

УДК 538.958, 538.975

## Зависимость сигнала гигантского комбинационного рассеяния света от формы серебряных наноструктур, выращенных в порах $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ -шаблона

Якимчук Д.В.<sup>1</sup>, Каниюков Е.Ю.<sup>1</sup>, Демьянов С.Е.<sup>1</sup>, Бундюкова В.Д.<sup>1</sup>, Дейнак А.В.<sup>2</sup>,  
Макоед И.И.<sup>2</sup>, Арзуманян Г.М.<sup>3,4</sup>, Дорошкевич Н.В.<sup>3</sup>, Маматкулов К.З.<sup>3</sup>, Сиваков В.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь

<sup>2</sup>Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина,  
бульвар Космонавтов, 21, г. Брест 224016, Беларусь

<sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований,  
ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна 141980, Россия

<sup>4</sup>Государственный университет «Дубна»,  
ул. Университетская, 19, г. Дубна 141980, Россия

<sup>5</sup>Институт фотонных технологий имени Лейбница,  
ул. А. Эйштейна, 9, г. Йена 07745, Германия

Поступила 18.07.2017

Принята к печати 23.08.2017

Гигантское комбинационное рассеяние, усиленное поверхностью, является мощным методом, применяемым в хемо- и биосенсорике. Целью данной работы являлось определение взаимосвязи сигнала гигантского комбинационного рассеяния света с формой серебряных наноструктур при воздействии лазерного излучения с различной мощностью.

Плазмонные наноструктуры синтезировались в порах диоксида кремния на подложке монокристаллического кремния  $n$ -типа, в котором поры формировались с использованием ионно-трековой технологии и селективного химического травления. Синтез серебра проводился методом безэлектродного осаждения. В качестве параметра, позволяющего управлять формой серебряного осадка в порах диоксида кремния на поверхности монокристаллического  $n$ -кремния при безэлектродном осаждении, выбрано время синтеза, которое непосредственно влияет на степень разрастания металлических наноструктур.

Анализ динамики изменения морфологии металлического осадка показал, что при увеличении времени осаждения металл эволюционирует от отдельных металлических кристаллитов внутри пор при малых временах осаждения до дендритоподобных наноструктур при больших временах. Изучена зависимость интенсивности спектров гигантского комбинационного рассеяния света от формы серебряного осадка при мощностях зеленого лазера ( $\lambda = 532$  нм) от 2,5 до 150 мкВт на модельном анализе Родамин 6Ж. Проведен анализ оптимальной формы серебряного осадка и мощности лазера с точки зрения последующего конструирования активных поверхностей для гигантского комбинационного рассеяния света при неразрушающем контроле малых концентраций веществ.

Полученные серебряные наноструктуры в порах шаблона  $\text{SiO}_2$  на кремниевой подложке  $n$ -типа могут использоваться в качестве плазмонно-активных поверхностей при неразрушающем исследовании низких концентраций веществ на малых мощностях лазера.

**Ключевые слова:** шаблонный синтез, серебряные наноструктуры, дендриты, «горячие точки», гигантское комбинационное рассеяние (ГКР).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

**Адрес для переписки:**

Якимчук Д.В.

НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: dim2yakim@gmail.com

**Address for correspondence:**

Yakimchuk D.V.

Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,  
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: dim2yakim@gmail.com

**Для цитирования:**

Якимчук Д.В., Каниюков Е.Ю., Демьянов С.Е., Бундюкова В.Д.,  
Дейнак А.В., Макоед И.И., Арзуманян Г.М., Дорошкевич Н.В.,  
Маматкулов К.З., Сиваков В.

Зависимость сигнала гигантского комбинационного рассеяния  
света от формы серебряных наноструктур, выращенных в порах  
 $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ -шаблона.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 228–235.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

**For citation:**

Yakimchuk D.V., Kaniukov E.Yu., Demyanov S.E., Bundyukova V.D.,  
Dzeinak A.V., Makoed I.I., Arzumanyan G.M., Doroshkevich N.V.,  
Mamatkulov K.Z., Sivakov V.

[Dependence of the Surface-Enhanced Raman Scattering Signal on  
the Shape of Silver Nanostructures Grown in the  $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$  Porous  
Template].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 228–235 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

# Dependence of the Surface-Enhanced Raman Scattering Signal on the Shape of Silver Nanostructures Grown in the SiO<sub>2</sub>/n-Si Porous Template

Yakimchuk D.V.<sup>1</sup>, Kaniukov E.Yu.<sup>1</sup>, Demyanov S.E.<sup>1</sup>, Bundyukova V.D.<sup>1</sup>, Dzeinak A.V.<sup>2</sup>, Makoed I.I.<sup>2</sup>, Arzumanyan G.M.<sup>3,4</sup>, Doroshkevich N.V.<sup>3</sup>, Mamatkulov K.Z.<sup>3</sup>, Sivakov V.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,  
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus

<sup>2</sup>Brest State University named after A.S. Pushkin,  
Kosmonavtov boulevard, 21, Brest 224016, Belarus

<sup>3</sup>Joint Institute for Nuclear Research,  
Joliot-Curie str., 6, Dubna 141980, Russia

<sup>4</sup>State University «Dubna»,  
Universitetskaya str., 19, Dubna 141980, Russia

<sup>5</sup>Leibniz-Institute of Photonic Technology,  
Albert Einstein str., 9, Jena 07745, Germany

Received 18.07.2017

Accepted for publication 23.08.2017

## Abstract

Surface-enhanced Raman scattering is a powerful method used in chemo- and biosensorics. The aim of this work was to determine the relationship between the signal of Surface-enhanced Raman scattering and the shape of silver nanostructures under the influence of laser radiation with different power.

Plasmonic nanostructures were synthesized in silicon dioxide pores on monocrystalline silicon *n*-type substrate. The pores were formed using ion-track technology and selective chemical etching. Silver deposition was carried out by galvanic displacement method. Synthesis time was chosen as a parameter that allows controlling the shape of a silver deposit in the pores of silicon dioxide on the surface of single-crystal *n*-silicon during electrodeless deposition. Deposition time directly effects on the shape of metal nanostructures.

Analysis of the dynamics of changing the morphology of the metal deposit showed that as the deposition time increases, the metal evolves from individual metallic crystallites within the pores at a short deposition time to dendritic-like nanostructures at a long time. The dependence of the intensity of Surface-enhanced Raman scattering spectra on the shape of the silver deposit is studied at the powers of a green laser ( $\lambda = 532$  nm) from 2.5  $\mu$ W to 150  $\mu$ W on the model dye analyte Rodamin 6G. The optimum shape of the silver deposit and laser power is analyzed from this point of view design of active surfaces for Surface-enhanced Raman scattering with nondestructive control of small concentrations of substances.

The silver nanostructures obtained in porous template SiO<sub>2</sub> on *n*-type silicon substrate could be used as plasmon-active surfaces for nondestructive investigations of substances with low concentrations at low laser powers.

**Keywords:** template synthesis, silver nanostructures, dendrites, «hot spots», SERS.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

### Адрес для переписки:

Якимчук Д.В.

НППЦ НАН Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: dim2yakim@gmail.com

### Address for correspondence:

Yakimchuk D.V.

Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,  
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: dim2yakim@gmail.com

### Для цитирования:

Якимчук Д.В., Каниуков Е.Ю., Демьянов С.Е., Бундюкова В.Д., Дейнак А.В., Макоед И.И., Арзуманян Г.М., Дорошкевич Н.В., Маматкулов К.З., Сиваков В.

Зависимость сигнала гигантского комбинационного рассеяния света от формы серебряных наноструктур, выращенных в порах SiO<sub>2</sub>/n-Si-шаблона.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 228–235.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

### For citation:

Yakimchuk D.V., Kaniukov E.Yu., Demyanov S.E., Bundyukova V.D., Dzeinak A.V., Makoed I.I., Arzumanyan G.M., Doroshkevich N.V., Mamatkulov K.Z., Sivakov V.

[Dependence of the Surface-Enhanced Raman Scattering Signal on the Shape of Silver Nanostructures Grown in the SiO<sub>2</sub>/n-Si Porous Template].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 228–235 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

## Введение

На сегодняшний день весьма актуальным является создание активных поверхностей для усиления сигнала гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света при неразрушающем исследовании малых концентраций молекулярных соединений. Принцип действия таких поверхностей основан на том, что при воздействии внешней электромагнитной волны на границе металл-диэлектрик происходит значительное увеличение локальных электрических полей, что приводит к появлению «горячих точек» [1, 2]. Этот эффект широко используется для детектирования и исследования сверхмалых количеств вещества методом ГКР [3–6], усиленного поверхностью наноструктурированных плазмонных металлов: меди, серебра и золота [7, 8]. С точки зрения практического применения наиболее интересны наноструктуры (НС) из серебра, так как среди всех металлов они имеют наибольшее сечение экстинкции, большую коррозионную стойкость относительно медных НС и невысокую стоимость относительно золотых.

Оптические свойства плазмонных НС сильно зависят от их размера, формы, типа металла, окружающей среды и межчастичного взаимодействия [9, 10]. Выбор оптимальной формы и взаимного расположения НС позволяет получать необходимое усиление сигнала в ГКР-спектроскопии, а контролировать форму НС можно за счет использования пористых шаблонов при синтезе плазмонных НС. В этом случае диаметр поры определяет процесс нуклеации, форма поры задает направление роста кристаллитов, а время синтеза – степень разрастания НС [11–13]. С точки зрения усиления оптических свойств наиболее интересными являются структуры, имеющие наибольшее количество «горячих точек», которые образуются на неровностях поверхности и в местах соединения отдельных элементов структуры [16]. Принимая во внимание факторы, влияющие на усиление сигнала ГКР, можно предположить, что предпочтительной формой плазмонных НС будет форма дендрита. Учитывая склонность серебра к дендритизации [14, 15], при подборе оптимальных параметров шаблона и времени синтеза можно получить дендритоподобные структуры, взаимное расположение которых будет регулироваться поверхностной плотностью пор шаблона.

Таким образом, с точки зрения конструирования ГКР-активных поверхностей для неразрушающего исследования малых концентраций веществ интересным является установление взаимосвязи сигнала ГКР света с формой серебряных НС (Ag НС), выращенных в порах шаблона. С учетом того, что изучение зависимости оптических свойств от параметров серебряных НС со сложной формой поверхности носит отрывочный характер, целью нашей работы являлось получение Ag НС различной формы посредством шаблонного синтеза в порах  $\text{SiO}_2$  на кремниевой подложке *n*-типа при различных временах осаждения, а также исследование эффективности таких структур в качестве ГКР-активных поверхностей на примере тестового анализатора – красителя Родамина 6Ж при различных мощностях лазера.

## Методика

В качестве шаблонов для синтеза Ag НС использовались ионно-трековые пористые  $\text{SiO}_2$ -матрицы толщиной  $250 \pm 10$  нм на кремниевой подложке *n*-типа (КЭФ 4,5 Ом·см с ориентацией (100)) с внешними диаметрами пор  $500 \pm 20$  нм. Плотность пор по поверхности составляла  $10^8$  см<sup>-2</sup>. Особенности получения и характерные изображения поверхности и сколов  $\text{SiO}_2$ -шаблонов на кремниевой подложке представлены в нашей работе [17]. Осаждение серебра проводилось методом безэлектродного осаждения из раствора 0,02 М нитрата серебра ( $\text{AgNO}_3$ ) и 5 М плавиковой кислоты (HF) при нормальных условиях. Перед осаждением образцы шаблона  $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$  размером  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup> промывались в изопропиловом спирте и дистиллированной воде, после чего высушивались в потоке азота. Для установления динамики роста Ag НС в порах  $\text{SiO}_2$  время осаждения подбиралось для каждого образца 5, 15, 30 и 60 с соответственно. По окончании процесса образцы промывались в дистиллированной воде, затем в изопропиловом спирту, снова в дистиллированной воде и высушивались на воздухе.

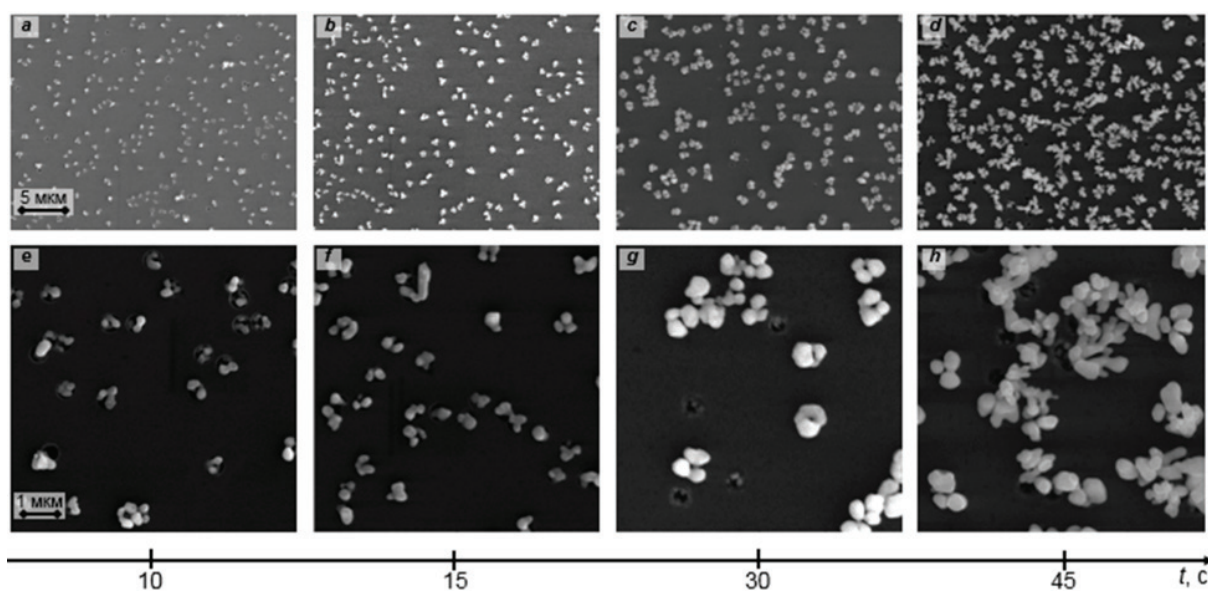
Морфология поверхности полученных образцов  $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$  исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе *TESCAN* с приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДА). ГКР-исследования осуществлялись на *CARS* микроскопе («*SOLAR TII*», *Japan-Belarus*). Экспери-

мент проводился при использовании зеленого ( $\lambda = 532$  нм) лазера с мощностями от 2,5 до 150 мкВт и при времени экспозиции 0,5 с. В качестве тестового анализата использовался водный раствор красителя Родамин 6Ж ( $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ ) с концентрацией  $10^{-6}$  М. Анализ наносился на образец, после чего в течении 10 мин высушивался на воздухе.

## Основная часть

Серебряные НС, полученные при осаждении металла в поры  $SiO_2$  на кремниевой подложке  $n$ -типа при различных временах осаждения,

представлены на рисунке 1. Контрастные СЭМ-изображения свидетельствуют о том, что металлический осадок присутствует практически во всех порах (рисунок 1а–д). Это позволяет сделать вывод о селективности процесса осаждения металла, который происходит исключительно в порах оксида кремния. Количество металлической фазы увеличивается пропорционально времени осаждения, при этом металлические НС пространственно разделены и не образуют непрерывных металлических дорожек даже при максимальном времени осаждения, однако начиная с 30 с регистрируется образование отдельных конгломератов из НС.



**Рисунок 1** – Динамика роста серебряных наноструктур в порах  $SiO_2$  на кремниевой подложке  $n$ -типа при временах осаждения: 5 с (а, е), 15 с (b, f), 30 с (c, g) и 60 с (d, h). Снимки в каждом ряду сделаны при одинаковом увеличении

**Figure 1** – The growth dynamics of silver nanostructures in  $SiO_2$  pores on  $n$ -type silicon substrate at deposition times: 5 s (a, e), 15 s (b, f), 30 s (c, g) and 60 s (d, h). The scale is the same for each line

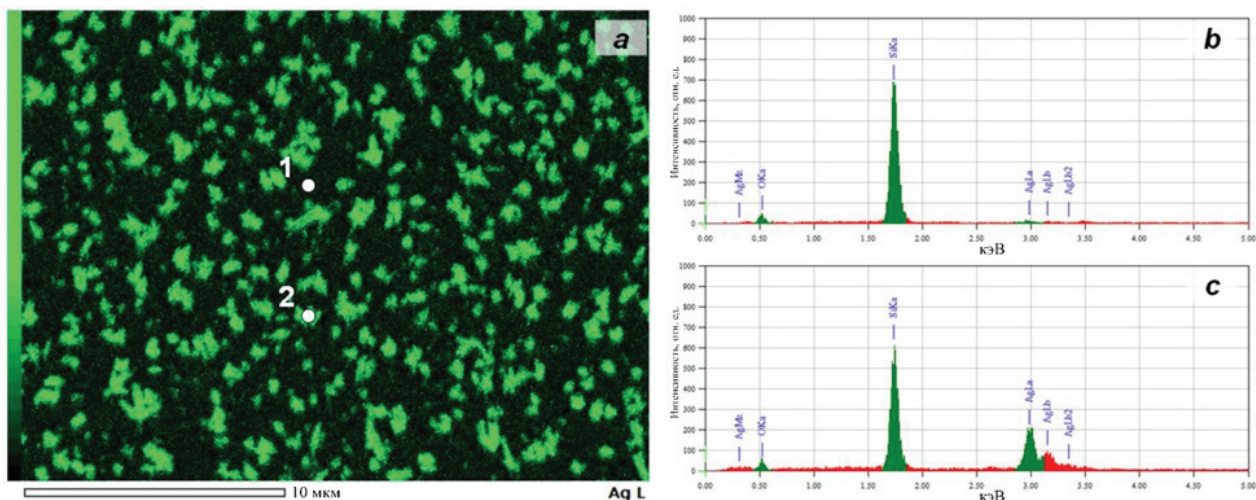
Изображения, полученные при большем увеличении (рисунок 1е–h), позволяют отследить динамику изменения морфологии отдельных НС при увеличении времени осаждения. Видно, что на начальных этапах (рисунок 1е) формируются отдельные центры роста металла по краям пор, без образования цельных НС. При этом, даже при столь малых временах осаждения, металлический осадок в порах дорастает до поверхности  $SiO_2$ , что соответствует образованию отдельных кристаллитов с длиной до 250 нм. С увеличением времени осаждения металл начинает выступать над поверхностью оксида и средние размеры металлических кристаллитов увеличиваются до 300–350 нм (рису-

нок 1f). Спустя еще 15 с кристаллиты не только укрупняются в размерах до 500–750 нм, но также в некоторых местах начинают конгломерировать с образованием взаимоперекрывающихся Ag НС, растущих из соседних пор (рисунок 1g). Осаждение в течение 45 с приводит к увеличению размеров кристаллитов с их двойникованием и образованием дендритоподобных структур (рисунок 1h).

Анализ элементного состава образцов  $SiO_2(Ag)/n-Si$  (рисунок 2) подтверждает селективность осаждения металла в поры (на поверхности  $SiO_2$  выпадения металла не происходит, рисунок 2b). Кроме того, из анализа ЭДА-спектров видно, что при осаждении металла в по-

рах не регистрируются фазы, соответствующие другим элементам (рисунок 2с), которые могут входить в состав металлического осадка

при безэлектродном осаждении. Пики кремния и кислорода соответствуют подложке, которая окружает Ag НС.

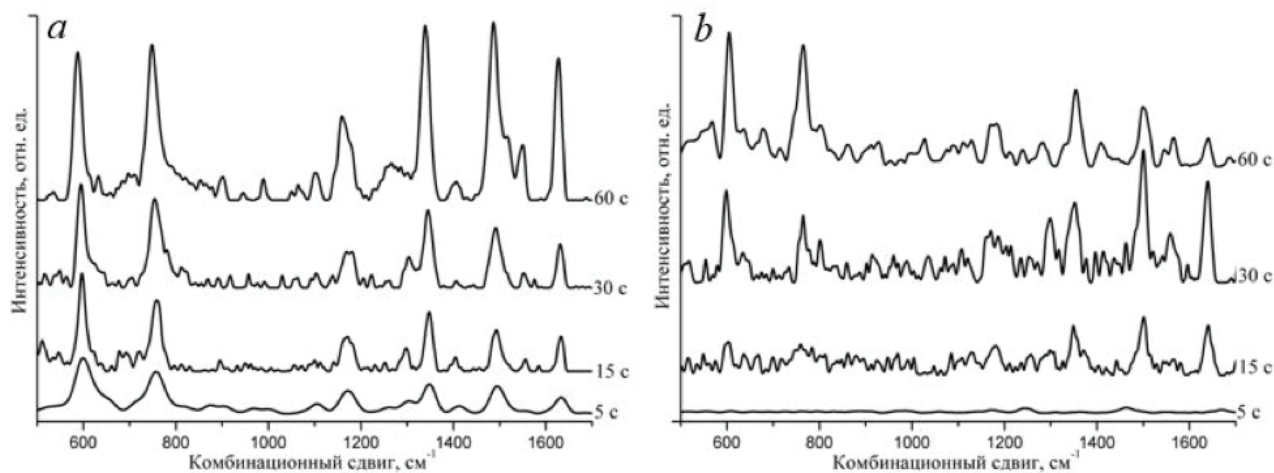


**Рисунок 2** – ЭДА-картирование поверхности образцов  $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$ , полученных при осаждении серебра в течение 60 с (а), и ЭДА-спектры (b, c), соответствующие точкам 1 и 2

**Figure 2** – EDA-mapping of the  $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$  surface for samples after silver deposition at 60 s (a), and EDA-spectra (b, c) corresponding to points 1 and 2

Достаточно близкое расположение серебряных кристаллитов позволяет предположить, что в местах их соприкосновения будут образовываться «горячие точки». Для подтверждения этого предположения проводились исследования образцов

$\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$ , полученных при различных временах осаждения, на предмет эффективности их применения в качестве ГКР-активных поверхностей. На рисунке 3а представлены ГКР-спектры, полученные при мощности лазера в 150 мкВт.



**Рисунок 3** – ГКР-спектры Родамина 6Ж с концентрацией  $10^{-6}$  М, снятые на серебряных наноструктурах, выращенных в порах  $\text{SiO}_2$  на кремниевой подложке  $n$ -типа при времени осаждения 5 с, 15 с, 30 с и 60 с. а – спектры, полученные при мощности лазера 150 мкВт; б – при мощности 2,5 мкВт

**Figure 3** – SERS spectra of Rhodamine 6G with a concentration of  $10^{-6}$  M, measured on silver nanostructures grown in pores of  $\text{SiO}_2$  on a silicon  $n$ -type substrate at a deposition time of 5 s, 15 s, 30 s and 60 s. a – spectra obtained at a laser power of 150  $\mu\text{W}$ ; b – at a power of 2.5  $\mu\text{W}$

Основные линии спектров соответствуют используемому в эксперименте анализу Родамину 6Ж. Спектры, полученные на Ag НС, выращенных при больших временах осаждения,

являются более интенсивными. Возрастание сигнала связано с изменением морфологии НС, ведущей к увеличению числа «горячих точек» за счет увеличения размера НС и образования

взаимных перекрытий, попадающих в поле лазера. Особенно сильно этот эффект проявляется на дендритоподобных НС, что позволяет сделать вывод об этих структурах как о наиболее подходящих для ГКР-спектроскопии среди рассматриваемых. Расчетная модель, иллюстрирующая распределение электрического поля на серебряном дендрите, представленная в работе [16], подтверждает наши предположения о местах локализации «горячих точек». Тем не менее, несмотря на относительно высокую интенсивность ГКР-сигнала, эксперименты показывают, что при мощности лазера 150 мкВт происходит постепенная деструкция анализа, в результате чего повторное детектирование ГКР-сигнала с того же участка НС становится затруднительным.

Так как повторная регистрация сигнала важна при проведении различных исследований (например, при анализе поведения раковых клеток и других биологических объектов с течением времени [18]), для предотвращения разрушения исследуемого вещества под действием внешнего возбуждения была подобрана минимальная мощность лазера, при которой устойчиво регистрируется сигнал – 2,5 мкВт. По данным серии экспериментов установлено, что при использовании данной мощности сигнал остается стабильным в течении длительного промежутка времени, что указывает на возможность проведения неразрушающих ГКР-исследований. При этом наилучшие результаты по усилению сигнала также были получены при использовании дендритоподобных Ag НС (рисунок 3b).

## Заключение

Сформированы структуры  $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$  с различной формой металлического осадка посредством варьирования временем безэлектродного осаждения серебра в поры  $\text{SiO}_2$ -шаблона на кремниевой подложке *n*-типа. При проведении исследований морфологии структур  $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{Si}$  показано, что серебряные наноструктуры растут исключительно в порах  $\text{SiO}_2$  и форма осадка зависит от времени осаждения. Анализ динамики изменения морфологии металлического осадка показал, что при увеличении времени осаждения металл эволюционирует от отдельных металлических кристаллитов внутри пор при малых временах осаждения до дендритоподобных наноструктур при больших временах.

Изучение оптических свойств структур  $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$  позволило определить взаимосвязь сигнала ГКР с формой наноструктуры и показать влияние «горячих точек» на качество регистрируемого сигнала. Показано, что наноструктуры, выращенные при больших временах осаждения, имеют более интенсивные ГКР-спектры. Возрастание сигнала связано с изменением морфологии наноструктур, ведущим к увеличению числа «горячих точек» за счет увеличения размера наноструктур и образования взаимных перекрытий, попадающих в поле лазера. Особенно сильно этот эффект проявляется на дендритоподобных наноструктурах, что позволяет сделать вывод об этих структурах, как о наиболее подходящих для ГКР-спектроскопии среди рассматриваемых.

Проведено исследование эффективности использования структур  $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$  в качестве ГКР-активных поверхностей при различных мощностях лазера. Установлено, что при использовании возбуждения мощностью 150 мкВт происходит постепенное разрушение анализа. Понижение мощности лазера до 2,5 мкВт устраняет эту проблему. Таким образом, полученные серебряные наноструктуры в порах шаблона  $\text{SiO}_2$  на кремниевой подложке *n*-типа могут использоваться в качестве ГКР-активных поверхностей при неразрушающем исследовании низких концентраций веществ на малых мощностях лазера.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф17М-005), гранта Национальной академии наук Беларуси (договор № 2017-26-010), Нетворка Балтийского моря «НаноФото» и Научно-технической программы «Технология СТ» (проект № 3.1.5.1).

## Список использованных источников

1. Wei, H. Hot spots in different metal nanostructures for plasmon-enhanced Raman spectroscopy / H. Wei, H. Xu // *Nanoscale*. – 2013. – Vol. 5, no. 207890. – P. 10794–805.
2. Su, K.H. Interparticle coupling effects on plasmon resonances of nanogold particles / Su K.H. [et al.] // *Nano Lett.* – 2003. – Vol. 3, no. 8. – P. 1087–1090.
3. Kim, K. Surface-Enhanced Raman Scattering: A Powerful Tool for Chemical Identification / K. Kim, K.S. Shin // *Anal. Sci.* – 2011. – Vol. 27, no. 8. – P. 775.

4. Kneipp, K. Surface-enhanced raman scattering / K. Kneipp // *Phys. Today*. – 2007. – Vol. 60, no. 11. – P. 40–46.

5. Santoro, G. Silver substrates for surface enhanced Raman scattering: Correlation between nanostructure and Raman scattering enhancement / G. Santoro [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – Vol. 104, no. 24. – P. 243107.

6. Wang, A. Review of Recent Progress of Plasmonic Materials and Nano-Structures for Surface-Enhanced Raman Scattering / A. Wang, X. Kong // *Materials (Basel)*. – 2015. – Vol. 8, no. 6. – P. 3024–3052.

7. Xia, Y. Plasmons: Why Should We Care? / Y. Xia, D.J. Campbell // *J. Chem. Educ.* – 2007. – Vol. 84, no. 1. – P. 91.

8. Sharma, B. SERS: Materials, applications, and the future / B. Sharma [et al.] // *Mater. Today*. – 2012. – Vol. 15, no. 1–2. – P. 16–25.

9. Хлебцов, Н.Г. Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом / Н.Г. Хлебцов // *Квантовая электроника*. – 2008. – Вып. 38, № 6. – С. 504–529.

10. Kumari, G. How Far Can We Probe by SERS? / G. Kumari [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. – 2015. – Vol. 119, no. 34. – P. 20057–20064.

11. Kaniukov, E. Growth mechanisms of spatially separated copper dendrites in pores of a SiO<sub>2</sub> template / E. Kaniukov [et al.] // *Philos. Mag.* – 2017. – Vol. 6435. – P. 1–16.

12. Kaniukov, E.Y. Electrochemically deposited copper nanotubes / E.Y. Kaniukov [et al.] // *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* – 2017. – Vol. 11, no. 1. – P. 270–275.

13. Demyanov, S.E. On the morphology of Si/SiO<sub>2</sub>/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide / S.E. Demyanov [et al.] // *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* – 2014. – Vol. 8, no. 4. – P. 805–813.

14. Fei Chan, Y. Ag dendritic nanostructures as ultra-stable substrates for surface-enhanced Raman scattering / Y. Fei Chan [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 102, no. 18. – P. 183118.

15. Ye, W. Controllable growth of silver nanostructures by a simple replacement reaction and their SERS studies / W. Ye [et al.] // *Solid State Sci.* – 2009. – Vol. 11, no. 6. – P. 1088–1093.

16. Qiu, T. Silver fractal networks for surface-enhanced Raman scattering substrates / T. Qiu [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* – 2008. – Vol. 254, no. 17. – P. 5399–5402.

17. Kaniukov, E.Y. Tunable nanoporous silicon oxide templates by swift heavy ion tracks technology / E.Y. Kaniukov [et al.] // *Nanotechnology*. – 2016. – Vol. 27, no. 11. – P. 115305.

18. Kho, K.W. Clinical SERS: are we there yet? / K.W. Kho [et al.] // *J. Biophotonics*. – 2011. – Vol. 4, no. 10. – P. 667–684.

## Acknowledgments

The work was supported by the Belarusian Foundation for Basic Research (project number Ф17М-005), a grant of the National Academy of Sciences of Belarus (grant number 2017-26-010), Frame of Baltic Sea Network «NanoPhoto» and the Scientific-technical program «Technology-SG» (project number 3.1.5.1).

## References

1. Wei H. and Xu H. Hot spots in different metal nanostructures for plasmon-enhanced Raman spectroscopy. *Nanoscale*, 2013, vol. 5, no. 207890, pp. 10794–805.

doi: 10.1039/c3nr02924g

2. Su K.H., ei Q.-H., Zhang X., Mock J.J., Smith D.R., Schultz S. Interparticle coupling effects on plasmon resonances of nanogold particles. *Nano Lett.*, 2003, vol. 3, no. 8, pp. 1087–1090. doi: 10.1021/nl034197f

3. Kim K. and Shin K.S. Surface-Enhanced Raman Scattering: A Powerful Tool for Chemical Identification. *Anal. Sci.*, 2011, vol. 27, no. 8, p. 775.

4. Kneipp K. Surface-enhanced raman scattering. *Phys. Today*, 2007, vol. 60, no. 11, pp. 40–46.

doi: 10.1063/1.2812122

5. Santoro G., Yu. S., Shchwartzkopf M., Zhang P., Vayalil S.K., Risch J.F.H., Rubhausen M.A., Hernandez M., Domingo C., Roth S.V. Silver substrates for surface enhanced Raman scattering: Correlation between nanostructure and Raman scattering enhancement. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, no. 24, p. 243107.

doi: 10.1063/1.4884423

6. Wang A. and Kong X. Review of Recent Progress of Plasmonic Materials and Nano-Structures for Surface-Enhanced Raman Scattering. *Materials (Basel)*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 3024–3052. doi: 10.3390/ma8063024

7. Xia Y. and Campbell D.J. Plasmons: Why Should We Care? *J. Chem. Educ.*, 2007, vol. 84, no. 1, p. 91.

doi: 10.1155/2012/457968

8. Sharma B., Frontiera R.R., Henry A.-I., Ringe E., Van Duyne R.P. SERS: Materials, applications, and the future. *Mater. Today*, 2012, vol. 15, no. 1–2, pp. 16–25.

doi: 10.1016/S1369-7021(12)70017-2

9. Khlebtsov N. G. [Optics and biophotonics of nanoparticles with plasmon resonance]. *Quantum Electronics*, 2008, vol. 38, no. 6, pp. 504–529 (in Russian).

10. Kumari G., Kandula J., Narayana C. How Far Can We Probe by SERS? *J. Phys. Chem. C*, 2015, vol. 119, no. 34, pp. 20057–20064. doi: 10.1021/acs.jpcc.5b07556

11. Kaniukov E., Yakimchuk D., Arzumanyan G., Terryn H., Baert K., Kozlovskiy A., Zdorovets M., Belonogov E., Demyanov S. Growth mechanisms of spatially separated copper dendrites in pores of a SiO<sub>2</sub> template. *Philos. Mag.*, 2017, vol. 6435, pp. 1–16.

doi: 10.1080/14786435.2017.1330562

12. Kaniukov E.Y., Kozlovsky A.L., Shlimas D.I., Zdorovets M.V., Yakimchuk D.V., Shumskaya E.E.,

Kadyrzhanov K.K. Electrochemically deposited copper nanotubes. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 270–275.

**doi:** 10.1134/S1027451017010281

13. Demyanov S.E., Kaniukov E.Yu., Petrov A.V., Belonogov E.K., Streltsov E.A., Ivanov D.K., Ivanova Yu.A., Trautmann C., Terryn H., Petrova M., Utsarros J., Sivakov V. On the morphology of Si/SiO<sub>2</sub>/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 805–813.

**doi:** 10.1134/S1027451014040326

14. Chan Y.F., Zhang C.X., Wu Z.L., Zhao D.M., Wang W., Xu H.J., Sun X.M. Ag dendritic nanostructures as ultrastable substrates for surface-enhanced Raman scattering. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 102, no. 18, p. 183118.

**doi:** 10.1016/j.solidstatesciences.2009.03.001

15. Ye W., Shen C., Tian J., Wang C., Hui C., Gao H. Controllable growth of silver nanostructures by a simple replacement reaction and their SERS studies. *Solid State Sci.*, 2009, vol. 11, no. 6, pp. 1088–1093.

**doi:** 10.1016/j.apsusc.2008.02.060

16. Qiu T., Wu X.L., Shen J.C., Xia Y., Shen P.N., Chu P.K. Silver fractal networks for surface-enhanced Raman scattering substrates. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, vol. 254, no. 17, pp. 5399–5402. **doi:** 10.1063/1.4803937

17. Kaniukov E.Y., Utsarros 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. **doi:** 10.1088/0957-4484/27/11/115305

18. Kho K.W., Fu C.Y., Dinis U.S., Olivo M. Clinical SERS: are we there yet? *J. Biophotonics*, 2011, vol. 4, no. 10, pp. 667–684. **doi:** 10.1002/jbio.201100047