

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 538.975; 548.248; 548.232.4
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-5-615-622>

Поступило в редакцию 08.05.2018
Received 08.05.2018

Д. В. Якимчук, Е. Ю. Каниюков, В. Д. Бундюкова, С. Е. Демьянов

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Республика Беларусь*

**ПЛАЗМОННО-АКТИВНЫЕ СЕРЕБРЯНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ
В ПОРАХ ИОННО-ТРЕКОВОГО ШАБЛОНА SiO₂ НА КРЕМНИИ**

(Представлено членом-корреспондентом В. М. Федосюком)

Аннотация. На сегодняшний день интенсивно исследуется возможность усиления сигнала комбинационного рассеяния света с целью реализации простого и надежного инструмента для контроля сверхмалых концентраций химических и биологических веществ. В качестве основы усиливающих сигнал подложек могут выступать плазмонно-активные наноструктуры, степень усиления которых определяется их размером и формой. Формирование наноструктур с заранее заданной морфологией требует разработки новых методик. В связи с этим в работе рассматривается комплексный подход к получению в порах ионно-трековых шаблонов SiO₂ на кремнии плазмонно-активных серебряных наноструктур, имеющих широкий спектр форм и размеров. Рассмотрены особенности создания SiO₂-шаблонов и установлены скорости травления, однозначно определяющие параметры пор в зависимости от времени процесса. Описаны особенности формирования серебряных наноструктур в порах SiO₂-шаблона при различных размерах пор и режимах синтеза (время и температура раствора). Показана возможность создания наноструктур с различной формой и продемонстрированы закономерности эволюции их морфологии при изменении параметров синтеза. С использованием дендритов, имеющих высокий потенциал для практического применения для усиления сигнала комбинационного рассеяния света, на примере модельного аналита Nile Blue с концентрацией 10⁻⁶ моль/л продемонстрирована возможность регистрации спектров комбинационного рассеяния света. Полученные результаты свидетельствуют, что плазмонно-активные серебряные наноструктуры в порах ионно-трекового шаблона SiO₂ на кремнии могут найти применение при создании биосенсоров для регистрации сверхнизких доз химических и биологических веществ.

Ключевые слова: серебряные наноструктуры, плазмонные наноструктуры, шаблонный синтез, дендриты, комбинационное рассеяние света

Для цитирования: Плазмонно-активные серебряные наноструктуры в порах ионно-трекового шаблона SiO₂ на кремнии / Д. В. Якимчук [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 5. – С. 615–622. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-5-615-622>

Dzmitry V. Yakimchuk, Egor Yu. Kaniukov, Victoria D. Bundyukova, Sergey E. Demyanov

*Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

**PLASMON-ACTIVE SILVER NANOSTRUCTURES IN THE PORES
OF ION-TRACK TEMPLATE OF SiO₂ ON SILICON**

(Communicated by Corresponding Member Valery M. Fedosyuk)

Abstract. Today, the possibility of amplifying the signal of Raman scattering is intensively studied in order to realize a simple and reliable tool for monitoring of ultra-small concentrations of chemical and biological substances. Plasmon-active nanostructures can serve as the basic element of substrates for signal amplifying, and the degree of amplification is determined by nanostructures size and shape. The formation of nanostructures with a predetermined morphology requires the development of new approaches. In this concern, the paper considers a complex approach of plasmon-active silver nanostructures with

a wide range of shapes and sizes formation in the pores of ion-track SiO_2 templates on silicon. The peculiarities of SiO_2 templates creation are considered and the etching rates, uniquely determining the parameters of the pores as a function of the etching time, are established. The features of the silver nanostructures formation in the pores of the SiO_2 template are described for various pore sizes and synthesis regimes (time and solution temperature). The possibility of formation of nanostructures with different shapes as well as evolution of their morphology with variation of synthesis parameters is shown. On the example of dendrites, having a high potential for practical application for amplification of the Raman scattering signal, the possibility of recording Raman spectra was demonstrated using the model analyzer Nile Blue at the concentration of 10^{-6} M/l. The results indicate that plasmon-active silver nanostructures in the pores of ion-track SiO_2 template on silicon can be used as basic element of biosensors to studying ultra-low doses of chemical and biological substances.

Keywords: silver nanostructures, plasmonic nanostructures, template synthesis, dendrites, Raman scattering

For citation: Yakimchuk D. V., Kaniukov E. Yu., Bundyukova V. D., Demyanov S. E. Plasmon-active silver nanostructures in the pores of ion-track template of SiO_2 on silicon. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 5, pp. 615–622 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-5-615-622>

Введение. Интенсивное изучение спектроскопии усиленного поверхностью гигантского комбинационного (рамановского) рассеяния света (КРС) связано с возможностью его применения для анализа биологических и химических объектов в сверхмалых количествах [1; 2]. Для усиления сигнала КРС применяются наноструктуры благородных металлов, среди которых отдельно стоит выделить серебряные, обладающие наилучшими усиливающими свойствами. Сегодня принято считать, что усиление сигнала обусловлено двумя механизмами: химическим и электромагнитным [3]. Роль химического механизма заключается в изменении поляризации исследуемой молекулы, а также, в некоторых случаях, образовании комплекса металл–молекула, сопровождаемого перераспределением заряда между исследуемой молекулой и металлической структурой. Химический вклад позволяет увеличить интенсивность КРС в 10^2 – 10^3 [4] и более раз [5]. Электромагнитный механизм, обусловленный появлением на поверхности наноструктур электрических полей с высокой напряженностью («горячих точек»), может вносить гораздо больший вклад в усиление сигнала (теоретически до 10^{11} раз) [6]. «Горячие точки» представляют собой коллективные колебания свободных электронов (плазмонов), возникающих на границе металл–диэлектрик под действием внешней электромагнитной волны (лазера). Молекула исследуемого вещества, попадая в «горячую точку», испытывает КРС с гораздо большей вероятностью. «Горячие точки» возникают при условии плазмонного резонанса: совпадения частоты внешнего электромагнитного поля и частоты плазмонных колебаний. Известно, что положение и интенсивность плазмонного резонанса зависят от размера и формы плазмонной наноструктуры [7]. Управление данными параметрами возможно на этапе синтеза металлических наноструктур. Простым способом задания размера и формы структуре является шаблонный синтез.

Для шаблонного синтеза нанообъектов в основном используются матрицы пористого Al_2O_3 , поликарбонатные и полиимидные мембраны [8; 9]. Однако с точки зрения внедрения наносистем в современные технологические процессы, которые подразумевают использование как основы кремния, более перспективным является использование шаблонов на основе SiO_2 . Поры в таких оксидных слоях могут быть получены с применением ионно-трековой технологии [10; 11]. При этом важным является управление параметрами как отдельных пор (форма, диаметр, аспектное соотношение), так и всей матрицы в целом (толщина SiO_2 , поверхностная плотность пор и степень их перекрытия).

В работе предлагается комплексный подход к получению плазмонно-активных серебряных наноструктур различных размеров и форм, включающий в себя этапы создания пористых шаблонов SiO_2 на кремнии, синтез серебряных структур в различных режимах и тестирование данных структур на предмет усиления сигнала КРС.

Получение пористых матриц SiO_2 на кремнии. При прохождении быстрых тяжелых ионов в твердых телах происходит образование протяженных областей с диаметрами до 50 нм, которые характеризуются измененной плотностью вещества и деформированными химическими связями. С точки зрения скорости травления области радиационных повреждений являются приоритетными по отношению к необлученному материалу, что обуславливает возможность селективного преобразования латентных треков в поры.

В настоящем исследовании в качестве подложек для облучения использовались пластины монокристаллического кремния (p -тип, марка КДБ-12 (100) со слоем аморфного диэлектрика SiO_2 толщиной ~ 600 нм). Облучение проводилось ионами ^{132}Xe , ^{152}Sm , ^{197}Au и ^{238}U с энергией 350 МэВ и флюенсами до $5 \cdot 10^8$ см $^{-2}$ на линейном ускорителе UNILAC (GSI, Дармштадт, Германия). Выбор флюенса обуславливался необходимостью получения впоследствии пространственно-раздельных серебряных наноструктур. Энергия ионов выбиралась близкой к величинам наибольших электронных потерь, для гарантированного получения пор на этапе химического травления. Энергии электронных потерь $(dE/dx)_e$ определялись с использованием программного комплекса SRIM, широко применяемого при определении параметров трекообразования. Величины электронных потерь при выбранных энергиях облучения (350 МэВ) приведены в таблице.

Скорости травления V_T , V_B и половинный угол конуса травления θ

Etching rates V_T , V_B and half angle of the etching cone θ

Ион Ion	$(dE/dx)_e$, кэВ/нм	V_T , нм/мин	V_B , нм/мин	θ , градус
^{132}Xe	16,75	$20,4 \pm 0,5$	$5,8 \pm 0,1$	$16,5 \pm 0,5$
^{152}Sm	16,15	$21,0 \pm 0,5$	$5,8 \pm 0,1$	$16,0 \pm 0,5$
^{197}Au	21,07	$20,0 \pm 1,0$	$5,8 \pm 0,1$	$17,0 \pm 1,0$
^{238}U	23,37	$21,0 \pm 1,0$	$5,8 \pm 0,1$	$16,0 \pm 1,0$

Травление облученного оксида кремния осуществлялось в плавиковой кислоте. Определение характеристических размеров пор проводилось посредством скалывания образцов в поперечном разрезе с последующим их изучением методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL 7000F. Анализ данных показал, что при выбранных условиях травления на начальных этапах ($t = 9$ мин) на поверхности SiO_2 проявляются небольшие отверстия конической формы, находящиеся на значительном расстоянии друг от друга. С течением времени (18 мин) происходит увеличение внешних диаметров D и высоты l пор. При времени травления ~ 27 мин происходит открытие пор, т. е. толщина слоя оксида кремния L становится равной высоте пор l . В последующем (36 мин) конус становится усеченным, и отдельные поры начинают перекрываться. Продолжение травления приводит к уменьшению толщины оксида с одновременным увеличением диаметров пор и степени их перекрытия (более 45 мин). При времени травления ~ 90 мин происходит перколяция, т. е. в слое SiO_2 появляются непрерывные дорожки соединенных пор через всю поверхность образца. Дальнейшее травление приводит к полному растворению оксида кремния (~ 106 мин).

На основании количественной оценки параметров пор установлено, что все характеристики носят линейный характер. Это позволяет с высокой точностью определить скорости травления вдоль трека V_T , объемного материала V_B и половинный угол конуса травления θ (таблица), которые однозначно определяют параметры получаемых в результате травления пор. Знание скоростей травления дало возможность уточнить времена открытия пор (23 мин) и полного стравливания слоя SiO_2 (106 мин).

На основании анализа скоростей травления V_T , V_B и половинного угла конуса травления θ подложек, облученных ионами ^{132}Xe , ^{152}Sm , ^{197}Au и ^{238}U (таблица) установлено, что все параметры пор в независимости от типа облучающего иона имеют одинаковые параметры в пределах 5-процентной ошибки. Отсутствие зависимости параметров пор от типа облучающего иона (и, соответственно, от энергии электронных потерь) может быть связано с тем, что при столь больших $(dE/dx)_e$ энергия не успевает распространяться на большие расстояния. Другими словами, сначала будет происходить расплавление и испарение материала в центральной области трека и лишь потом увеличение его диаметра.

Обосновать такое положение можно на основании следующих доводов. Передача энергии налетающего иона в облучаемый материал с помощью равновесных термодинамических процессов происходит в наноскопических объемах в течение чрезвычайно короткого периода времени. Поскольку тепловое равновесие достигается через 10 атомных столкновений за время порядка

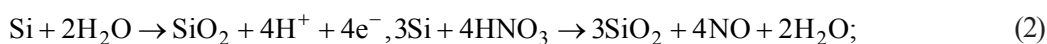
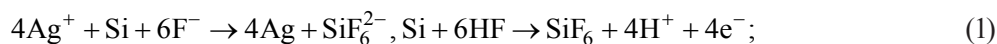
10^{-13} с, то локальное тепловое равновесие может устанавливаться лишь в пределах 0,5 нм. Так как энергия успевает распространиться на небольшие расстояния, то сначала будет происходить расплавление и испарение материала внутри трека и лишь потом увеличение его диаметра. Стоит отметить, что отсутствие зависимости диаметра поры от энергии электронного торможения при $(dE/dx)_e > 15$ КэВ/нм также отмечалось в [12].

Постоянство значений V_T , V_B и θ дает возможность получать исчерпывающую информацию о характеристических размерах пор в любой момент времени. С учетом того, что для большинства быстрых тяжелых ионов половинный угол конуса травления лежит в пределах $(18 \pm 2)^\circ$ [12], знание одной лишь скорости V_B (которую несложно определить на основании измерения толщины SiO_2) позволяет прогнозировать параметры получаемых пор.

При подготовке пористых шаблонов SiO_2 для создания Ag-наноструктур учитывалось, что нуклеация серебра происходит исключительно на кремниевой подложке. Это предопределяло выбор параметров травления, обеспечивающих гарантированное получение открытых пор.

Серебряные наноструктуры в порах SiO_2 на кремнии. Для получения серебряных наноструктур в порах SiO_2 применялось безэлектродное химическое осаждение [13]. В качестве электролита использовался водный раствор нитрата серебра (от 0,01 до 0,1 М с шагом 0,01 М) и плавиковой кислоты (5 М). Температура процесса задавалась в интервале 20–60 °С с шагом 5 °С, для чего электролит выдерживался в течение 40 мин на водяной бане до начала осаждения. Время осаждения не превышало 1 мин.

При растворении в воде AgNO_3 и HF происходит их диссоциация на катионы и анионы Ag^+ , NO_3^- , H^+ , F^- , которые участвуют в последующих химических реакциях, возможные варианты которых приведены ниже:



Из анализа уравнений химических реакций (1)–(3) очевидно, что осаждение серебра в поры происходит при одновременном протекании трех процессов: электрохимического восстановления серебра на кремнии (1) с одновременным протеканием анодного и катодного процессов, окисления кремния (2) и травления SiO_2 в плавиковой кислоте (3).

Изучение поверхности диоксида кремния с серебром, осажденным из раствора, содержащего 0,02 М AgNO_3 при $T = 40$ °С в течение $t = 30$ с в поры различного диаметра, методом СЭМ показало, что при увеличении их диаметра от 200 до 950 нм происходит изменение структуры серебряного осадка в порах от неразветвленных кристаллитов (при малых диаметрах) к «подсолнухоподобным» формам (при больших диаметрах, рис. 1). В интервале диаметров 300–700 нм имеет место образование сильно разветвленных дендритных структур. Для установления закономерностей роста дендритов проводилось изучение временной эволюции морфологии металла при осаждении в матрицу с 500 нм порами при $C_{\text{AgNO}_3} = 0,02$ М и $T = 40$ °С. Характерные СЭМ-изображения полученных наноструктур представлены на рис. 2. Видно, что на начальном этапе осаждения (1–5 с) на открытой поверхности кремния происходит нуклеация зародышей, которые с течением времени увеличивают свои латеральные размеры с выходом над поверхностью SiO_2 (5–15 с), после чего начинается образование дополнительных ответвлений на первичных кристаллах серебра (15–30 с). Продолжение процесса приводит к разрастанию осадка с образованием высокоразвитых дендритных форм. При времени более 60 с развитие структур останавливается из-за закупоривания пор металлом и предотвращения доступа электролита к кремнию.

Определение влияния температуры осаждения на форму серебряного осадка осуществлялось посредством СЭМ-исследования поверхности структур в порах диаметром 500 нм, полученных при осаждении металла в течение 15 с из раствора $C_{\text{AgNO}_3} = 0,02$ М (рис. 3). При температуре 20 °С происходит образование Ag-кристаллитов. При повышении температуры (до 35 °С) проявляется тенденция к разветвлению структуры кристаллитов, однако образования дендри-

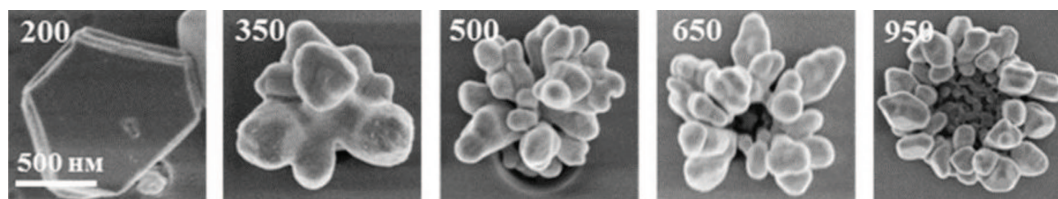


Рис. 1. Эволюция морфологии серебряных наноструктур в зависимости от диаметра пор SiO₂. Диаметры пор в нанометрах указаны в левом верхнем углу рисунков

Fig. 1. Evolution of the morphology of silver nanostructures as a function of SiO₂ pore diameter. The pore diameters in nanometers are indicated in the upper left corner of the figures

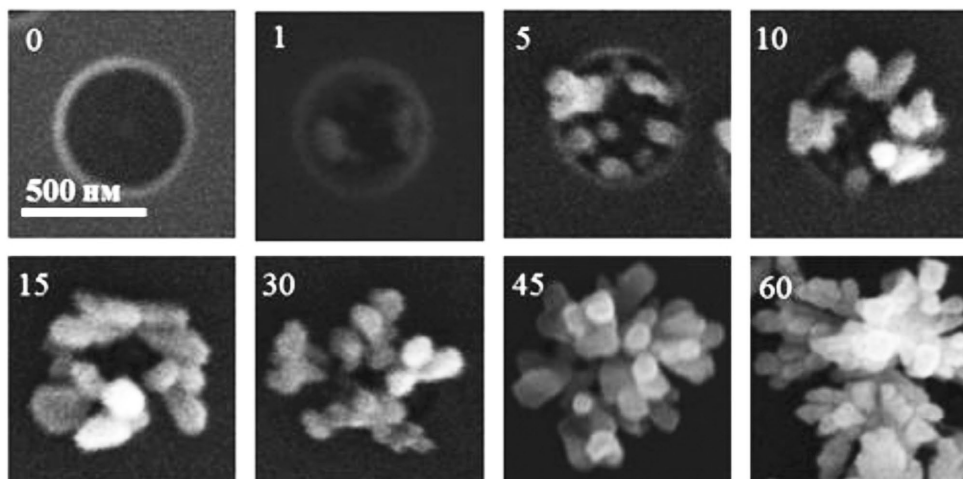


Рис. 2. Эволюция морфологии серебряных наноструктур в зависимости от времени осаждения Ag (время осаждения в секундах указано в левом верхнем углу рисунков)

Fig. 2. Evolution of the morphology of silver nanostructures as a function of the Ag deposition time (the deposition time in seconds is indicated in the upper left corner of the figures)

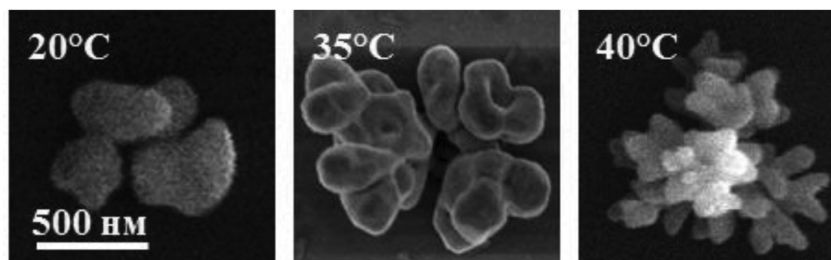


Рис. 3. Эволюция морфологии серебряных наноструктур в зависимости от температуры осаждения Ag (температура осаждения указана в левом верхнем углу рисунков)

Fig. 3. Evolution of the morphology of silver nanostructures as a function of the Ag deposition temperature (deposition temperature are indicated in the upper left corner of the figures)

тов не происходит. При $T = 40\text{--}45\text{ }^\circ\text{C}$ серебряные наноструктуры имеют наиболее развитую морфологию поверхности. Повышение температуры приводит к деградации дендритов с последующим их вырождением в кристаллиты.

Анализ зависимости формы серебряных наноструктур от геометрических параметров пор, времени осаждения и температуры электролита позволяет сделать вывод, что форма серебряных наноструктур зависит от скорости одновременно протекающих процессов, согласно (1)–(3). Знание данных закономерностей предоставляет возможность получения широкой номенклатуры серебряных наноструктур.

Усиление сигнала КРС. Среди многообразия представленных структур для усиления сигнала КРС наиболее перспективными являются дендриты, благодаря их высокоразветвленной

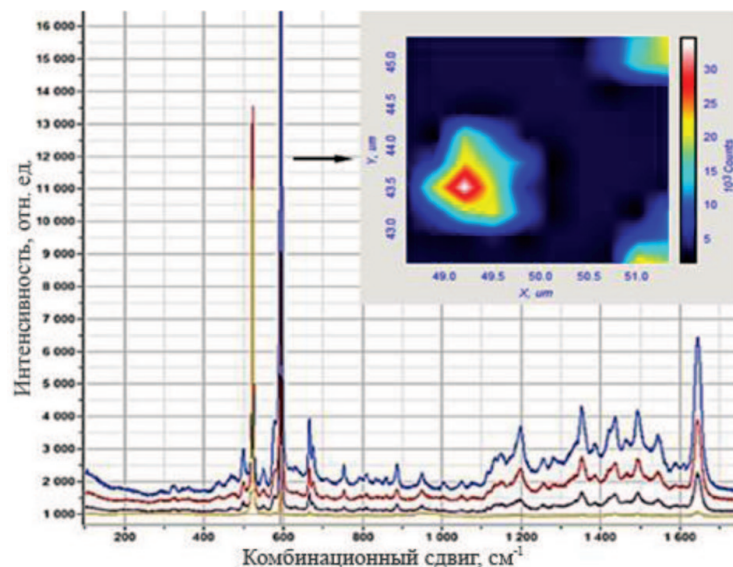


Рис. 4. Картирование спектра комбинационного рассеяния света молекулы Nile Blue с использованием усиливающей поверхности серебряных наноструктур, в порах SiO₂ на подложке кремния

Fig. 4. Mapping of the spectrum of Raman scattering of Nile Blue molecule using an amplifying surface of silver nanostructures, in pores of SiO₂ on a silicon substrate

структуре и наличию большого количества «горячих точек». Отличительной чертой данных дендритов от встречающихся в литературе [14] является то, что они не налагаются друг на друга и пространственно разделены. Таким образом, при нанесении аналита, молекулы не проникнут за другой слой дендритов (в виду его отсутствия) и будут доступны для поля лазера при проведении КРС измерений.

Тестовые эксперименты по изучению усиления сигнала КРС модельного аналита Nile Blue (C₂₀H₂₀ClN₃O) при картировании поверхности систем, содержащих серебряные дендриты в порах оксида кремния, показали возможность регистрации концентрации NB менее 10⁻⁶ М (рис. 4). Это указывает на то, что предложенные наноструктуры могут использоваться в качестве элементов для усиления КРС, применительно к биосенсорике.

Заключение. В результате проведенной работы сформированы пористые матрицы аморфного диоксида кремния на кремниевой подложке посредством химического травления высокодефектных областей в слое SiO₂, образовавшихся в результате облучения быстрыми тяжелыми ионами. Установлены скорости травления, однозначно определяющие параметры пор в зависимости от времени процесса. Параметры пор напрямую зависят от времени травления, что позволяет регулировать диаметры пор, их высоту и степень перекрытия. Выращены серебряные наноструктуры сложной формы в порах диоксида кремния. Показано, что процесс самоорганизации серебряных наноструктур в ограниченном объеме зависит от скорости реакций восстановления серебра, окисления кремния, а также травления диоксида кремния и может управляться как параметрами химического осаждения (температурой и временем осаждения), так и параметрами самой пористой матрицы (геометрические характеристики пор). Это позволяет формировать широкий ряд объектов заданной формы, включая дендриты. Эксперименты по исследованию сигнала КРС на молекулах модельного аналита Nile Blue показали возможность использования данных наноструктур для детектирования низких концентраций 10⁻⁶ М аналита, что указывает на возможность их применения в качестве плазмонно-активных подложек для спектроскопии гигантского КРС, усиленного поверхностью.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках программы «Технология СГ» (задание № 3.1.5.1).

Acknowledgements. Investigation was carried out within the framework of the “Technology SG” program (contract no. 3.1.5.1).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Halvorson, R. A. Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS) for Environmental Analyses / R. A. Halvorson, P. J. Vikesland // *Environ. Sci. Technol.* – 2010. – Vol. 44, N 20. – P. 7749–7755. <https://doi.org/10.1021/es101228z>
2. Clinical SERS: are we there yet? / K. W. Kho [et al.] // *J. Biophotonics.* – 2011. – Vol. 4, N 10. – P. 667–684. <https://doi.org/10.1002/jbio.201100047>
3. Kneipp, K. Surface-enhanced raman scattering / K. Kneipp // *Phys. Today.* – 2007. – Vol. 60, N 11. – P. 40–46. <https://doi.org/10.1063/1.2812122>
4. On the chemical bonding effects in the Raman response: Benzenethiol adsorbed on silver clusters / S. K. Saikin [et al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2009. – Vol. 11, N 41. – P. 9401–9411. <https://doi.org/10.1039/b906885f>
5. Exploring the chemical enhancement for surface-enhanced Raman scattering with Au bowtie nanoantennas / D. P. Fromm [et al.] // *J. Chem. Phys.* – 2006. – Vol. 124, N 6. – P. 61101. <https://doi.org/10.1063/1.2167649>
6. Electromagnetic theories of surface-enhanced Raman spectroscopy / S.-Y. Ding [et al.] // *Chem. Soc. Rev.* – 2017. – Vol. 46, N 13. – P. 4042. <https://doi.org/10.1039/c7cs00238f>
7. Noguez, C. Surface Plasmons on Metal Nanoparticles: The Influence of Shape and Physical Environment / C. Noguez // *J. Phys. Chem. C.* – 2007. – Vol. 111, N 10. – P. 3806–3819. <https://doi.org/10.1021/jp066539m>
8. High energy ion beam irradiation of polymers for electronic applications / D. Fink [et al.] // *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.* – 2005. – Vol. 236, N 1–4. – P. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.03.243>
9. Evolution of the polyethylene terephthalate track membranes parameters at the etching process / E. Y. Kaniukov [et al.] // *J. Contemp. Phys. (Armenian Acad. Sci.).* – 2017. – Vol. 52, N 2. – P. 155–160. <https://doi.org/10.3103/s1068337217020098>
10. Benyagoub, A. Ion tracks in amorphous silica / A. Benyagoub, M. Toulemonde // *J. Mater. Res.* – 2015. – Vol. 30, N 9. – P. 1529–1543. <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.75>
11. Tunable nanoporous silicon oxide templates by swift heavy ion tracks technology / E. Y. Kaniukov [et al.] // *Nanotechnology.* – 2016. – Vol. 27, N 11. – P. 115305. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/11/115305>
12. Devine, R. A. B. Macroscopic and microscopic effects of radiation in amorphous SiO₂ / R. A. B. Devine // *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.* – 1994. – Vol. 91, N 1–4. – P. 378–390. [https://doi.org/10.1016/0168-583x\(94\)96253-7](https://doi.org/10.1016/0168-583x(94)96253-7)
13. Silver nanocrystals with special shapes: controlled synthesis and their surface-enhanced Raman scattering properties / M. Yan [et al.] // *RSC Adv.* – 2014. – Vol. 4, N 1. – P. 98–104. <https://doi.org/10.1039/c3ra44437f>
14. Feng, C. Silver nano-dendritic crystal film: a rapid dehydration SERS substrate of totally new concept / C. Feng, Y. Zhao, Y. Jiang // *RSC Adv.* – 2015. – Vol. 5, N 6. – P. 4578–4585. <https://doi.org/10.1039/c4ra11376d>

References

1. Halvorson R. A., Vikesland P. J. Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS) for Environmental Analyses. *Environmental Science & Technology*, 2010, vol. 44, no. 20, pp. 7749–7755. <https://doi.org/10.1021/es101228z>
2. Kho K. W., Fu C. Y., Dinis U. S., Olivo M. Clinical SERS: are we there yet? *Journal of Biophotonics*, 2011, vol. 4, no. 10, pp. 667–684. <https://doi.org/10.1002/jbio.201100047>
3. Kneipp K. Surface-enhanced raman scattering. *Physics Today*, 2007, vol. 60, no. 11, pp. 40–46. <https://doi.org/10.1063/1.2812122>
4. Saikin S. K., Olivares-Amaya R., Rappoport D., Stopa M., Aspuru-Guzik A. On the chemical bonding effects in the Raman response: Benzenethiol adsorbed on silver clusters. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2009, vol. 11, no. 41, pp. 9401–9411. <https://doi.org/10.1039/b906885f>
5. Fromm D. P., Sundaramurthy A., Kinkhabwala A., Schuck P. J., Kino G. S., Moerner W. E. Exploring the chemical enhancement for surface-enhanced Raman scattering with Au bowtie nanoantennas. *Journal of Chemical Physics*, 2006, vol. 124, no. 6, pp. 61101. <https://doi.org/10.1063/1.2167649>
6. Ding S.-Y., You E.-M., Tian Z.-Q., Moskovits M. Electromagnetic theories of surface-enhanced Raman spectroscopy. *Chemical Society Reviews*, 2017, vol. 46, no. 13, pp. 4042. <https://doi.org/10.1039/c7cs00238f>
7. Noguez C. Surface Plasmons on Metal Nanoparticles: The Influence of Shape and Physical Environment. *Journal of Physical Chemistry C*, 2007, vol. 111, no. 10, pp. 3806–3819. <https://doi.org/10.1021/jp066539m>
8. Fink D., Alegaonkar P.S., Petrov A. V., Wilhelm M., Szimkowiak P., Behar M., Sinha D., Fahrner W. R., Hoppe K., Chadderton L. T. High energy ion beam irradiation of polymers for electronic applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2005, vol. 236, no. 1–4, pp. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.03.243>
9. Kaniukov E. Y., Shumskaya E. E., Yakimchuk D. V., Kozlovskiy A. L., Ibragimova M. A., Zdorovets M. V. Evolution of the polyethylene terephthalate track membranes parameters at the etching process. *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, 2017, vol. 52, no. 2, pp. 155–160. <https://doi.org/10.3103/s1068337217020098>
10. Benyagoub M., Toulemonde M. Ion tracks in amorphous silica. *Journal of Materials Research*, 2015, vol. 30, no. 9, pp. 1529–1543. <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.75>
11. Kaniukov E. Y., Ustarroz J., Yakimchuk D. V., Petrova M., Terryn H., Sivakov V., Petrov A. V. Tunable nanoporous silicon oxide templates by swift heavy ion tracks technology. *Nanotechnology*, 2016, vol. 27, no. 11, p. 115305. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/11/115305>

12. Devine R. A. B. Macroscopic and microscopic effects of radiation in amorphous SiO₂. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1994, vol. 91, no. 1–4, pp. 378–390. [https://doi.org/10.1016/0168-583x\(94\)96253-7](https://doi.org/10.1016/0168-583x(94)96253-7)

13. Yan M., Xiang Y., Liu L., Chai L., Li X., Feng T. Silver nanocrystals with special shapes: controlled synthesis and their surface-enhanced Raman scattering properties. *RSC Advances*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 98–104. <https://doi.org/10.1039/c3ra44437f>

14. Feng C., Zhao Y., Jiang Y. Silver nano-dendritic crystal film: a rapid dehydration SERS substrate of totally new concept. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, no. 6, pp. 4578–4585. <https://doi.org/10.1039/c4ra11376d>

Информация об авторах

Якимчук Дмитрий Владимирович – мл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dim2yakim@gmail.com.

Канюков Егор Юрьевич – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ka.egor@mail.ru.

Бундюкова Виктория Дмитриевна – мл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: victoria.bundyukova@gmail.com.

Демьянов Сергей Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий отделом. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: demyanov@physics.by.

Information about the authors

Yakimchuk Dmitry Vladimirovich – Junior researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dim2yakim@gmail.com.

Kaniukov Egor Yurevich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ka.egor@mail.ru.

Bundyukova Victoria Dmitrievna – Junior researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: victoria.bundyukova@gmail.com.

Demyanov Sergey Evgen'evich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant professor, Head of the Department. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: demyanov@physics.by.