Y., Wang J., He T., Sun S.** Improved surface enhanced Raman scattering for nanostructured silver on porous silicon for ultrasensitive determination of 2,4,6-Trinitrotoluene // Analytical Letters. 2014. Vol. 47. No. 5. Pp. 833–842.

102. **Hu Y., Zhou Y., Luo G., Li D., Qu M.** Femtosecond laser-induced nanoparticle implantation into flexible substrate for sensitive and reusable microfluidics SERS detection // International Journal of Extreme Manufacturing. 2024. Vol. 6. No. 4. P. 045005.

103. **Skvortsov A., Babich E., Lipovskii A., Redkov A., Yang G., Zhurikhina V.** Raman scattering study of amino acids adsorbed on a silver nanoisland film // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 14. P. 5455.

104. **Fatkhutdinova L. I., Babich E., Boldyrev K., et al.** Rapid and sensitive detection of nucleoprotein SARS-CoV-2 virus: SERS vs ELISA // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. 2023. Vol. 57. December. P. 101172.

105. **Yakimchuk D. V., Kaniukov E. Yu., Lepeshov S., et al.** Self-organized spatially separated silver 3D dendrites as efficient plasmonic nanostructures for surface-enhanced Raman spectroscopy applications // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126. No. 23. P. 233105.

106. **He L., Lin M., Li H., Kim N.-J.** Surface-enhanced Raman spectroscopy coupled with dendritic silver nanosubstrate for detection of restricted antibiotics // Journal of Raman Spectroscopy. 2010. Vol. 41. No. 7. Pp. 739–744.

107. **Dies H., Raveendran J., Escobedo C., Docoslis A.** In situ assembly of active surface-enhanced Raman scattering substrates via electric field-guided growth of dendritic nanoparticle structures // Nanoscale. 2017. Vol. 9. No. 23. Pp. 7847–7857.

108. **Lubyankina E. A., Babich E. S., Lipovskii A. A.** Pesticides detection by SERS using dendritic structures grown in glass // St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16. No. 1.1. Pp. 374–379.

109. **Antsiferova A. A., Kashkarov P. K., Koval'chuk M. V.** Effect of different forms of silver on biological objects // Nanobiotechnology Reports. 2022. Vol. 17. No. 2. Pp. 155–164.

110. **Babich E., Scherbak S., Kirilenko D., Kondratev V., Stupin D., Lipovskii A.** Glasses with biocompatible Au/Ag NPs of governed composition // Journal of Physics D: Applied Physics. 2024. Vol. 57. No. 13. P. 135302.

111. **Broquin J.-E., Honkanen S.** Integrated photonics on glass: A review of the ion-exchange technology achievements // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 10. P. 4472.

112. **Righini G. C., Licares J.** Active and quantum integrated photonic elements by ion exchange in glass // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 11. P. 5222.

113. **Yinlei H., Minghua W., Xihua L., Jianyi Y., Xiaoqing J., Qiang Z.** Recent development of ion-exchanged glass waveguide technology // 2006 Asian Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference. 24–27 October, Shanghai, China, IEEE, 2006. Pp. 1–10.

114. **Conti G. N., Peyghambarian N., Ferrari M., Montagna M., Righini G. C., Brenci M., Forastiere M. A., Pelli S., Ricci G.** Rare-earth-doped glasses and ion-exchanged integrated optical amplifiers and lasers // Philosophical Magazine B. 2002. Vol. 82. No. 6. Pp. 721–734.

115. **Prieto-Blanco X., Montero-Orille C., Linares J., Gonzalez-Nunez H., Balado D.** Quantum projectors implemented with optical directional couplers in ion-exchanged glasses // Journal of Lightwave Technology. 2022. Vol. 40. No. 23. Pp. 7676–7684.

116. **Berneschi S., Righini G. C., Pelli S.** Towards a glass new world: The role of ion-exchange in modern technology // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 10. P. 4610.

117. **Righini G. C., Ferrari M., Lukowiak A., Macrelli G.** Flexible glass: Myth and photonic technology // Materials. 2025. Vol. 18. No. 9. P. 2010.

118. **Huang Y., Zhuang S., Peng L., Wu J., Liao T., Xu C., Duan Y.** Efficiency improvement of up-conversion luminescence of Yb^{3+}/Tm^{3+} co-doped tellurite glass microsphere // Journal of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 748. 5 June. Pp. 93–99.

119. **Singh S. K., Giri N. K., Rai D. K., Rai S. B.** Enhanced upconversion emission in Er^{3+}-doped tellurite glass containing silver nanoparticles // Solid State Sciences. 2010. Vol. 12. No. 8. Pp. 1480–1483.

120. **Mai H. H., Kaydashev V. E., Tikhomirov V. K., Janssens E., Shestakov M. V., Meledina M., Turner S., Van Tendeloo G., Moshchalkov V. V., Lievens P.** Nonlinear optical properties of Ag nanoclusters and nanoparticles dispersed in a glass host // The Journal of Physical Chemistry C. 2014. Vol. 118. No. 29. Pp. 15995–16002.

121. **Alonso Calafell I., Cox J. D., Radonjić M., Saavedra J. R. M., García de Abajo F. J., Rozema L. A., Walther P.** Quantum computing with graphene plasmons // npj Quantum Information. 2019. Vol. 5. 02 May. P. 37.

122. **Bozhevolnyi S. I., Mortensen N. A.** Plasmonics for emerging quantum technologies // Nanophotonics. 2017. Vol. 6. No. 5. Pp. 1185–1188.

123. **Tame M. S., McEnery K. R., Özdemir Ş. K., Lee J., Maier S. A., Kim M. S.** Quantum Plasmonics // Nature Physics. 2013. Vol. 9. No. 6. Pp. 329–344.

REFERENCES

1. **Bass M.,** Handbook of optics, Vol. I: Geometrical and physical optics, polarized light, components and instruments. McGraw-Hill, Inc., New York, 1996.

2. **Bohm D., Pines D.,** A collective description of electron interactions: III. Coulomb interactions in a degenerate electron gas, Phys. Rev. 92 (3) (1953) 609–625.

3. **Albella P., Garcia-Cueto B., González F., et al.,** Shape matters: Plasmonic nanoparticle shape enhances interaction with dielectric substrate, Nano Lett. 11 (9) (2011) 3531–3537.

4. **Jain P. K., El-Sayed M. A.,** Surface plasmon resonance sensitivity of metal nanostructures: Physical basis and universal scaling in metal nanoshells, J. Phys. Chem. C. 111 (47) (2007) 17451–17454.

5. **Scherbak S. A., Shustova O. V., Zhurikhina V. V., Lipovskii A. A.,** Electric properties of hemispherical metal nanoparticles: Influence of the dielectric cover and substrate, Plasmonics. 10 (3) (2015) 519–527.

6. **Rich R.,** Advances in surface plasmon resonance biosensor analysis, Curr. Opin. Biotechnol. 11 (1) (2000) 54–61.

7. **Écija-Arenas Á., Kirchner E.-M., Hirsch T., Fernández-Romero J. M.,** Development of an aptamer-based SPR-biosensor for the determination of kanamycin residues in foods, Anal. Chim. Acta. 1169. (18 Jul) (2021) 338631.

8. **Zayats A. V., Smolyaninov I. I.,** Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localized surface plasmons, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 5 (4) (2003) S16–S50.

9. **Kosubukin V. A.,** Size dependence of light-field enhancement caused by surface plasmon excitation, Phys. Lett. A. 160 (6) (1991) 584–588.

10. **Klimov V.,** Nanoplasmonics, Jenny Stanford Publishing, Singapore, 2014.

11. **Novotny L.,** Effective wavelength scaling for optical antennas, Phys. Rev. Lett. 98 (26) (2007) 266802.

12. **Russell K. J., Liu T.-L., Cui S., et al.,** Large spontaneous emission enhancement in plasmonic nanocavities, Nat. Photonics. 6 (7) (2012) 459–462.

13. **Fan M., Andrade G. F. S., Brolo A. G.,** A review on the fabrication of substrates for surface enhanced Raman spectroscopy and their applications in analytical chemistry, Anal. Chim. Acta. 693 (1–2) (2011) 7–25.

14. **Agranovich V. M., Mills D. L.,** Surface polaritons: Electromagnetic waves at surfaces and interfaces, Elsevier, New York, 2012.

15. **Zayats A. V., Smolyaninov I. I., Maradudin A. A.,** Nano-optics of surface plasmon polaritons, Phys. Rep. 408 (3–4) (2005) 131–314.

16. **Bolduc O. R., Pelletier J. N., Masson J.-F.,** SPR biosensing in crude serum using ultralow fouling binary patterned peptide SAM, Anal. Chem. 82 (9) (2010) 3699–3706.

17. **Homola J., Yee S. S., Gauglitz G.,** Surface plasmon resonance sensors: Review, Sens. Actuator B – Chem. 54 (1–2) (1999) 3–15.

18. **Monzón-Hernández D., Villatoro J., Talavera D., et al.,** Optical-fiber surface-plasmon resonance sensor with multiple resonance peaks, Appl. Opt. 43 (6) (2004) 1216.

19. **Díez A., Andrés M. V., Cruz J. L.,** In-line fiber-optic sensors based on the excitation of surface plasma modes in metal-coated tapered fibers, Sens. Actuator B – Chem. 73 (2–3) (2001) 95–99.

20. **Mayer K. M., Hafner J. H.**, Localized surface plasmon resonance sensors, Chem. Rev. 111 (6) (2011) 3828–3857.

21. **Becker J., Trügler A., Jakab A., et al.,** The optimal aspect ratio of gold nanorods for plasmonic bio-sensing, Plasmonics. 5 (2) (2010) 161–167.

22. **Hohenester U.,** Nano and quantum optics: Graduate texts in physics. Cham: Springer International Publishing, 2020.

23. **Daniel W. L., Han M. S., Lee J.-S., et al.,** Colorimetric nitrite and nitrate detection with gold nanoparticle probes and kinetic end points, J. Am. Chem. Soc. 131 (18) (2009) 6362–6363.

24. **Zhang J., Wang L., Pan D., et al.,** Visual cocaine detection with gold nanoparticles and rationally engineered aptamer structures, Small. 4 (8) (2008) 1196–1200.

25. **Storhoff J. J., Elghanian R., Mucic R. C., et al.,** One-pot colorimetric differentiation of polynucleotides with single base imperfections using gold nanoparticle probes, J. Am. Chem. Soc. 120 (9) (1998) 1959–1964.

26. **Qin X., Yuan C.-L., Shi R., et al.,** Colorimetric detection of dopamine based on iodine-mediated etching of gold nanorods, Chin. J. Anal. Chem. 49 (1) (2021) 60–67.

27. **Li M., Cushing S. K., Wu N.,** Plasmon-enhanced optical sensors: A review, Analyst. 140 (2) (2015) 386–406.

28. **Kinkhabwala A., Yu Z., Fan S., et al.,** Large single-molecule fluorescence enhancements produced by a bowtie nanoantenna, Nat. Photon. 3 (11) (2009) 654–657.

29. **Xie F., Pang J. S., Centeno A., et al.,** Nanoscale control of Ag nanostructures for plasmonic fluorescence enhancement of near-infrared dyes, Nano Res. 6 (7) (2013) 496–510.

30. **Vo-Dinh T.,** SERS chemical sensors and biosensors: new tools for environmental and biological analysis, Sens. Actuator B – Chem. 29 (1–3) (1995) 183–189.

31. **Zhurikhina V., Skvortsov A., Babich E., et al.,** Raman spectroscopy of amino acids using metal nanoisland films on glass, Proc. the 2021 Int. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), IEEE, 14–15 Oct., St. Petersburg, Russian Federation (I2021) 168–170.

32. **Li M., Cushing S. K., Zhang J., et al.,** Shape-dependent surface-enhanced Raman scattering in gold–Raman-probe–silica sandwiched nanoparticles for biocompatible applications, Nanotechnol. 23 (11) (2012) 115501.

33. **Zong S., Wang Z., Chen H., et al.,** Surface enhanced Raman scattering traceable and glutathione responsive nanocarrier for the intracellular drug delivery, Anal. Chem. 85 (4) (2013) 2223–2230.

34. **Ko E., Hwang J., Kim J. H., et al.,** Electrochemical fabrication of nanostructures on porous silicon for biochemical sensing platforms, Anal. Sci. 32 (6) (2016) 681–686.

35. **Babich E., Scherbak S., Lubyankina E., et al.,** Power spectral density analysis for optimizing SERS structures, Sensors. 22 (2) (2022) 593.

36. **Batista E., Dos Santos D. P., Andrade G. F. S., et al.,** Using polycarbonate membranes as templates for the preparation of au nanostructures for surface-enhanced Raman scattering, J. Nanosci. Nanotechnol. 9 (5) (2009) 3233–3238.

37. **Miller E. N., Palm D. C., De Silva D., et al.,** Microsphere lithography on hydrophobic surfaces for generating gold films that exhibit infrared localized surface plasmon resonances, J. Phys. Chem B. 117 (49) (2013) 15313–15318.

38. **Zhurikhina V. V., Brunkov P. N., Melehin V. G., et al.,** Self-assembled silver nanoislands formed on glass surface via out-diffusion for multiple usages in SERS applications, Nanoscale Res. Lett. 7 (17 Dec) (2012) 676.

39. **Babich E., Scherbak S., Asonkeng F., et al.,** Hot spot statistics and SERS performance of self-assembled silver nanoisland films, Opt. Mater. Express. 9 (10) (2019) 4090.

40. **Babich E., Raskhodchikov D., Redkov A., et al.,** Dendritic structures by glass electrolysis: Studies and SERS capability, Curr. Appl. Phys. 24 (Apr) (2021) 54–59.

41. **Skvortsov A., Babich E., Redkov A., et al.,** Stable in biocompatible buffers silver nanoisland films for SERS, Biosensors. 11 (11) (2021) 448.

42. **Babich E., Reduto I., Redkov A., et al.,** Thermal poling of glasses to fabricate masks for ion exchange, J. Phys.: Conf. Ser. 1695 (28 Dec) (2020) 012107.

43. **Babich E. S., Gangrskaia E. S., Reduto I. V., et al.,** Self-assembled silver nanoparticles in glass microstructured by poling for SERS application, Curr. Appl. Phys. 19 (10) (2019) 1088–1095.

44. **Lomonosov M. V.,** Izbrannyye filosofskiye proizvedeniya [Selected philosophical works], Gospolitizdat Publishing, Moscow, 1950 (in Russian).

45. **Padovani S., Sada C., Mazzoldi P., et al.,** Copper in glasses of Renaissance luster pottery: Nanoparticles, ions, and local environment, J. Appl. Phys. 93 (12) (2003) 10058–10063.

46. **Zachariasen W. H.,** The atomic arrangement in glass, J. Am. Chem. Soc. 54 (10) (1932) 3841–3851.

47. **Gy R.,** Ion exchange for glass strengthening, Mater. Sci. Eng. B. 149 (2) (2008) 159–165.

48. **Giallorenzi T. G., West E. J., Kirk R., et al.,** Optical waveguides formed by thermal migration of ions in glass, Appl. Opt. 12 (6) (1973) 1240.

49. **Ashley P. R., Bloemer M. J., Davis J. H.,** Measurement of nonlinear properties in Ag-ion exchange waveguides using degenerate four-wave mixing, Appl. Phys. Lett. 57 (15) (1990) 1488–1490.

50. **Berger A.,** Concentration and size depth profile of colloidal silver particles in glass surfaces produced by sodium-silver ion-exchange, J. Non-Cryst. Solids. 151 (1–2) (1992) 88–94.

51. **Cheng Z., Liu L., Xu S., et al.,** Temperature dependence of electrical and thermal conduction in single silver nanowire, Sci. Rep. 5 (02 Jun) (2015) 10718.

52. **Singh S. P., Karmakar B.,** Single-step synthesis and surface plasmons of bismuth-coated spherical to hexagonal silver nanoparticles in dichroic Ag: Bismuth glass nanocomposites, Plasmonics. 6 (3) (2011) 457–467.

53. **Epifani M., Giannini C., Tapfer L., et al.,** Sol–gel synthesis and characterization of Ag and Au nanoparticles in SiO_2, TiO_2, and ZrO_2 thin films, J. Am. Cer. Soc. 83 (10) (2000) 2385–2393.

54. **De Marchi G., Mattei G., Mazzoldi P., et al.,** Two stages in the kinetics of gold cluster growth in ion-implanted silica during isothermal annealing in oxidizing atmosphere, J. Appl. Phys. 92 (8) (2002) 4249–4254.

55. **Chen Y., Jaakola J. J., Säynätjoki A., et al.,** Glass-embedded silver nanoparticle patterns by masked ion-exchange process for surface-enhanced Raman scattering, J. Raman Spectrosc. 42 (5) (2011) 936–940.

56. **Redkov A. V., Zhurikhina V. V., Lipovskii A. A.,** Formation and self-arrangement of silver nanoparticles in glass via annealing in hydrogen: The model, J. Non-Cryst. Solids. 376 (15 Sept) (2013) 152–157.

57. **Abdel-Hameed S. A. M., Fathi A. M.,** Preparation and characterization of silver nanoparticles within silicate glass ceramics via modification of ion exchange process, J. Alloys Compnd. 498 (1) (2010) 71–76.

58. **Gonella F., Quaranta A., Cattaruzza E., et al.,** Cu-alkali ion exchange in glass: a model for the copper diffusion based on XAFS experiments, Comput. Mater. Sci. 33 (1–3) (2005) 31–36.

59. **Demichev I. A., Sidorov A. I., Nikonorov N. V.,** Features of the optical properties of diffusion layers obtained by successive replacement of sodium ions with copper and silver ions in silicate glass, J. Opt. Technol. 82 (11) (2015) 767.

60. **Sgibnev Y. M., Nikonorov N. V., Ignatiev A. I.,** Luminescence of silver clusters in ion-exchanged cerium-doped photo-thermo-refractive glasses, J. Luminesc. 176 (Aug) (2016) 292–297.

61. **Sgibnev Y., Nikonorov N., Ignatiev A.** Governing functionality of silver ion-exchanged photo-thermo-refractive glass matrix by small additives, Appl. Sci. 11 (9) (2021) 3891.

62. **Simo A., Polte J., Pfänder N., et al.,** Formation mechanism of silver nanoparticles stabilized in glassy matrices, J. Am. Chem. Soc. 134 (45) (2012) 18824–18833.

63. **Qu X., Li Y., Li L., et al.,** Fluorescent gold nanoclusters: Synthesis and recent biological application, J. Nanomater. 2015 (13 Aug) (2015) 84097.

64. **Saratovskiy A. S., Girsova M. A., Anfimova I. A., Antropova T. V.,** Formation of molecular clusters of silver by polymer-salt method in porous glasses, Opt. Spectrosc. 131 (1) (2023) 92–94 (in Russian).

65. **Kaganovskii Y., Lipovskii A., Rosenbluh M., et al.,** Formation of nanoclusters through silver reduction in glasses: The model, J. Non-Cryst. Solids. 353 (22–23) (2007) 2263–2271.

66. **Redkov A., Chervinskii S., Baklanov A., et al.,** Plasmonic molecules via glass annealing in hydrogen, Nanoscale Res. Lett. 9 (08 Nov) (2014) 606.

67. **Chervinskii S., Sevriuk V., Reduto I., et al.,** Formation and 2D-patterning of silver nanoisland film using thermal poling and out-diffusion from glass, J. Appl. Phys. 114 (22) (2013) 224301.

68. **Hofmeister H., Thiel S., Dubiel M., et al.,** Synthesis of nanosized silver particles in ion-exchanged glass by electron beam irradiation, Appl. Phys. Lett. 70 (13) (1997) 1694–1696.

69. **Espiau de Lamaestre R., Béa1 H., Bernas H., et al.,** Irradiation-induced Ag nanocluster nucleation in silicate glasses: Analogy with photography, Phys. Rev. B. 76 (20) (2007) 205431.

70. **Zhang J., Dong W., Qiao L., et al.,** Silver nanocluster formation in soda-lime silicate glass by X-ray irradiation and annealing, J. Cryst. Growth. 305 (1) (2007) 278–284.

71. **Farah K., Hosni F., Mejri A., et al.,** Effect of gamma rays absorbed doses and heat treatment on the optical absorption spectra of silver ion-exchanged silicate glass, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B. 323 (15 Mar) (2014) 36–41.

72. **Evstropiev S. K., Nikonorov N. V., Salimov Sh., et al.,** Spektry EPR shchelochnosilikatnykh stekol, podvergnutykh ionnomu obmenu i gamma-oblucheniyu [ESR spectra of alkali-silicate glasses subjected to ion exchange and gamma irradiation], Fizika i Khimiya Stekla [Physics and Chemistry of Glass]. 17 (1) (1991) 126–129 (in Russian).

73. **Kaganovsky Y. S., Antonov I., Ianetz D., et al.,** Mass transfer in optical nanocomposites induced by pulsed laser irradiation // Solid State Phenomena. 2003. Vol. 94. Pp. 105–114.

74. **Marquestaut N., Petit Y., Royon A., et al.,** Three-dimensional silver nanoparticle formation using femtosecond laser irradiation in phosphate glasses: Analogy with photography, Adv. Funct. Mater. 24 (37) (2014) 5824–5832.

75. **Rosenbluh M., Antonov I., Ianetz D., et al.,** Microfabrication of structures by laser light in metal-doped glasses, Opt. Mater. 24 (1–2) (2005) 401–410.

76. **Lo Faro M. J., D'Andrea C., Leonardi A. A., et al.**, Fractal silver dendrites as 3D SERS platform for highly sensitive detection of biomolecules in hydration conditions, Nanomater. 9 (11) (2019) 1630.

77. **Wang D., Astruc D.,** Dendritic catalysis – Basic concepts and recent trends, Coord. Chem. Rev. 257 (15–16) (2013) 2317–2334.

78. **Zhou Y., Yu S. H., Wang C. Y., et al.,** A novel ultraviolet irradiation photoreduction technique for the preparation of single-crystal Ag nanorods and Ag dendrites, Adv. Mater. 11 (10) (1991) 850–852.

79. **Lee G.-J., Shin S.-I., Oh S.-G.,** Preparation of silver dendritic nanoparticles using sodium polyacrylate in aqueous solution, Chem. Lett. subjected to ion exchange and gamma irradiation

80. **Gutés A., Carraro C., Maboudian R.,** Silver dendrites from galvanic displacement on commercial aluminum foil as an effective SERS substrate, J. Am. Chem. Soc. 132 (5) (2010) 1476–1477.

81. **Zhu J., Liu S., Palchik O., et al.,** Shape-controlled synthesis of silver nanoparticles by pulse sonoelectrochemical methods, Langmuir. 16 (16) (2000) 6396–6399.

82. **Brunkov P. N., Lipovskii A. A., Melekhin V. G., et al.,** Formation of silver fractal structures in ion-exchange glasses under poling, Tech. Phys. 60 (2) (2015) 270–274.

83. **Grand J., De la Chapelle M. L., Bijeon J.-L., et al.,** Role of localized surface plasmons in surface-enhanced Raman scattering of shape-controlled metallic particles in regular arrays, Phys. Rev. B: Condens. Matter. 72 (3) (2005) 033407.

84. **Li P., Long F., Chen W., et al.,** Fundamentals and applications of surface-enhanced Raman spectroscopy–based biosensors, Current Opinion in Biomedical Engineering. 13 (2020) 51–59.

85. **Mosier-Boss P.,** Review of SERS substrates for chemical sensing, Nanomater. 7 (6) (2017) 142.

86. **Cheng W. D., Wu Z.J., Gu X.H., et al.,** GISAXS study on the size and distribution evolutions of Ag nanoparticles in ion-exchange glass during annealing, Mater. Chem. Phys. 152 (2015) 48–53.

87. **Inozemtsev V. A., Dokukin M. E., Sgibnev Y. M., et al.,** Na-Ag ion-exchanged glass substrates for plasmon-enhanced fluorescence imaging of neutrophils, Sensors. 25 (7) (2025) 2278.

88. **Kolobkova E., Kuznetsova M. S., Nikonorov N.,** Ag/Na ion exchange in fluorophosphate glasses and formation of Ag nanoparticles in the bulk and on the surface of the glass, ACS Appl. Nano Mater. 2 (11) (2019) 6928–6938.

89. **Simo A., Joseph V., Fenger R., et al.,** Long-term stable silver subsurface ion-exchanged glasses for SERS applications, ChemPhysChem. 12 (9) (2011) 1683–1688.

90. **Zhao J., Lin J., Zhang W., et al.,** SERS-active Ag nanoparticles embedded in glass prepared by a two-step electric field-assisted diffusion, Opt. Mater. 39 (Jan) (2015) 97–102.

91. **Huang H., Hu A., Sivayoganathan M., et al.,** Femtosecond laser fabrication of silver plasmonic structures for application as single particle SERS detectors, Mater. Res. Express. 1 (2) (2014) 025022.

92. **Yao Y., Zhao Y., Zhang H., et al.,** Ultrafast laser-induced 1T′/2H-MoTe2 nanopattern with Au-nanoclusters for Raman monitoring of cellular drug metabolism, ACS Nano. 19 (17) (2025) 16732–16743.

93. **Lun Y., Zhao B., Geng Y., et al.,** Reusable SERS platform of femtosecond laser processed substrate for detection of malachite green, Molecules. 29 (21) (2024) 5053.

94. **Ushkov A., Belozerova N., Dyubo D., et al.,** Laser-synthesized amorphous $PdSe_{2-x}$ nanoparticles: A defect-rich platform for high-efficiency SERS, photocatalysis, and photothermal conversion, Adv. Mater. Interfaces. (7 Dec) (2026) e00902.

95. **Chou S. Y., Krauss P. R., Renstrom P. J.,** Nanoimprint lithography, J. Vac. Sci. Technol. B. 14 (6) (1996) 4129–4133.

96. **Guo L. J.,** Nanoimprint lithography: Methods and material requirements, Adv. Mater. 19 (4) (2007) 495–513.

97. **Cottat M., Lidgi-Guigui N., Tijunelyte I., et al.,** Soft UV nanoimprint lithography-designed highly sensitive substrates for SERS detection, Nanoscale Res. Lett. 9 (21 Nov) (2014) 623.

98. **Malekian B., Xiong K., Emilsson G., et al.,** Fabrication and characterization of plasmonic nanopores with cavities in the solid support, Sensors. 17 (6) (2017) 1444.

99. **Gonçalves M. R., Makaryan T., Enderle F., et al.,** Plasmonic nanostructures fabricated using nanosphere-lithography, soft-lithography and plasma etching, Beilstein J. Nanotechnol. 2 (2011) 448–458.

100. **Bandarenka H. V., Girel K. V., Zavatski S. A., et al.,** Progress in the development of SERS-active substrates based on metal-coated porous silicon, Materials. 11 (5) (2018) 852.

101. **Lai Y., Wang J., He T., et al.,** Improved surface enhanced Raman scattering for nanostructured silver on porous silicon for ultrasensitive determination of 2,4,6-Trinitrotoluene, Anal. Lett. 47 (5) (2014) 833–842.

102. **Hu Y., Zhou Y., Luo G., et al.,** Femtosecond laser-induced nanoparticle implantation into flexible substrate for sensitive and reusable microfluidics SERS detection, Int. J. Extrem. Manuf. 6 (4) (2024) 045005.

103. **Skvortsov A., Babich E., Lipovskii A., et al.,** Raman scattering study of amino acids adsorbed on a silver nanoisland film, Sensors. 22 (14) (2022) 5455.

104. **Fatkhutdinova L. I., Babich E., Boldyrev K., et al.,** Rapid and sensitive detection of nucleoprotein SARS-CoV-2 virus: SERS vs ELISA, Photonic. Nanostruct. 57 (Dec) (2023) 101172.

105. **Yakimchuk D. V., Kaniukov E. Yu., Lepeshov S., et al.,** Self-organized spatially separated silver 3D dendrites as efficient plasmonic nanostructures for surface-enhanced Raman spectroscopy applications, J. Appl. Phys. 126 (23) (2019) 233105.

106. **He L., Lin M., Li H., et al.,** Surface-enhanced Raman spectroscopy coupled with dendritic silver nanosubstrate for detection of restricted antibiotics, J. Raman Spectrosc. 41 (7) (2010) 739–744.

107. **Dies H., Raveendran J., Escobedo C., et al.,** In situ assembly of active surface-enhanced Raman scattering substrates via electric field-guided growth of dendritic nanoparticle structures, Nanoscale. 9 (23) (2017) 7847–7857.

108. **Babich E. S., Lipovskii A. A., Lubyankina E. A.,** Pesticides detection by SERS using dendritic structures grown in glass, St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. 16 (1.1) (2023) 374–379.

109. **Antsiferova A. A., Kashkarov P. K., Koval'chuk M. V.,** Effect of different forms of silver on biological objects, Nanobiotechnol. Rep. 17 (2) (2022) 155–164.

110. **Babich E., Scherbak S., Kirilenko D., et al.,** Glasses with biocompatible Au/Ag NPs of governed composition, J. Phys. D: Appl. Phys. 57 (13) (2024) 135302.

111. **Broquin J.-E., Honkanen S.,** Integrated photonics on glass: A review of the ion-exchange technology achievements, Appl. Sci. 11 (10) (2021) 4472.

112. **Righini G. C., Licares J.,** Active and quantum integrated photonic elements by ion exchange in glass, Appl. Sci. 11 (11) (2021) 5222.

113. **Yinlei H., Minghua W., Xihua L., et al.,** Recent development of ion-exchanged glass waveguide technology, 2006 Asian Optical Fiber Commun. & Optoelectronic Exposition & Conf., 24 – 27 Oct., Shanghai, China, IEEE (2006) 1–10.

114. **Conti G. N., Peyghambarian N., Ferrari M., et al.,** Rare-earth-doped glasses and ion-exchanged integrated optical amplifiers and lasers, Phil. Mag. B. 82 (6) (2002) 721–734.

115. **Prieto-Blanco X., Montero-Orille C., Linares J., et al.,** Quantum projectors implemented with optical directional couplers in ion-exchanged glasses, J. Lightwave Technol. 40 (23) (2022) 7676–7684.

116. **Berneschi S., Righini G. C., Pelli S.,** Towards a glass new world: The role of ion-exchange in modern technology, Appl. Sci. 11 (10) (2021) 4610.

117. **Righini G. C., Ferrari M., Lukowiak A., et al.,** Flexible glass: Myth and photonic technology, Materials. 18 (9) (2025) 2010.

118. **Huang Y., Zhuang S., Peng L., et al.,** Efficiency improvement of up–conversion luminescence of Yb^{3+}/Tm^{3+} co-doped tellurite glass microsphere, J. Alloys Compnd. 748 (5 Jun) (2018) 93–99.

119. **Singh S. K., Giri N.K., Rai D.K., et al.,** Enhanced upconversion emission in Er^{3+}-doped tellurite glass containing silver nanoparticles, Solid State Sci. 12 (8) (2010) 1480–1483.

120. **Mai H. H., Kaydashev V. E., Tikhomirov V. K., et al.,** Nonlinear optical properties of Ag nanoclusters and nanoparticles dispersed in a glass host, J. Phys. Chem. C. 118 (29) (2014) 15995–16002.

121. **Alonso Calafell I., Cox J. D., Radonjić M., et al.,** Quantum computing with graphene plasmons, npj Quantum Inf. 5 (02 May) (2019) 37.

122. **Bozhevolnyi S. I., Mortensen N. A.,** Plasmonics for emerging quantum technologies, Nanophotonics. 6 (5) (2017) 1185–1188.

123. **Tame M. S., McEnery K. R., Özdemir Ş. K., et al.,** Quantum plasmonics, Nat. Phys. 9 (6) (2013) 329–344.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖУРИХИНА Валентина Владимировна – *доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, ведущий научный сотрудник лаборатории оптики гетерогенных структур и оптических материалов Академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.*

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

zhurihina_vv@spbstu.ru

ORCID: 0000-0003-0685-9409

БАБИЧ Екатерина Сергеевна – *кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптики гетерогенных структур и оптических материалов Академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.*

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

babich.katherina@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4970-2591

ТЕРПИЦКИЙ Алексей Николаевич – *инженер лаборатории оптики гетерогенных структур и оптических материалов Академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.*

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

terpiczkij@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1744-5976

НУРИТДИНОВ Иззатилло – *доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан.*
100214, Республика Узбекистан, г. Ташкент, поселок Улугбек
izzatilloh@yahoo.com
ORCID: 0000-0002-9749-8751

РАХМАТОВ Машраб Анвар оглы – *аспирант кафедры физики твердого тела Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова, г. Самарканд, Республика Узбекистан.*
140100, Республика Узбекистан, г. Самарканд, Университетский б-р, 15
mashrab-r@gmail.com

ЭШБЕКОВ Азамкул Анорбоевич – *доктор физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова, г. Самарканд, Республика Узбекистан.*
140100, Республика Узбекистан, г. Самарканд, Университетский б-р, 15
eshbekov-a@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8283-791X

THE AUTHORS

ZHURIKHINA Valentina V.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Alferov University, RAS
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
zhurihina_vv@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-0685-9409

BABICH Ekaterina S.
Alferov University, RAS
8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
babich.katherina@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4970-2591

TERPITSKIY Alexey N.
Alferov University, RAS
8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
terpiczkij@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1744-5976

NURITDINOV Izzatillo
Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Ulugbek settlement, Tashkent, 100214, Republic of Uzbekistan
izzatilloh@yahoo.com
ORCID: 0000-0002-9749-8751

RAKHMATOV Mashrab A. ogly
Sharof Rashidov Samarkand State University
15 University Blvd., Samarkand, 140100, Republic of Uzbekistan
mashrab-r@gmail.com

ESHBEKOV A'zamkul A.
Sharof Rashidov Samarkand State University
15 University Blvd, Samarkand, 140100, Republic of Uzbekistan
eshbekov-a@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8283-791X

Статья поступила в редакцию 21.11.2025. Одобрена после рецензирования 03.03.2026. Принята 03.03.2026.
Received 21.11.2025. Approved after reviewing 03.03.2026. Accepted 03.03.2026.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026