

УДК 535.016

## ФОРМИРОВАНИЕ ОСТРОВКОВЫХ SERS-ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН И КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК

© 2022 г. С. И. Серебренникова<sup>1</sup>, В. И. Кукушкин<sup>2</sup>, \*, О. В. Криставчук<sup>3</sup>,  
Е. Н. Морозова<sup>2</sup>, А. С. Астраханцева<sup>2, 4</sup>, А. Н. Нечаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования  
“Сколковский институт науки и технологий”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

<sup>3</sup>Международная межправительственная организация  
“Объединенный институт ядерных исследований”, Дубна, Россия

<sup>4</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

\*E-mail: kukushvi@mail.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Продемонстрирована возможность создания металлических nanoостровковых SERS-активных слоев на поверхности пористых трековых мембран из полиэтилентерефталата и кремниевых подложек, оптимизированных под возбуждающее лазерное излучение с длиной волны 532 и 785 нм. Установлены характерные закономерности изменения оптических свойств SERS-структур при изменении морфологии металлических наночастиц на поверхности подложки. Разработанные структуры могут использоваться в качестве SERS-чипов и высокочувствительных фильтрующих SERS-элементов в оптических биосенсорах.

DOI: 10.31857/S0367676522040202

### ВВЕДЕНИЕ

Создание биосенсоров для высокочувствительного скринингового выявления инфекционных заболеваний является одной из главных задач мирового научного сообщества, особенно во время неутраченной пандемии COVID-19. Перспективным инструментом для детектирования биологических мишеней являются методы, основанные на оптической спектроскопии [1, 2]. Особый интерес при решении этого вопроса представляют технологии, базирующиеся на методах поверхностно-усиленной Рамановской спектроскопии (SERS – surface-enhanced Raman scattering), за счет их высокой чувствительности и быстродействия [3–8]. Однако в случае использования стандартного “сэндвич”-метода [9] для увеличения контраста в сигнале SERS между опытным образцом (содержащим исследуемую биологическую мишень) и контрольным образцом (без мишени) необходимо производить сепарацию пробы с целью ее отделения от белков и неспецифически осажденных молекул-репортеров. Существует много различных типов сепарации: по массе, по размеру, по упругости, электрическая сепарация, магнитная сепарация и т.д.

В данной работе продемонстрирована возможность создания оптических сенсоров на основе трековых мембран (ТМ) из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), одновременно обладающих SERS-активной поверхностью и являющихся фильтрующими элементами. Трековая мембрана является удобной подложкой для формирования nanoструктурированного слоя ввиду того, что она обладает гладкой поверхностью, а ее использование в качестве проточного сенсора имеет ряд преимуществ, свойственных этому типу мембран. ТМ обладают варьируемым в широком диапазоне диаметром пор (от 10 нм до 7 мкм) и их поверхностной плотностью ( $10^5$ – $10^9$  см<sup>-2</sup>), возможностью контроля геометрических параметров каналов пор, хорошими механическими характеристиками, биологической инертностью материала. Ранее мы продемонстрировали способ формирования SERS-структур на поверхности ТМ (из ПЭТФ) из коллоидных наночастиц серебра, полученных методом электроискрового разряда в воде [10].

Целью данной работы являлось сравнение геометрических параметров и оптических свойств островковых nanoструктур, получаемых на пористых и непористых полимерных и кремниевых подложках.

В качестве метода напыления островковых металлических нанослоев использовался метод вакуумного термического напыления с автоматизированным контролем толщины и скорости напыления.

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью изучения влияния морфологии металлических наночастиц на оптические свойства SERS-структур создавались островковые SERS-пленки на поверхности подложек Si/SiO<sub>2</sub>, трековых мембран из ПЭТФ и непористых пленках из ПЭТФ.

Трековые мембраны получали в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований по технологии, описанной в [11]. Получение трековых мембран основано на взаимодействии пучка ускоренных тяжелых ионов с полимером. При прохождении полимерной пленки высокоэнергетические многозарядные ионы оставляют зоны деструкции вдоль траекторий бомбардирующих частиц – треки. Далее облученная пленка проходит дополнительно фотоокисление путем воздействия ультрафиолетовым (УФ) излучением, что позволяет более избирательно проводить разрушение деструктурированных областей в полимере посредством последующего химического травления (щелочными растворами для ПЭТФ) [12]. ТМ, используемая в данной работе, была изготовлена из ПЭТФ пленки Hostaphan RNK фирмы Mitsubishi Polyester film толщиной 19 мкм. Пленку облучали на ускорителе ИЦ-100 пучками ионов Хе<sup>26</sup> с энергией 1.16–1.22 МэВ/н. Этап химического травления проводили с помощью 2.2 М раствора NaOH при температуре 85°C. Средний диаметр пор на поверхности составил 0.36 мкм, плотность пор составляет 2.6 · 10<sup>8</sup> см<sup>-2</sup>.

Тонкие слои металла осаждались на поверхность подложек с использованием системы вакуумного термического напыления NANO 38 (Kurt J. Lesker Company, США) с автоматическим контролем толщины при давлении в камере 8 · 10<sup>-7</sup> Торр со скоростью напыления 0.4 Å/с. Затем подложки нагревались на плитке HP-20D-Set (Daihan Scientific, Южная Корея). В результате формировались SERS-поверхности с различными латеральными размерами, высотами, формами и зазорами между металлическими наночастицами.

Исходя из данных, полученных нами ранее [13], для оптимизации островковых SERS-пленок на подложках Si/SiO<sub>2</sub> (толщина оксида кремния составляла 300 нм) напыляемая номинальная толщина серебра *h* варьировалась от 6 до 30 нм (6, 10, 15, 20, 25, 30 нм), золота – от 4.5 до 25 нм (4.5, 10, 15, 20, 25 нм). После напыления образцы отжигали на плитке при температурах *T* = 120, 240 или 360°C в течение 6 мин, а также исследовались образцы без отжига.

На пленки и ТМ из ПЭТФ напыляли следующие толщины серебра: 6, 10, 15 и 20 нм. После напыления образцы отжигали при температурах 120, 160 или 200°C в течение 6 мин. Дальнейшее повышение температуры ограничено термостойкостью полимера (~250°C). Полученные образцы сравнивали с образцами, не прошедшими отжиг.

Для измерения SERS-сигнала от тестовых молекул 4-ABT (4-Aminobenzenethiol, CAS Number: 1193-02-8, Sigma-Aldrich, USA) использовались Рамановские спектрометры EnSpectr R532 (с длиной волны лазерного излучения 532 нм, мощностью 30 мВт, спектральным разрешением 4–6 см<sup>-1</sup>, производитель ООО “РамМикс”, РФ) и EnSpectr R785 (с длиной волны лазерного излучения 785 нм, мощностью 50 мВт, спектральным разрешением 6–8 см<sup>-1</sup>, производитель ООО “РамМикс”, РФ) на базе оптического микроскопа ADF U300 (ADF Optics Co. LTD, Китай). Все измерения проводились на 10-кратном объективе в 10 повторениях и полученные спектры усреднялись.

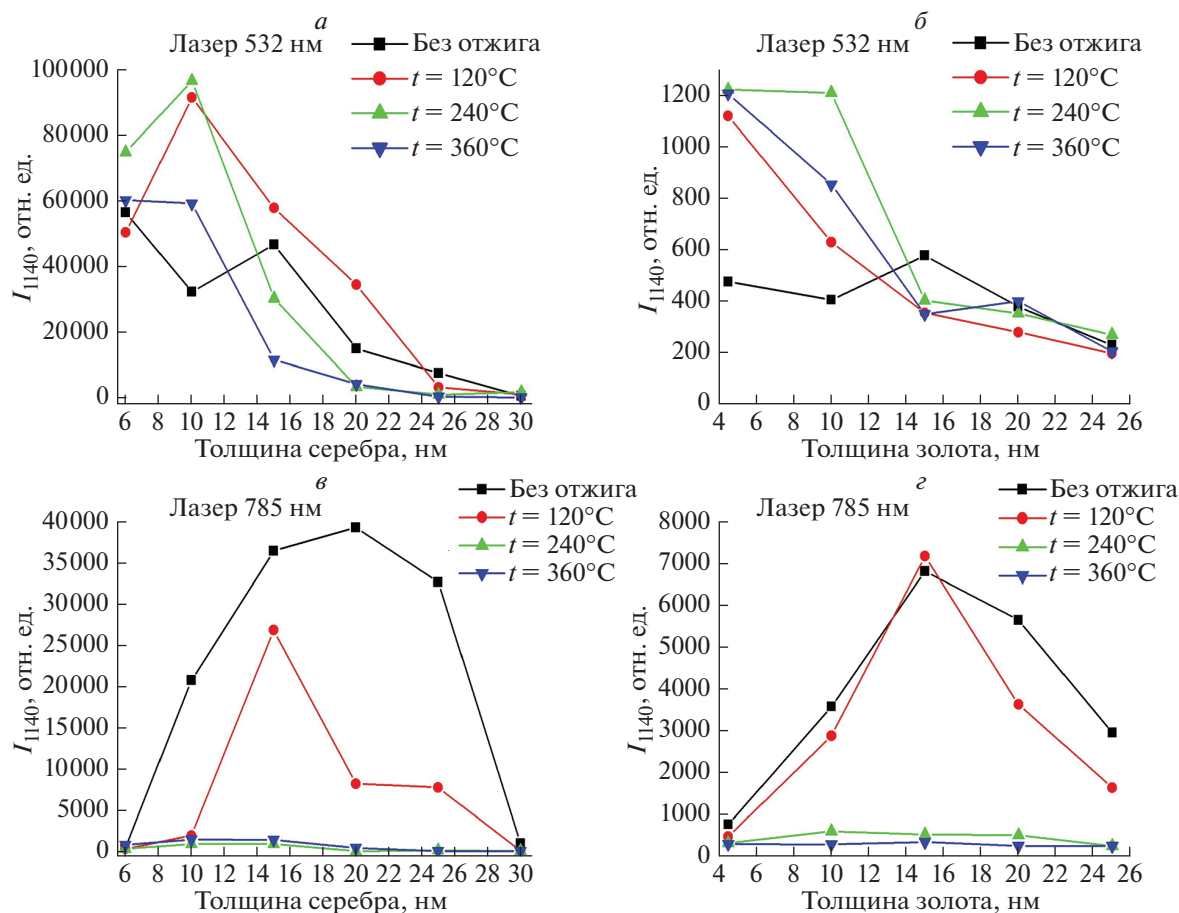
Морфологию поверхности SERS-подложек подложек на основе Si/SiO<sub>2</sub> изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии с использованием электронного микроскопа Supra 50VP (Zeiss, Германия) со сверхвысоким разрешением 1.5 нм. Образцы на основе ПЭТФ пленок и трековых мембран исследовали на микроскопе высокого разрешения с холодным полевым катодом SU8020 (Hitachi, Япония), предварительно напылив тонкий проводящий слой сплава PtPd.

Изображения образцов были обработаны программой Scanning Probe Image Processor (SPIP) с целью оценки размера наночастиц серебра и золота, напыленных на кремниевые подложки. Данная программа позволяет распознать объекты на изображении с яркостью выше пороговой, которая задавалась вручную для каждого изображения. Программа автоматически подсчитывала площадь распознанных объектов. Далее полученные в SPIP данные о диаметрах и площадях частиц были перенесены в программу Origin, в которой были построены распределения по диаметрам с каждого изображения. Так как форма полученных распределений (кроме случаев для толстых пленок с большим процентом покрытия) была близка к гауссовой, эти распределения были аппроксимированы с помощью инструментов программы Origin гауссовой функцией вида:

$$y = y_0 + \frac{A}{\sigma\sqrt{\pi/4 \ln 2}} \exp\left(-4 \ln 2 \frac{(d - d_a)^2}{\sigma^2}\right).$$

Значения среднего диаметра *d<sub>a</sub>* и дисперсии *σ*, а также их погрешности вычислялись программой автоматически.

SEM-изображения образцов из ПЭТФ не обрабатывали с помощью программы SPIP ввиду недостаточного контраста получаемых изображений. Это связано с условиями получения изображения на поверхности трековых мембран. ПЭТФ



**Рис. 1.** Графики зависимостей интенсивности SERS-линии  $1140\text{ см}^{-1}$  вещества 4-АВТ от толщины напыляемого металла на подложку Si/SiO<sub>2</sub> при разных режимах отжига: для серебра при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 532 нм (а); для золота при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 532 нм (б); для серебра при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 785 нм (в); для золота при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 785 нм (з).

деструктурируется под действием электронного пучка с энергией выше 3 кэВ, что определяет низкое разрешение электронного микроскопа. В результате этого получаемый контраст на изображениях не удовлетворяет условиям обработки в SPIP.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследовались зависимости интенсивности SERS-линии  $1140\text{ см}^{-1}$  тестового вещества 4-АВТ от средних латеральных размеров, форм наночастиц, а также зазоров между ними.

В табл. 1–3 для каждого из режимов отжига подложек ( $t$ ) после напыления и для каждой толщины ( $h$ ) напыляемого металлического слоя приведены данные по интенсивностям SERS в зависимости от морфологии наночастиц (средний диаметр ( $d_a$ ), дисперсия диаметров ( $\sigma$ ), коэффициент заполнения поверхности металлическими наночастицами ( $S$ )). В табл. 1 приведены данные для напыления серебра на подложку Si/SiO<sub>2</sub>, в табл. 2 – для напыления золота на подложку Si/SiO<sub>2</sub>, в табл. 3 – для напыления серебра на поверхность ПЭТФ пленок.

В результате изучения влияния морфологии металлических наночастиц на SERS-сигнал с подложек Si/SiO<sub>2</sub> при возбуждении источниками лазерного излучения с длинами волн 532 и 785 нм были установлены следующие закономерности:

1. При больших толщинах напыления серебра или золота (от 10 до 25 нм) без проведения термического отжига на поверхности кремниевых подложек формируются вытянутые наноструктуры с большим коэффициентом заполнения  $S$  (табл. 1 и 2), которые имеют максимум плазмонного поглощения в ближней ИК-области [14] и обладают высоким коэффициентом усиления рамановского рассеяния на длине волны лазерного возбуждения 785 нм.

2. При лазерном возбуждении с длиной волны 532 нм усиление интенсивности оптического отклика с тестового вещества, возникающее на границе раздела Ag/SiO<sub>2</sub>, на два порядка больше, чем усиление сигнала на границе раздела Au/SiO<sub>2</sub>. А при лазерном возбуждении с длиной волны 785 нм усиление в 3–5 раз больше (в зависимости от режима термического отжига) на границе раздела Ag/SiO<sub>2</sub>, чем на Au/SiO<sub>2</sub> (рис. 1). Более низкое усиление на

**Таблица 1.** Зависимость интенсивности SERS от морфологии наночастиц серебра на поверхности подложек Si/SiO<sub>2</sub> при разных режимах напыления и отжига

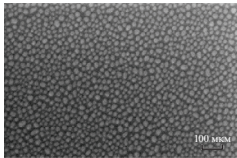
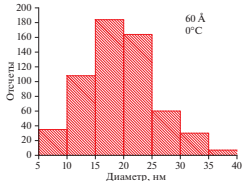
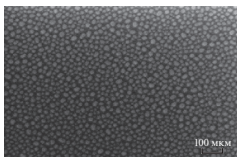
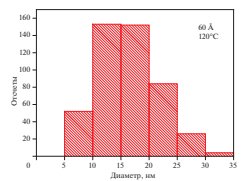
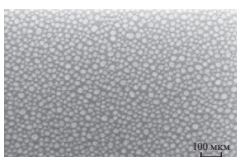
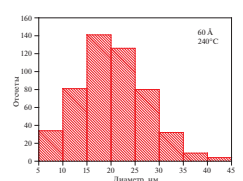
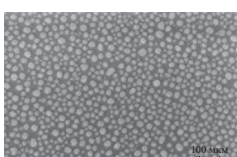
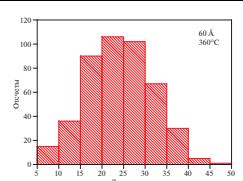
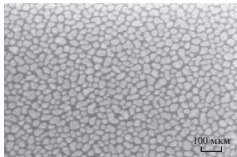
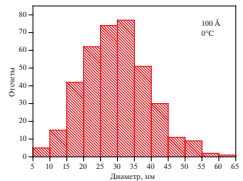
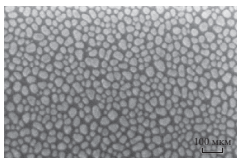
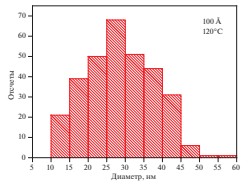
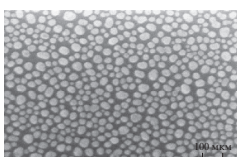
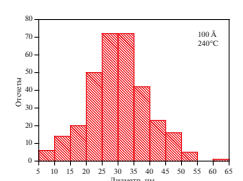
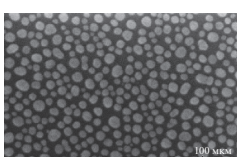
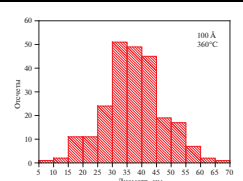
<i>h</i> , нм	<i>T</i> , °С	<i>S</i> , %	<i>d<sub>a</sub></i> , нм	<i>σ</i> , нм	SERS <i>λ</i> = 532 нм, отн. ед.	SERS <i>λ</i> = 785 нм, отн. ед.	SEM-изображения	Гистограмма
6	25	44	19	13.9	56600	550		
6	120	39	16	13.3	50600	420		
6	240	47	20	16.6	75020	420		
6	360	46	24	19.6	60400	920		
10	25	55	29	22.3	32440	20800		
10	120	47	28	26.3	91570	2020		
10	240	47	30	18.2	96640	1020		
10	360	45	37	19.1	59360	1550		

Таблица 1. Продолжение

$h$ , нм	$T$ , °C	$S$ , %	$d_a$ , нм	$\sigma$ , нм	SERS $\lambda = 532$ нм, отн. ед.	SERS $\lambda = 785$ нм, отн. ед.	SEM-изображения	Гистограмма
15	25	66	—	—	46840	36400		—
15	120	60	61	60.7	58000	26870		
15	240	43	68	61	30470	1025		
15	360	40	78	65.2	11800	1525		
20	25	88	—	—	15200	<b>39240</b>		—
20	120	85	—	—	34685	8260		—
20	240	31	101	119	3600	130		
20	360	40	149	113.5	4420	550		

Таблица 1. Окончание

$h$ , нм	$T$ , °C	$S$ , %	$d_a$ , нм	$\sigma$ , нм	SERS $\lambda = 532$ нм, отн. ед.	SERS $\lambda = 785$ нм, отн. ед.	SEM-изображения	Гистограмма
25	25	81	—	—	7750	32660		—
25	120	26	9	6	3500	7820		
25	240	46	183	133	1255	250		
25	360	38	192	118	595	150		
30	25	86	—	—	820	1070		—
30	120	45	19	11	1270	170		
30	240	53	—	—	2010	180		—
30	360	35	334	244	400	140		

**Таблица 2.** Зависимость интенсивности SERS от морфологии наночастиц золота на поверхности подложек Si/SiO<sub>2</sub> при разных режимах напыления и отжига

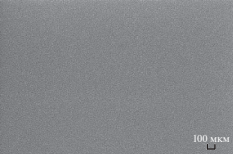
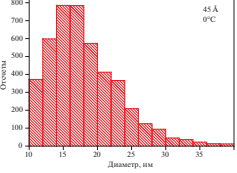
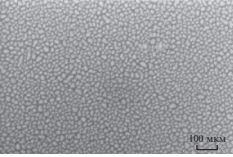
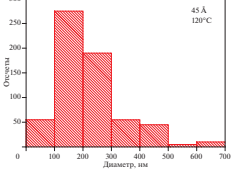
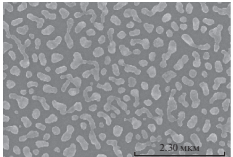
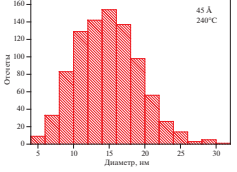
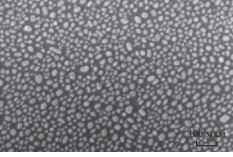
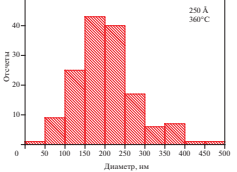

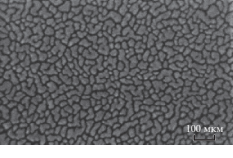
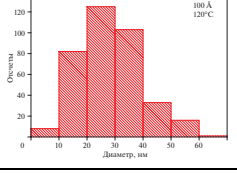
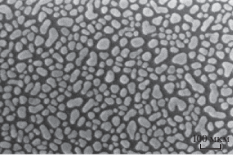
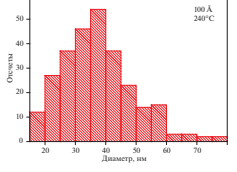
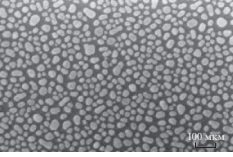
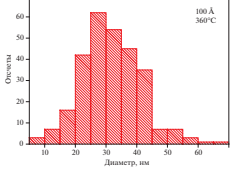
$h$ , нм	$T$ , °C	$S$ , %	$d_a$ , нм	$\sigma$ , нм	SERS $\lambda = 532$ нм, отн. ед.	SERS $\lambda = 785$ нм, отн. ед.	SEM-изображение	Гистограмма
4.5	25	42	16	11.5	476	760		
4.5	120	38	14	11	1120	475		
4.5	240	31	14	10.7	<b>1222</b>	320		
4.5	360	38	19	16.8	1206	295		
10	25	67	—	—	406	3572		—
10	120	43	27	26.2	630	2874		
10	240	52	35	24	1210	597		
10	360	51	31	21.4	855	288		

Таблица 2. Продолжение

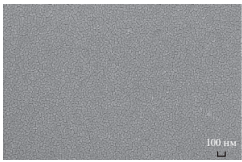

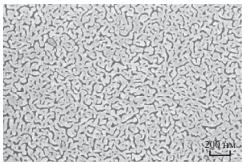
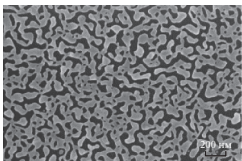
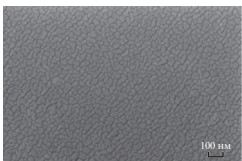
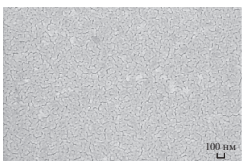
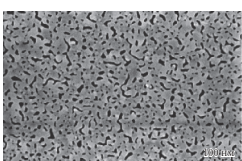
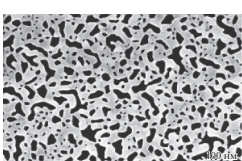
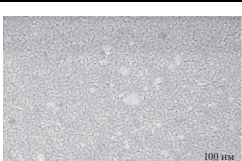

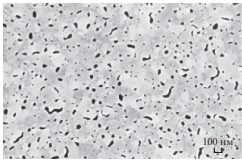
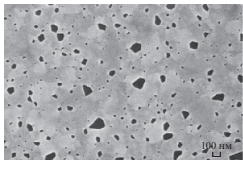
$h$ , нм	$T$ , °С	$S$ , %	$d_a$ , нм	$\sigma$ , нм	SERS $\lambda = 532$ нм, отн. ед.	SERS $\lambda = 785$ нм, отн. ед.	SEM-изображение	Гистограмма
15	25	76	—	—	578	6800		—
15	120	76	—	—	355	7160		—
15	240	82	—	—	404	522		—
15	360	57	—	—	350	340		—
20	25	95	—	—	380	5640		—
20	120	92	—	—	280	3624		—
20	240	79	—	—	353	505		—
20	360	70	—	—	400	250		—
25	25	96	—	—	230	2950		—



Таблица 2. Окончание

$h$ , нм	$T$ , °C	$S$ , %	$d_a$ , нм	$\sigma$ , нм	SERS $\lambda = 532$ нм, отн. ед.	SERS $\lambda = 785$ нм, отн. ед.	SEM-изображение	Гистограмма
25	120	98	—	—	198	1634		—
25	240	93	—	—	270	250		—
25	360	93	—	—	205	250		—

золоте объясняется тем, что в оптическом частотном диапазоне в золоте наблюдается рост мнимой части диэлектрической проницаемости из-за возникновения межзонных переходов [15]. Это является одной из причин затухания поверхностных плазмон-поляритонов. Выравнивание коэффициентов усиления в ИК-области является следствием сдвига положения (при переходе от Ag/SiO<sub>2</sub> к Au/SiO<sub>2</sub>) контура плазмонного поглощения в красную область спектра [16].

3. Для толщин серебра 6 и 10 нм процент заполнения и форма (круглая) примерно одинаковы для всех температур отжига. Для толщин серебра 15 и 20 нм процент заполнения при температурах отжига 0 и 120°C значительно больше, чем при нагреве до 240 и 360°C. Для толщин 25 и 30 нм без нагрева процент заполнения поверхности металлом гораздо больше, чем с нагревом.

Средние диаметры частиц, если сравнивать при одинаковых режимах отжига, как правило, растут с увеличением толщины серебряного слоя.

Таблица 3. Зависимость интенсивности SERS от морфологии наночастиц серебра на поверхности ПЭТФ-подложек при разных режимах напыления и отжига

Режимы	Толщина Ag			
	6 нм	10 нм	15 нм	20 нм
Без нагревания (25°C)	365	708	772	322
120°C	8740	4120	3054	1308
160°C	6265	1940	940	734
200°C	1230	1294	1140	985

4. Для золота для толщин 4.5 и 10 нм проценты заполнения небольшие для всех температур отжига и принимают значения от 31 до 52%. При толщинах слоя золота более 10 нм наногранулы начинают слипаться и процент заполнения значительно повышается.

5. При возбуждении золотых и серебряных SERS-подложек лазерным излучением с длиной волны 532 нм интенсивность рамановского рассеяния имеет преимущественно падающий характер по мере увеличения толщины напыленного слоя при любых режимах нагрева или его отсутствия (рис. 1а и 1б). Такое поведение сильно отличается от измерений при зондирующем излучении с длиной волны 785 нм (рис. 1в и 1г). При высоком нагреве (режимы 240 и 360°C) как серебряных, так и золотых подложек интенсивность почти не зависит от толщины напыленной пленки. Однако в режиме слабого нагрева и его отсутствия интенсивность рамановского рассеяния имеет резкое увеличение на два порядка при толщинах напыленного серебра в диапазоне 10–25 нм и на один порядок для золота толщиной 10–20 нм.

6. Наибольший коэффициент усиления интенсивности рамановского рассеяния при длине волны зондирующего лазерного излучения 532 нм имеют серебряные SERS-подложки с толщиной серебра 10 нм с отжигом 120°C (табл. 1). Наибольший коэффициент усиления интенсивности рамановского рассеяния при длине волны зондирующего лазерного излучения 785 нм имеют серебряные SERS-подложки с толщиной серебра 20 нм в отсутствие термического воздействия (табл. 1).

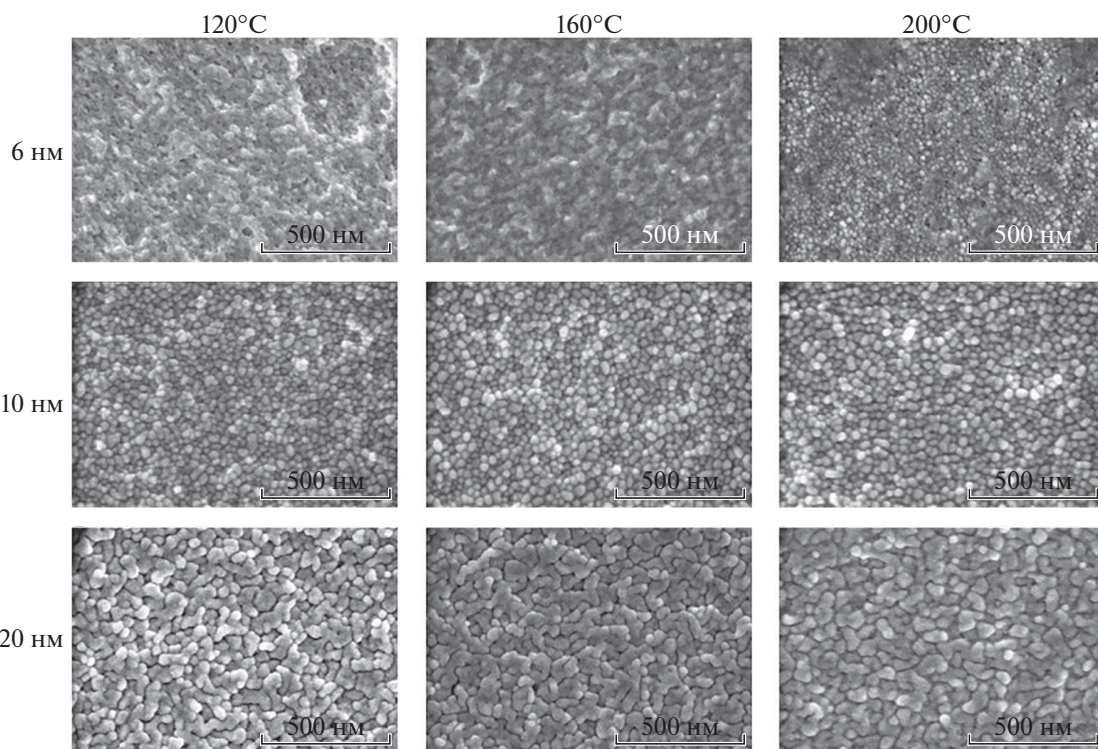


Рис. 2. СЭМ ПЭТФ пленок с разными толщинами напыленного слоя серебра при разных температурах отжига.

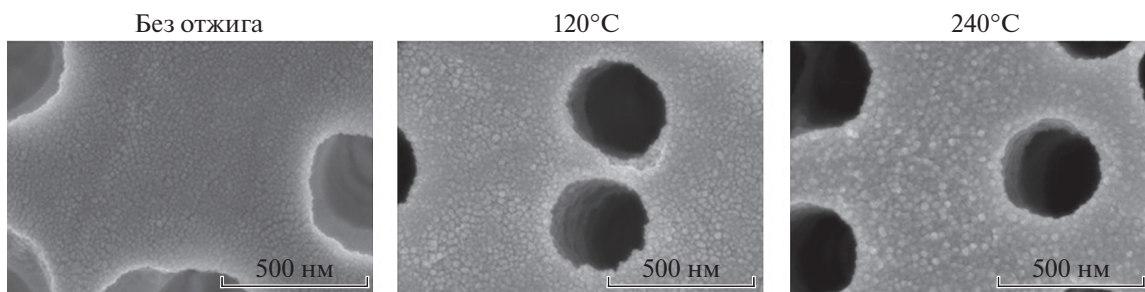


Рис. 3. СЭМ ПЭТФ ТМ со слоем серебра толщиной 6 нм при разных температурах отжига.

При увеличении толщины напыляемого слоя серебра на полимерную поверхность наблюдается укрупнение наносфер вплоть до их слияния и формирования продольных извилистых структур. Значимых различий (влияния пор) в получаемых серебряных слоях на непористой и пористой поверхности не обнаружено. При увеличении температуры отжига на образцах с одинаковой толщиной напыленного слоя происходит небольшое увеличение наносфер за счет их слияния и укрупнение продольных структур (рис. 2 и 3). Что касается усиления сигнала рамановского рассеяния на ПЭТФ, то оно достигает максимального значения при толщине серебра 6 нм и отжиге при температуре 120°C (рис. 4). При увеличении толщины слоя серебра и температуры отжига сигнал SERS стремительно падает. Напыление слоя серебра толщиной более 6 нм приводит к полному покрытию полимерной поверхности пленки или трековой мембраны. На ПЭТФ-подложках без

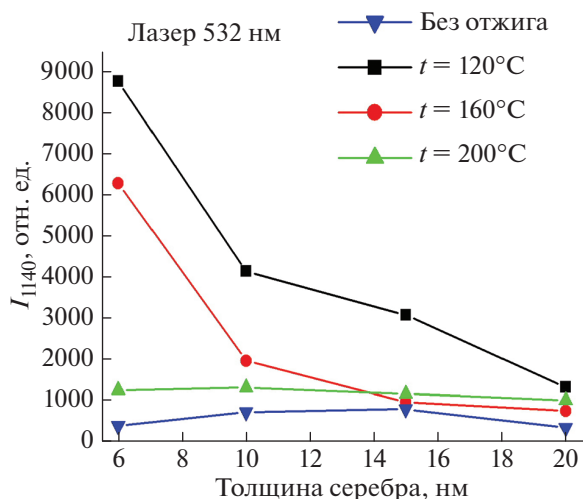


Рис. 4. Графики зависимостей интенсивности SERS-линии  $1140\text{ см}^{-1}$  вещества 4-АВТ от толщины напыляемого серебра на ПЭТФ-подложку при разных режимах отжига.

термического воздействия и при сильном термическом воздействии (200°C) SERS-сигнал низкий при любой толщине слоя серебра (табл. 3). В первом случае это связано с отсутствием выраженных наносфер, а во втором случае это вызвано формированием вытянутых наноструктур, которые обеспечивают плазмонный резонанс в красной спектральной области (вдали от частоты лазерного возбуждения).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В металлических наночастицах, размеры которых сопоставимы с величиной глубины проникновения электромагнитного поля видимого лазерного излучения (10–50 нм), свойства поверхностных плазмон-поляритонов критически сильно зависят от геометрических размеров этих наночастиц [13]. В данной работе было показано, что для длины волны лазерного возбуждения 532 нм оптимальными SERS-наноструктурами являются поверхности в виде округлых металлических гранул с коэффициентом заполнения порядка 50%, а для длины волны 785 нм – в виде вытянутых гранул с коэффициентом заполнения более 75% (табл. 1 и 2). Методами рамановской спектроскопии были установлены закономерности в изменении оптических свойств серебряных и золотых SERS-подложек на основе Si/SiO<sub>2</sub> при изменении морфологии металлических наночастиц.

Схожие условия были применены для формирования SERS-активного слоя на поверхности полимерных пленок и трековых мембран из полиэтилентерефталата. Показано, что максимальная интенсивность сигнала достигается на наноструктурах серебра с напылением 6 нм и температуре отжига 120°C. Полученные пористые SERS-активные субстраты могут быть использованы для предварительной очистки пробы и последующей детекции методом рамановской спектроскопии.

Результаты данной работы имеют большую прикладную значимость, так как разработанные высокочувствительные оптические сенсоры на основе

фильтрующих элементов в виде трековых мембран могут быть использованы в медицине, биологии, промышленности и сельском хозяйстве.

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования научным оборудованием ИФТТ РАН в части исследований с использованием сканирующей электронной микроскопии.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-04-60077).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jin C.J., Lee T.Y., Koo B. et al. // *Sens. Actuat. B*. 2018. V. 255. P. 2399.
2. Maddali H., Miles C.E., Kohn J., O'Carroll D.M. // *Chembiochem*. 2021. V. 22. P. 1176.
3. Sha M.Y., Xu H., Penn S.G. et al. // *Nanomedicine*. 2007. V. 2. P. 725.
4. Chon H., Lee S., Son S.W. et al. // *Analyt. Chem*. 2009. V. 8. P. 3029.
5. Wang J., Wu X., Wang C. et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. V. 31. Art. No. 19958.
6. Lopez A., Lovato F., Oh S.H. et al. // *Talanta*. 2015. V. 146. P. 388.
7. Gribanov D., Zhdanov G., Olenin A. et al. // *Int. J. Mol. Sci*. 2021. V. 22. P. 1842.
8. Zavyalova E., Ambartsumyan O., Zhdanov G. et al. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 1394.
9. Kukushkin V.I., Ivanov N.M., Novoseltseva A.A. et al. // *PLOS One*. 2019. V. 14. Art. No. e0216247.
10. Kristavchuk O.V., Nikiforov I.V., Kukushkin V.I. et al. // *Colloid J*. 2017. V. 79. P. 637.
11. Флеров Г.Н., Анель П.Ю., Дидык А.Ю. и др. // *Атом. энергия*. 1989. Т. 67. № 4. С. 274.
12. Apel P.Yu. // *Radiat. Instr.* 1995. V. 25. Nos. 1–4. P. 667.
13. Кукушкин В.И., Астраханцева А.С., Морозова Е.Н. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. С. 182; Kukushkin V.I., Astrakhanseva A.S., Morozova E.N. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys*. 2021. V. 85. P. 133.
14. Huang X., Neretina S., El-Sayed M.A. // *Adv. Mater*. 2009. V. 21. V. 48. P. 4880.
15. Johnson P.B., Christy R.W. // *Phys. Rev. B*. 1972. V. 6. P. 4370.
16. Garcia M.A. // *J. Phys. D*. 2011. V. 44. Art. No. 283001.

## Formation of island SERS-films on the surface of track membranes and silicon substrates

S. I. Serebrennikova<sup>a</sup>, V. I. Kukushkin<sup>b, \*</sup>, O. V. Kristavchuk<sup>c</sup>, E. N. Morozova<sup>b</sup>,  
A. S. Astrakhanseva<sup>b, d</sup>, A. N. Nechaev<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, 121205 Russia

<sup>b</sup> Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

<sup>c</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

<sup>d</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701 Russia

\*e-mail: kukushvi@mail.ru

The possibility of creating metallic nanoisland SERS-active layers on the surface of porous track membranes made of polyethylene terephthalate and silicon substrates optimized for exciting laser radiation with wavelengths of 532 and 785 nm is demonstrated. The characteristic regularities of changes in the optical properties of SERS structures with changes in the morphology of metal nanoparticles on the substrate surface have been established. The developed structures can be used as SERS chips and highly sensitive filtering SERS elements in optical biosensors.