

УДК 535.016

## ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АССЕМБЛИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА И ЗОЛОТА С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ГКР-СЕНСОРОВ

© 2024 г. А. Ю. Субекин<sup>1</sup>, Т. Е. Пылаев<sup>2, 3</sup>, В. И. Кукушкин<sup>4, \*</sup>,  
Е. В. Рудакова<sup>5</sup>, Б. Н. Хлебцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»,  
Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов — обособленное  
структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального  
исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского»  
Министерства здравоохранения Российской Федерации, Саратов, Россия

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики твердого тела  
имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук», Черноголовка, Россия

<sup>5</sup>Институт физиологически активных веществ Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\*E-mail: kukushvi@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Исследованы оптические свойства золей серебра и золота с различными размерами наночастиц и способ их химического осаждения на поверхности кремния, оксида кремния, стекла и алюминиевой фольги с целью получения ГКР-подложек — перспективных платформ для разработки аптамерных сенсоров и иммунохимического анализа различных патогенов. Установлено, что для работы на лазерах с длинами волн возбуждающего излучения 532, 638 и 785 нм возможно создание универсальных ГКР-подложек на основе коллоидных растворов, полученных жидкофазным химическим методом со средним размером частиц серебра 40 нм и по методу Леопольда–Лендла со средним размером 20 нм.

DOI: 10.31857/S0367676524020086, EDN: RTEMQM

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует необходимость разработки экспресс-систем для высокочувствительного детектирования различных патогенных биологических агентов [1]. Возможность наработки патогенов в достаточно простых «домашних» условиях делает их весьма привлекательными для использования в качестве оружия массового поражения. В связи с этим в ряде стран на законодательном уровне опубликованы списки веществ, требующих постоянного мониторинга и совершенствования систем их обнаружения [2–4]. Помимо предупреждения угрозы биотерроризма также есть необходимость своевременной диагностики различных заболеваний для оказания необходимой терапии и, в случае опасной инфекции (например,

COVID-19), принятия срочных мер для предотвращения ее распространения [5].

Перспективными подходами, способными обеспечить высокую чувствительность и специфичность определения различных патогенов, являются аптасенсорные платформы и иммунохимический анализ на основе спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР). Они работают по принципу специфического взаимодействия аптамера или антитела с детектируемой мишенью (антигеном). Получающиеся в результате такого взаимодействия комплексы детектируются на ГКР-подложке, с которой, как правило, связан аптамер или антитело [6, 7].

В настоящее время уже существуют многочисленные типы упомянутых выше сенсоров, которые

позволяют определять различные патогены с высокой чувствительностью [8–10]. Вместе с тем, не теряет актуальности задача по ГКР – детекции мономолекулярного взаимодействия детектирующей молекулы и антигена, которая продиктована необходимостью определения сверхмалых доз целого ряда патогенов [11, 12]. Одним из возможных решений данной задачи является непрерывный поиск и анализ способов получения подложки, способной дать максимально высокую интенсивность ГКР.

В данной работе мы исследовали способ химического осаждения различных коллоидных растворов серебра и золота на поверхности подложек из стекла, оксида кремния, монокристаллического кремния (далее кремний) и алюминиевой фольги (далее фольга). Наш выбор обоснован следующими соображениями:

- известно множество простых и доступных способов химического синтеза коллоидных растворов серебра и золота, которые позволяют получить наночастицы нужного размера [13–15];
- хорошо изучена химия поверхности перечисленных выше материалов, что позволяет легко подобрать ее модификатор для эффективной хемосорбции наночастиц [16, 17];
- фольга, кремний и оксид кремния имеют низкий фоновый оптический отклик, который можно легко учесть при получении ГКР-спектров [18].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### *Материалы*

В работе использовали коммерческие реагенты без дополнительной очистки: 25% водный раствор цетилтриметиламмония хлорида (ЦТАХ), цетилтриметиламмония бромид (ЦТАБ), L-аскорбиновая кислота (АА), нитрат серебра ( $\text{AgNO}_3$ ), гидроксилamina гидрохлорид ( $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ), натрия гидроксид, боргидрид натрия ( $\text{NaBH}_4$ ), 4-аминотиофенол (4-АВТ) и 3-аминопропилтриэтоксисилан (АПТЭС) (Sigma-Aldrich, США); тригидрат тетрахлораурата водорода ( $\text{HAuCl}_4$ ) (ALFA Aesar, США); 37%-водный раствор перекиси водорода ( $\text{H}_2\text{O}_{2\text{водн}}$ ) и 30%-водный раствор аммиака ( $\text{NH}_{3\text{водн}}$ ) (Ленреактив, Россия). Во всех экспериментах использовалась деионизованная вода, полученная из системы Milli-Q Integral 5.

В качестве материала подложек использовали монокристаллический кремний, полученный по методу Чохральского (ООО «Телеком-СТВ», Россия), оксидированный кремний с толщиной слоя оксидной пленки 300 нм (Nova Electronic Materials, США), оптическое стекло К8 (ООО «Флюорит», Россия) и алюминиевую фольгу (Solve Grocery Store, Китай).

### *Синтез наночастиц золота*

Наночастицы золота были получены жидкофазным химическим синтезом по двухстадийному зародышевому протоколу [19] с незначительными модификациями [20]. На первом этапе Au нанокластеры готовили путем смешивания 5 мл водного раствора ЦТАБ (0.2 М), 5 мл  $\text{HAuCl}_4$  (1 мМ) с 600 мкл  $\text{NaBH}_4$  (0.01 М). Затем были приготовлены 10-нм Au зародыши путем смешивания на магнитной мешалке 20 мл 0.1 М ЦТАХ, 15 мл 0.1 М аскорбиновой кислоты, 0.5 мл Au нанокластеров и 20 мл 0.5 мМ  $\text{HAuCl}_4$ . Полученные наночастицы трижды центрифугировали при 20 000 g по 60 мин, финальный препарат Au зародышей ресуспендировали в 10 мл 0.01 М ЦТАХ. На втором этапе 10-нм Au зародыши доращивали до необходимых размеров по следующей методике. В стеклянной колбе смешивали 40 мл 0.1 М ЦТАХ, 2.6 мл 0.01 М АА и Au зародыши размером 10 нм, после чего добавляли по каплям 10 мл 2 мМ  $\text{HAuCl}_4$ . Размер полученных наночастиц зависит от количества Au зародышей: для синтеза частиц размером 40 нм добавляли 500 мкл 10-нм Au зародышей, для 60 нм – 160 мкл, 80 нм – 70 мкл, 100 нм – 40 мкл. Полученные наночастицы центрифугировали при 4000–8000 g в зависимости от размера и ресуспендировали полученные осадки в 5 мл воды.

### *Синтез наночастиц серебра*

Наночастицы серебра были получены жидкофазным химическим синтезом по аналогичному вышеописанному двухстадийному зародышевому протоколу. На первом этапе получали 40 нм Ag наночастицы на 10 нм Au зародышах следующим образом. В пластиковой пробирке с резьбовой крышкой смешивали 50 мл 0.02 М ЦТАХ, 0.5 мл 10 нм Au зародышей, 0.5 мл 0.1 М  $\text{AgNO}_3$  и 2.5 мл 0.1 М АА. Далее инкубировали полученную смесь при 70°C в течение 2 ч. Полученные наночастицы дважды центрифугировали при 8000 g по 15 мин, ресуспендировали осадок в 50 мл 0.01 М ЦТАХ, и фильтровали через шприцевые нейлонные фильтры с диаметром пор 0.22 мкм. На втором этапе полученные 40 нм Ag наночастицы использовали в качестве зародышей для доращивания Ag наночастиц необходимых размеров по следующей методике. В пробирке с резьбовой крышкой смешивали 8 мл 0.02 М ЦТАХ, 40 нм Ag зародыши, 0.1 мл 0.1 М  $\text{AgNO}_3$  и 0.4 мл 0.1 М АА. Далее инкубировали полученную смесь при 70°C в течение 2 ч. Размер полученных наночастиц зависит от количества Ag зародышей: для синтеза частиц размером 60 нм частиц добавляли 4 мл 40 нм Ag зародышей, для 80 нм – 2 мл, для 100 нм – 1 мл. Полученные наночастицы дважды центрифугировали при 4000–8000 g в зависимости от размера, ресуспендировали осадок в 1 мл 0.01 М ЦТАХ, и фильтровали через шприцевые нейлонные фильтры с диаметром пор 0.22 мкм.

### Синтез наночастиц серебра по методу Леопольда–Лендла

Синтез наночастиц серебра проводили по методу Леопольда–Лендла [13] с незначительными модификациями [21]. При комнатной температуре при интенсивном перемешивании медленно по каплям добавляли 10 мл  $10^{-2}$  М раствора нитрата серебра к 90 мл раствора гидрохлорида гидроксилamina и гидроксида натрия с концентрациями  $1.67 \cdot 10^{-3}$  и  $3.33 \cdot 10^{-3}$  М, соответственно. После завершения добавления нитрата серебра реакцию проводили в течение 30 мин. Полученный коллоидный раствор центрифугировали при 5000 g и ресуспендировали в 10 мл воды.

### Характеристика наночастиц

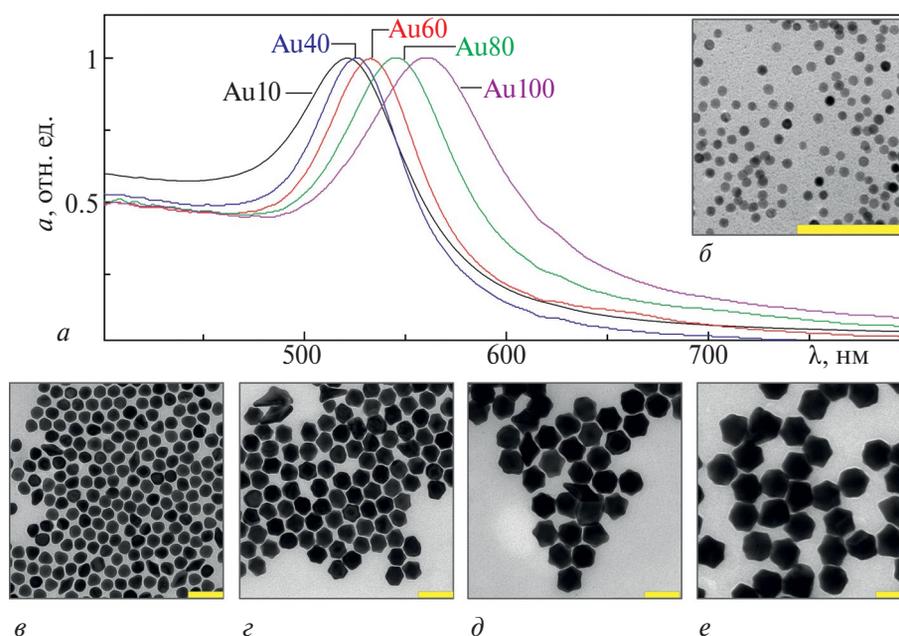
Спектры экстинкции измеряли на спектрофотометре Specord S-300 (Analytik Jena, Германия). Изображения просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) получали на микроскопе Libra 120 (Carl Zeiss, Германия) в Центре коллективного пользования исследовательским оборудованием в области физико-химической биологии и нанобиотехнологии «Симбиоз» ИБФРМ РАН, Саратов. Для измерений с помощью ПЭМ наночастицы дважды центрифугировали и повторно диспергировали в воде. 10 мкл отмытых наночастиц наносили на медную микроскопическую сеточку для ПЭМ с формваровой подложкой, изображения получали при напряжении 120 кВ.

### Подготовка поверхности и иммобилизация золей

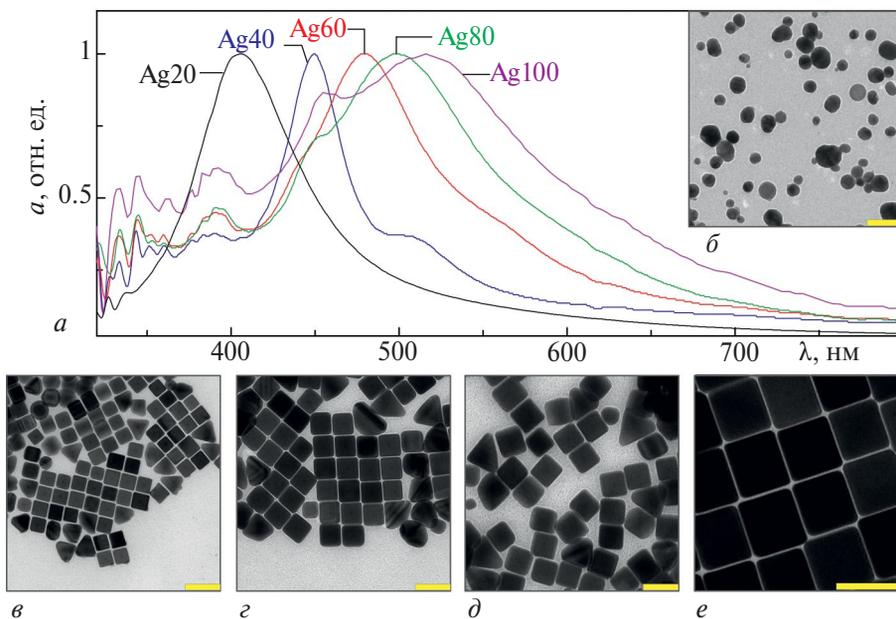
Подложки дважды подвергали ультразвуковой обработке в смеси водных растворов аммиака и перекиси водорода ( $\text{NH}_{3\text{водн}} : \text{H}_2\text{O}_{2\text{водн}} : \text{H}_2\text{O} = 1:1:6$  v:v) в течение 30 мин при  $50^\circ\text{C}$  с последующей тщательной промывкой в деионизированной воде. После этого их выдерживали в сушильном шкафу при  $120^\circ\text{C}$  в течение 45 мин и затем погружали в 0.5% (v:v) раствор АПТЭС в воде и проводили их обработку ультразвуком при  $50^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. По окончании этой процедуры, подложки тщательно промывали деионизированной водой и выдерживали в сушильном шкафу при  $120^\circ\text{C}$  в течение 12 мин. Подложки охлаждали до комнатной температуры и наносили золи в две зоны по 10 мкл, выдерживали их 2 ч в закрытой чашке Петри, высушивали под вакуумом и тщательно промывали деионизированной водой. Промытые подложки снова высушивали под вакуумом и хранили в пластиковых пробирках в атмосфере азота.

### Регистрация ГКР-спектров

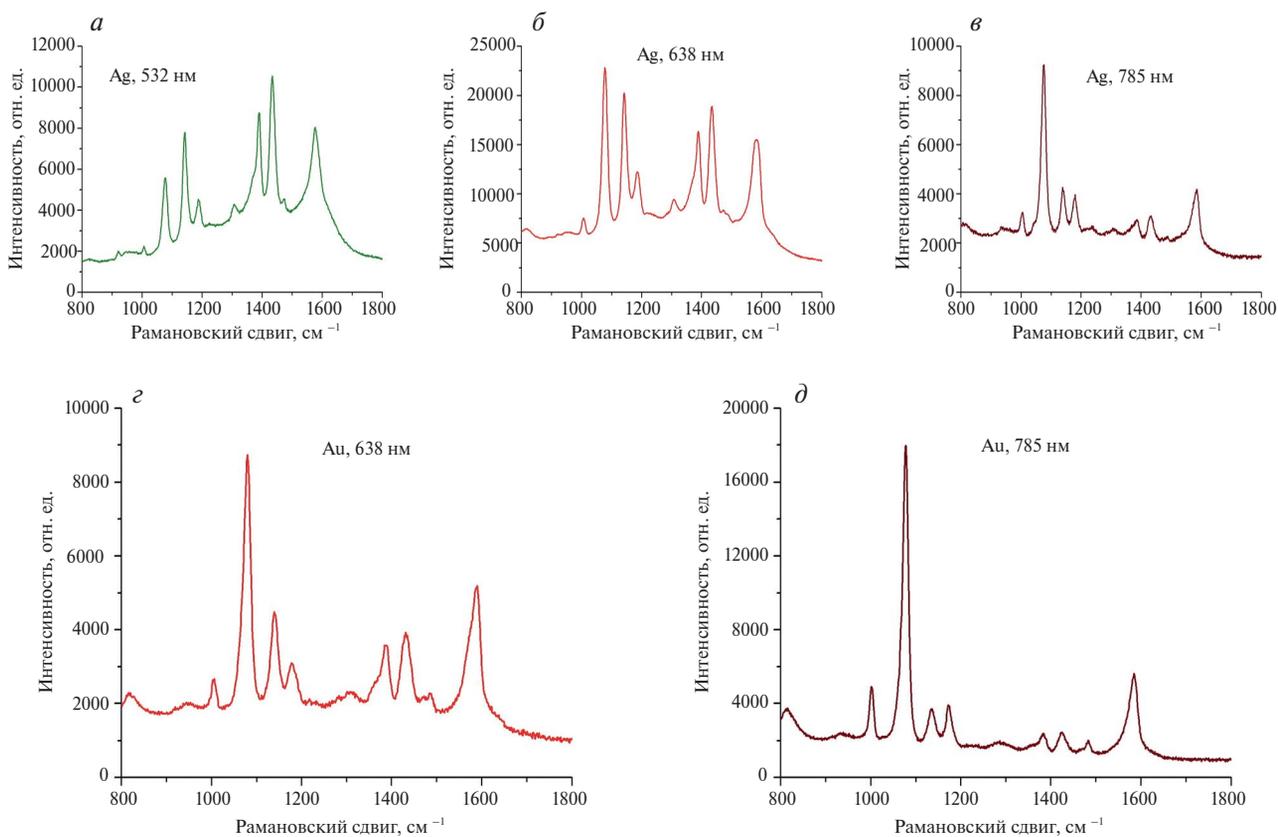
На поверхность ГКР-подложек наносили по 2 мкл  $1 \cdot 10^{-5}$  М раствора 4-АВТ. Капле давали высохнуть, после чего проводили измерение сигнала. Спектры ГКР получали с помощью оптического сканирующего микроскопа Olympus VХ51 (Olympus Corporation, Япония) на базе спектрометров ФОТОН-БИО (ООО «ФОТОН-БИО», Россия) с длинами волн лазерного излучения 532 (мощностью 5 мВт), 638 (30 мВт) и 785 нм (60 мВт). Диаметр



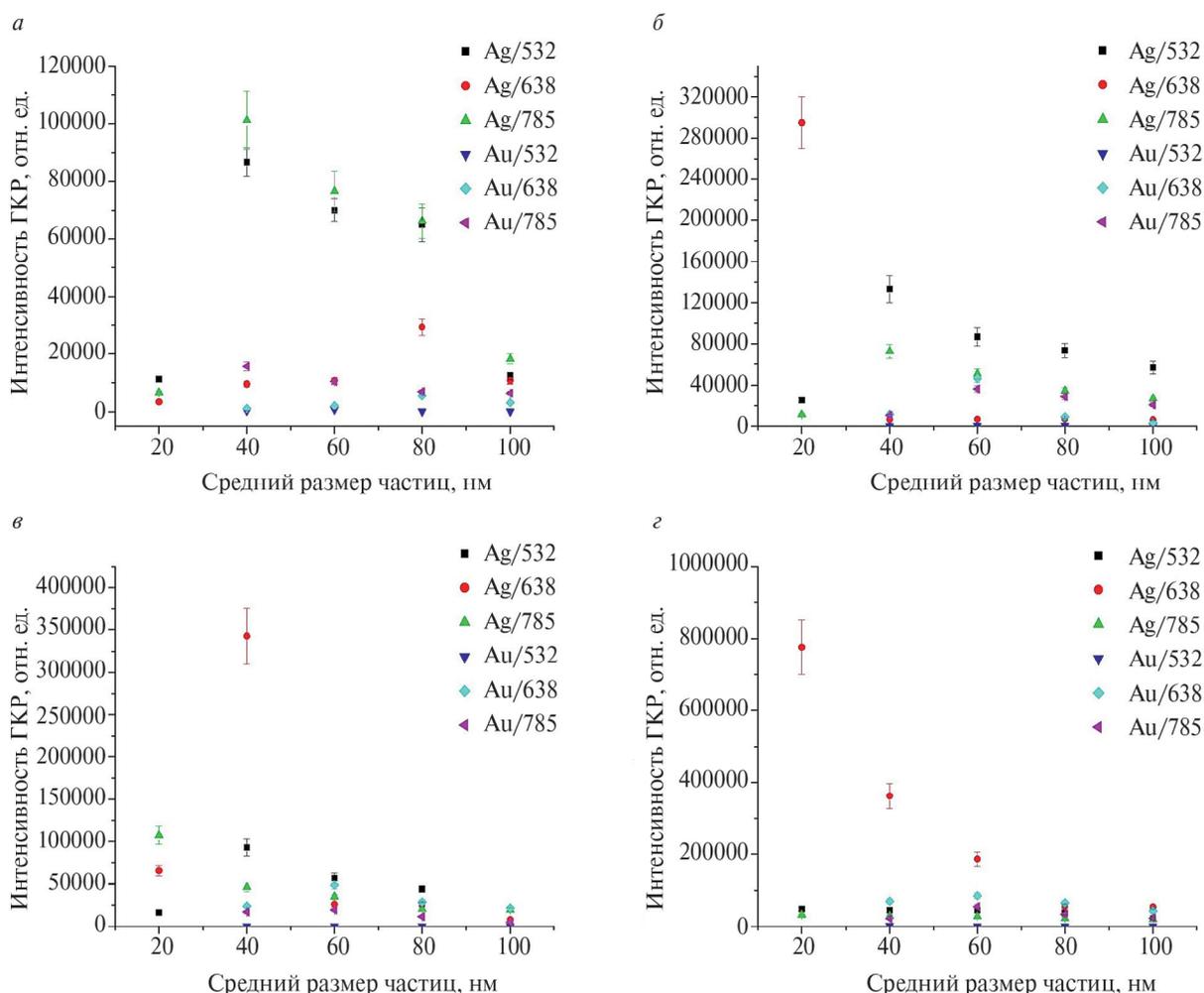
**Рис. 1.** Спектры экстинкции (a); типичные ПЭМ-изображения свежеприготовленных коллоидов Au наночастиц с различными средними размерами: 10 (б); 40 (в); 60 (г); 80 (д); 100 нм (е). Масштабные линейки соответствуют 100 нм.



**Рис. 2.** Спектры экстинкции (а); типичные ПЭМ-изображения свежеприготовленных коллоидов Ag наночастиц с различными средними размерами: 20 (по методике Леопольда–Лендла [13, 21]) (б); 40 (в); 60 (г); 80 (д); 100 нм (е). Масштабные линейки составляют 100 нм.



**Рис. 3.** ГКР-спектры 4-АВТ: наночастицы серебра, синтезированные по методике Леопольда–Лендла,  $\lambda_{\text{возб}} = 532$  нм (а); наночастицы серебра, синтезированные по методике Леопольда–Лендла,  $\lambda_{\text{возб}} = 638$  нм (б); наночастицы серебра, синтезированные по методике Леопольда–Лендла,  $\lambda_{\text{возб}} = 785$  нм (в); наночастицы золота с размером 60 нм,  $\lambda_{\text{возб}} = 638$  нм (г); наночастицы золота с размером 60 нм,  $\lambda_{\text{возб}} = 785$  нм (д).



**Рис. 4.** Интенсивность ГКР-линии 1074 см<sup>-1</sup> вещества 4-АВТ в зависимости от среднего размера частиц, их материала и длины волны возбуждающего лазерного излучения на: кремнии (а); оксиде кремния (б); стекле (в) и фольге (з).

лазерного пятна для всех источников излучения составлял 10 мкм. В результате регистрировались спектры 4-АВТ на различных ГКР-поверхностях (при этом время экспозиции составляло 1 с при 20 кадрах записи) и рассчитывались средние значения и ошибки для всех измерений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типичный спектр экстинкции свежесинтезированных коллоидов, используемых для приготовления плазмонных платформ, представлен на рисунках 1а и 2а. На рис. 1б-е и 2б-е показаны ПЭМ-изображения наночастиц, иллюстрирующие их геометрию. Средние размеры частиц, определенные путем обработки ПЭМ-изображений, и значения максимумов плазмонного резонанса, приведены в табл. 1.

Из представленных данных видно, что максимум поглощения коллоидов зависит от среднего размера

**Таблица 1.** Характеристики коллоидов Au и Ag наночастиц

Образец	$\lambda_{\max}$ , нм	Размер, нм
Au-40	526	37.1 ± 5.4
Au-60	533	56.4 ± 7.2
Au-80	545	77.2 ± 6.2
Au-100	560	94.8 ± 8.6
Ag-20 [13,21]	416	20.0 ± 4.6
Ag-40	450	41.2 ± 6.8
Ag-60	480	62.1 ± 7.5
Ag-80	498	80.6 ± 9.2
Ag-100	517	98.9 ± 9.7

**Таблица 2.** Интенсивность ГКР-линии 1074 см<sup>-1</sup> вещества 4-АВТ в зависимости от среднего размера частиц, их материала и длины волны возбуждающего излучения

Средний размер частиц, нм	Интенсивность ГКР-линии 1074 см <sup>-1</sup> вещества 4-АВТ, отн. ед.											
	Кремний			Окись кремния			Стекло			Фольга		
	Длина волны возбуждающего излучения, нм											
	532	638	785	532	638	785	532	638	785	532	638	785
20	11300 ± 1120	3400 ± 400	6700 ± 720	25000 ± 2580	295000 ± 30100	11100 ± 1120	16400 ± 1580	65600 ± 6710	107500 ± 11000	48200 ± 4780	775400 ± 78100	32400 ± 3190
	86700 ± 8950	9600 ± 1020	101200 ± 10760	133000 ± 14500	6500 ± 700	72400 ± 7340	92500 ± 9340	342600 ± 3590	46000 ± 4780	45200 ± 4600	361900 ± 37100	28900 ± 2800
	70000 ± 7120	10700 ± 1150	76600 ± 8030	86700 ± 7990	6600 ± 700	50700 ± 5090	56700 ± 5700	25900 ± 2610	34900 ± 3510	45000 ± 4620	185900 ± 19500	27700 ± 2790
	65000 ± 6950	29300 ± 1980	66200 ± 6740	73300 ± 7640	6600 ± 660	34700 ± 3540	44000 ± 4450	25900 ± 2610	20400 ± 2110	37000 ± 3820	55000 ± 5680	22600 ± 2380
100	12400 ± 1260	10700 ± 1090	18200 ± 1850	56700 ± 5780	6100 ± 660	26900 ± 2710	5300 ± 600	8000 ± 750	19900 ± 1990	22300 ± 2220	54000 ± 5670	19600 ± 2150
	Серебро											
	260 ± 20	1100 ± 150	15700 ± 1620	180 ± 20	11300 ± 1120	10500 ± 1100	0	24000 ± 2510	17300 ± 1870	1200 ± 130	69400 ± 7150	22300 ± 2600
	760 ± 80	2000 ± 220	10500 ± 1130	320 ± 30	46300 ± 4520	36300 ± 3540	0	48600 ± 4950	19500 ± 2130	0	84800 ± 8800	54800 ± 5850
80	0	5600 ± 580	7000 ± 850	320 ± 30	9000 ± 1030	28700 ± 2960	0	28600 ± 2960	11600 ± 1250	0	65000 ± 6800	34600 ± 3660
	0	3100 ± 350	6450 ± 710	320 ± 30	3300 ± 410	20800 ± 2120	0	21700 ± 2210	5300 ± 610	0	43000 ± 4900	23600 ± 2500
	Золото											
	260 ± 20	1100 ± 150	15700 ± 1620	180 ± 20	11300 ± 1120	10500 ± 1100	0	24000 ± 2510	17300 ± 1870	1200 ± 130	69400 ± 7150	22300 ± 2600
760 ± 80	2000 ± 220	10500 ± 1130	320 ± 30	46300 ± 4520	36300 ± 3540	0	48600 ± 4950	19500 ± 2130	0	84800 ± 8800	54800 ± 5850	
0	5600 ± 580	7000 ± 850	320 ± 30	9000 ± 1030	28700 ± 2960	0	28600 ± 2960	11600 ± 1250	0	65000 ± 6800	34600 ± 3660	
0	3100 ± 350	6450 ± 710	320 ± 30	3300 ± 410	20800 ± 2120	0	21700 ± 2210	5300 ± 610	0	43000 ± 4900	23600 ± 2500	

и материала частиц. Полученные результаты позволяют предположить, что на ГКР-подложках с серебряными частицами интенсивность сигнала будет выше при длине волны лазера, находящегося в зеленой области спектра (532 нм), а с золотыми в красной области спектра (638 и 785 нм).

В результате экспериментов получены КР-спектры вещества 4-АВТ, которые показаны на рис. 3. Видно, что в зависимости от материала частиц и длины волны возбуждающего лазерного излучения изменяется соотношение интенсивностей характеристических полос спектра 4-АВТ. Это вызвано зависимостью спектрального положения пика плазмонного поглощения подложки от материала наночастиц и взаимодействием SH-группы анализируемого вещества с серебром и золотом [22]. Хорошо известно также, что аминотиофенол может димеризоваться на ГКР подложках с образованием димеркаптоазобензена, что существенно влияет на его спектр комбинационного рассеяния [23]. Для сравнительной оценки усиления ГКР различными подложками была выбрана линия спектра  $1074\text{ см}^{-1}$  благодаря ее сохраняющейся относительно стабильной и высокой интенсивности от опыта к опыту.

В результате опытов проанализировано 32 типа различных ГКР-подложек, полученных в результате иммобилизации частиц из перечисленных в табл. 1 золь на поверхность кремния, оксида кремния, стекла и алюминиевой фольги. Результаты представлены на рис. 4 и в табл. 2.

Из представленных данных видно, что ГКР-интенсивность 4-АВТ на всех поверхностях с серебряными наночастицами выше таковой для поверхностей с золотыми частицами. Следует отметить, что уровень интенсивности сигнала зависит не только от типа, размера наночастиц и длины волны возбуждающего излучения, но и от материала подложки. Это проявляется как в абсолютных значениях интенсивности линии  $1074\text{ см}^{-1}$ , так и в положении ее максимумов интенсивности относительно длины волны лазера (выделены зеленым и желтым цветом). Мы полагаем, что данный эффект, в первую очередь, связан с различной «упаковкой» частиц в агрегаты при высушивании на различных типах подложек.

Было установлено, что предел обнаружения анализируемого вещества составляет  $10^{-8}$  М. С учетом того факта, что при мечении, например, антител на одну детектирующую молекулу таких меток можно посадить несколько, полученные подложки являются перспективными для использования их в аптасенсорах и иммунохимическом анализе.

По итогам исследования установлено, что для работы на лазерах с длиной волны возбуждающего излучения 532, 638 и 785 нм возможно создание универсальных ГКР-подложек на основе коллоидных растворов, полученных жидкофазным

химическим методом со средним размером частиц серебра 40 нм и по методу Леопольда–Лендла со средним размером 20 нм. Показан высокий потенциал их применимости в аптасенсорах и иммунохимическом анализе. В дальнейших исследованиях мы планируем рассмотреть другие способы получения ГКР-поверхностей и разработать на их основе высокочувствительные оптические сенсоры для детектирования биологических объектов.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-30003).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон № 492 от 30 декабря 2020 г.
2. <https://emergency.cdc.gov/agent/agentlist-category.asp>.
3. <https://www.who.int/health-topics/biological-weapons>.
4. Конвенция о запрещении биологического и токсинного оружия от 10 апреля 1972 г.
5. <https://стопкоронавирус.рф>.
6. *Darwish I.A.* // Int. J. Biomed. Sci. 2006. V. 2. P. 217.
7. *Bojorge R.N., Salgado A.M., Valdman B.* // Braz. J. Chem. Eng. 2009. V. 26. No. 2. P. 227.
8. *Zhou L., Zhou J., Feng Z. et al.* // Analyst. 2016. V. 141. P. 2534.
9. *Lim C.Y., Granger J.H., Porter M.D.* // Analyt. Chim. Acta X. 2019. V. 1. Art. No. 100002.
10. *Kamorachia K., Sakamoto K., Laochareonsukc R.* // RSC Advances. 2016. V. 6. P. 97791.
11. *Byzova N.A., Zvereva E.A., Zherdev A.V. et al.* // Analyt. Chim. Acta. 2011. V. 701. No. 2. P. 209.
12. *Dzantiev B.B., Urusov A.E., Zherdev A.V.* // Biotechnol. Acta. 2013. V. 6. No. 4. P. 94.
13. *Leopold N., Lendl B.* // J. Phys. Chem. B. 2003. V. 107. P. 5723.
14. *Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В.* // Усп. химии. 2008. Т. 77. № 3. С. 242.
15. *Lee P.C., Meisel D.* // J. Phys. Chem. 1982. V. 86. P. 3391.
16. *Лисичкин Г.В.* Модифицированные кремнеземы в сорбции, катализе и хроматографии. М.: Химия, 1986. 247 с.
17. *Чукин Г.Д.* Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М.: Тип. «Паладин»: Принта, 2010. 288 с.
18. *Копицын Д.С., Котелев М.С., Зуангирова М.Ю. и др.* // Башкир. хим. журн. 2014. Т. 21. № 4. С. 104.
19. *Zheng Y., Zhong X., Li Zh., Xia Y.* // Part. Part. Syst. Charact. 2014. V. 31. P. 266.
20. *Khlebtsov B.N., Tumskiy R.S., Burov A.M. et al.* // ACS Appl. Nano Mater. 2019. V. 2. No. 8. P. 5020.

21. Zavyalova E., Ambartsumyan O., Zhdanov G. et al. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. No. 6. P. 1394.      Kukushlin V.I., Astrakhantseva A.S., Morozova E.N. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 2. P. 133.
22. Кукушкин В.И., Астраханцева А.С., Морозова Е.Н. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 2. С. 182;      23. Canpean V., Astilean S. // *Spectrochim. Acta Part A*. 2012. V. 96. P. 862.

## Studying the optical properties of assembled silver and gold nanoparticles for the purpose of creating SERS sensors

A. Yu. Subekin<sup>1</sup>, T. E. Pylaev<sup>2, 3</sup>, V. I. Kukushkin<sup>4\*</sup>, E. V. Rudakova<sup>5</sup>, B. N. Khlebtsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Federal Research Center «Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», Saratov, 410049 Russia*

<sup>3</sup>*Razumovsky Saratov State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saratov, 410000 Russia*

<sup>4</sup>*Osipyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Science, Chernogolovka, 142432 Russia*

<sup>5</sup>*Institute of Physiologically Active Compounds at Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

\*e-mail: kukushvi@mail.ru

The optical properties of silver and gold sols with different sizes of nanoparticles and the method of their chemical deposition on the surface of silicon, silicon oxide, glass and aluminum foil were studied in order to obtain SERS substrates – promising platforms for the development of aptamer sensors and immunochemical analysis of various pathogens. It has been established that for operation on lasers with exciting radiation wavelengths of 532, 638 and 785 nm, it is possible to create universal SERS substrates based on colloidal solutions obtained by the liquid-phase chemical method with an average silver particle size of 40 nm and by the Leopold-Lendl method with an average size of 20 nm.