

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ НАНОКЛАСТЕРОВ
И НАНОМАТЕРИАЛОВ

УДК 541.182.43:541.39:546.57

ПОЛУЧЕНИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СМАЧИВАЕМОСТЬ
ДВУСТОРОННИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТА
СЕРЕБРО–СОРБИТАН МОНООЛЕАТ

© 2020 г. М. Г. Демидова^{a,*}, А. Н. Колодин^{a,b}, Е. А. Максимовский^{a,b}, А. И. Булавченко^{a,b}

^aРоссийская академия наук, Сибирское отделение, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева,
630090 Новосибирск, Россия

^bНовосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

*e-mail: tatyana@niic.nsc.ru demidova@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 17.12.2019 г.

Принята к публикации 21.01.2020 г.

Для получения тонких двусторонних серебряных пленок на стеклянной и кварцевой подложках использованы 8×10^{-5} – 1×10^{-3} М (по серебру) растворы редиспергата нанокмозита серебро-сорбитан моноолеат в *n*-гептане. Методом фотон-корреляционной спектроскопии показано, что размер частиц в растворах изменяется в диапазоне 9–90 нм. Пленки охарактеризованы методами атомной абсорбции, спектрофотометрии, измерения краевых углов смачивания и сканирующей электронной микроскопии. Наличие плазмонного поглощения серебра ($\lambda = 402$ – 440 нм) установлено для пленок, полученных в $(0.8$ – $2) \times 10^{-4}$ М растворах; и после термообработки всех пленок при 200°C.

Ключевые слова: серебряные пленки, стеклянные и кварцевые подложки, метод фотон-корреляционной спектроскопии, размер частиц, плазмонное поглощение серебра

DOI: 10.31857/S0044453720080063

Одним из перспективных направлений нанотехнологии является получение тонких (толщина менее 300 нм) металлических пленок, в частности серебра, обладающего уникальными характеристиками поверхностного плазмонного резонанса и высокой проводимостью [1]. Пленки на основе серебра широко применяются в оптоэлектронике в жидкокристаллических дисплеях, ячейках солнечных батарей, био- и химических сенсорах, оптических фильтрах, фотодетекторах, источниках света [2–5]. Пленки получают с помощью физических и химических методов. К первым относятся термическое испарение, испарение под действием пучка электронов, эпитаксия с помощью молекулярного пучка, магнетронное распыление [3]. Эти методы обеспечивают формирование однородных пленок варьируемой толщины на стеклах и полупроводниковых материалах. Однако они требуют сложной аппаратуры и высокого вакуума (10^{-11} – 10^{-6} Торр). Химические методы очень разнообразны: осаждение из газовой фазы (chemical vapour deposition (CVD)) [6], осаждение из жидкой фазы (chemical bath deposition (CBD)), совмещающее процесс получения и осаждения серебра [7, 8]. Однако этот метод в основном применяется для получения пленок из соединений

серебра (оксида, сульфида, галогенидов, фосфата) и его допирования в полупроводниковые соединения. Широкое распространение в последнее время получили химические методы, включающие последовательно синтез наночастиц серебра, получение дисперсии в водных или органических растворах, нанесение ее на подложку [4, 9–12] и в ряде случаев последующее нагревание [10] и/или обработку реагентами [11]. К достоинствам таких методов относятся доступность и экономичность, а также возможность применения гибких подложек (например, полиэтилентерефталат) [2, 11]. В химических методах весьма актуальны ПАВ [4, 10, 11]. В качестве компонентов реакционной смеси они формируют гидроили органозоли, обеспечивая единую форму, монодисперсность наночастиц и выступают в роли их стабилизаторов.

Ранее для получения проводящих серебряных пленок толщиной 500 нм нами использованы дисперсии композита серебра с неионогенным ПАВ – сорбитан моноолеатом (Span 80) [13]. Одновременно установлен факт адсорбции серебра из этих растворов на поверхности стекла, кварца и полимерных материалов.

Цель представленной работы заключается в расширении возможностей применения разбавленных растворов редиспергата нанокompозита Ag-Span 80 для получения двусторонних серебряных пленок малой толщины, изучения закономерностей их формирования и свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. В работе использовали *n*-гептан (эталонный), этилацетат и хлороформ (“х. ч.”), ацетон (“ос. ч. 9-5”), этиловый спирт (ректификованный 96%), сорбитан монолеат (Sigma Aldrich), азотнокислое серебро (“х. ч.”), моногидрат гидразина (“х. ч.”), азотную кислоту (“ос. ч. 27-5”), деионизованную воду. Растворы реагентов готовили непосредственно перед синтезом. Раствор ПАВ в этилацетате выдерживали неделю после приготовления. Срок его годности для получения адсорбционных пленок составлял два месяца. Растворы для получения пленок были свежеприготовленными. Для подложек использовали предметные стекла $25.4 \times 76.2 \times 1$ мм (ПАО “Стеклоприбор”) натрий-кальций силикатного стекла, содержащего оксиды металлов: $\text{Na}_2\text{O} - 12.7$, $\text{CaO} - 6.7$, $\text{MgO} - 3.4$ мас. % и пластины кварцевого стекла КУ-1. Толщина подложек — 1 мм.

Методика подготовки подложек. Подложки ($37 \times 9 \times 1$ мм) вначале последовательно помещали на 3 мин в бюксы с этиловым спиртом, ацетоном и водой. Затем каждую подложку опускали в отдельную пробирку и заливали свежеприготовленной хромовой смесью на 40–50 мин. После чего многократно промывали водой, затем ацетоном (двумя порциями по 10 мл), сушили на воздухе и хранили отдельно в закрытом сосуде в темноте.

Методика получения пленок. Методика получения нанокompозита и его редиспергата подробно изложена в [13]. Подложки вертикально помещали в пробирки, приливали по 5–6 мл раствора редиспергата нанокompозита, содержащего $8 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$ М серебра в гептане и оставляли в темноте при комнатной температуре. Спустя сутки стеклянным капилляром медленно отбирали раствор, затем подложки с двусторонними пленками сушили на воздухе в течение 2 ч. Каждую пленку хранили отдельно в закрытом сосуде в темноте. Съемку спектров поглощения пленок, обработку полярными растворителями и термообработку проводили спустя сутки после их получения. С этой целью пленки на весу помещали в кварцевые чашки и нагревали в лабораторной печи L 03-15/12 с программируемым регулятором температуры (ЛАС, Чехия). Подъем температуры до заданного режима (200–400°C) происходил в течение 1 ч, нагрев при постоянной

температуре 2 ч. Пленки оставляли на ночь в печи до их полного остывания.

Методика травления пленок. Пленки ставили в кюветы вместимостью около 2 мл, для полного их смачивания приливали 1.6 мл HNO_3 (1 : 1) и выдерживали 10 мин, после чего отбирали раствор стеклянным капилляром. Трижды промывали подложку 1.6 мл воды, объединяли с раствором травления и доводили до объема 10 мл. Подложку последовательно промывали этиловым спиртом и ацетоном, сушили на воздухе и взвешивали для определения ее площади. Стандартом служил вес фабричного предметного стекла известной площади, из которого нарезали подложки.

Методы исследований. Содержание серебра в растворах травления определяли методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на спектрофотометре Z-8000, Hitachi.

Концентрацию серебра в редиспергате определяли после его разбавления гептаном по полосе плазмонного поглощения 401 нм ($\epsilon = 1.5 \times 10^4$ см л/моль) на спектрофотометре UV-1700, Shimadzu в кварцевых кюветках с длиной оптического пути 0.2 см. Спектры пленок снимали в интервале 300–1000 нм относительно соответствующей подложки в тех же кюветках.

Концентрацию Span 80 в редиспергате определяли методом элементного микроанализа на анализаторе vario Micro cube после высушивания аликвоты 50 мкл ($m = 2$ мг) в оловянной капсуле.

Эффективный гидродинамический диаметр частиц в растворах для получения пленок измеряли методом динамического рассеяния света (фотон-корреляционной спектроскопии (ФКС)) на спектрометре NanoOmni (Brookhaven, США). Автокорреляционная функция обрабатывалась с использованием мономодального анализа по методу куммулянтов и полимодального анализа при помощи алгоритма Non-Negatively Constrained Least Squares (NNLS). Перед измерением органо-золь предварительно очищали от пыли центрифугированием или четырехкратным циклическим фильтрованием через PTFE мембранный фильтр с диаметром пор 0.2 мкм (Sartorius, Германия) непосредственно в измерительную ячейку из стекла (Eppendorf, Германия). Мощность твердотельного лазера с длиной волны 640 нм составляла 35 мВт, рассеянные частицами фотоны детектировались под углом 90° к источнику излучения. Время накопления фотонов для одного измерения составляло 10–30 с, гидродинамический диаметр определялся как среднее из 15–20 измерений.

Измерения краевых углов смачивания на подложках и пленках проводили на приборе OCA 15 PRO фирмы DataPhysics, оснащенный измерительной видеосистемой с USB-камерой, а также светосильным измерительным объективом с на-

страиваемым углом наблюдения. Все измерения выполнены при нормальных условиях в термостатированном боксе ($T = 298 \pm 2$ К и $p = 1$ бар). Диаметр иглы составлял 0.51 мм. В качестве тестовой жидкости использовали дистиллированную воду. Объем капля был постоянным и составлял ~ 2.0 мкл. Значения краевых углов смачивания измеряли в режиме лежащей капли. Расчет наблюдаемого краевого угла проводили по двум алгоритмам: *Ellipse-Fitting* и *the Young-Laplace*. Конечные значения краевых углов рассчитывали как среднее трех измерений. Результаты расчета по двум алгоритмам совпали в пределах погрешности.

Энергодисперсионный рентгеновский анализ стеклянной подложки, а также изображения пленок после напыления золота в режиме обратно-рассеянных электронов методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) получены с помощью растрового электронного микроскопа JSM 6700F (JEOL, Япония).

ИК-спектры подложек регистрировали на ИК-спектрометре Scimitar FTS 2000.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характеризация растворов для получения пленок. Методами атомной абсорбции и элементного микроанализа установлено, что концентрация серебра в исходном редиспергате композита Ag-Span 80 в гептане равна 0.20 ± 0.02 М, а Span 80 — 0.020 ± 0.001 М. Растворы для исследований адсорбции наночастиц на подложках готовили его разбавлением гептаном. Выбор концентрационного диапазона по серебру был обусловлен стабильностью органозолей и составил 8×10^{-5} – 1×10^{-3} М; концентрация Span 80 во всех растворах была на порядок меньше. Отметим, что концентрация Span 80 в более концентрированных растворах незначительно превышает, а в самом разбавленном в 5 раз меньше его критической концентрации мицеллообразования (4×10^{-5} М [14]).

Характеризацию растворов проводили методами ФКС и спектрофотометрии. В табл. 1 приведены результаты мономодального анализа данных ФКС. Гидродинамический диаметр частиц уменьшается с увеличением концентрации серебра (Span 80) и выходит на постоянное значение. В случае 7×10^{-5} – 4×10^{-4} М растворов значения D_{hz} (усреднение по интенсивности рассеивания) и D_{hn} (усреднение по числу частиц) не совпадают. Это свидетельствует о присутствии в растворе частиц разного размера. Действительно, полимодальный анализ выявил наличие частиц 40–100 нм, хотя количественно преобладают частицы с диаметром порядка 13 нм. Ранее идентичный гидродинамический диаметр фиксировался нами при редиспергировании сухого концентрата в гепта-

Таблица 1. Данные ФКС-анализа исходных для получения пленок растворов наночастиц серебра ($n = 15$ – 20 , $P = 0.95$)

C_{Ag} , М	D_{hz} , нм	D_{hn} , нм
7.4×10^{-5}	136 ± 1	88 ± 6
1.0×10^{-4}	71.3 ± 0.4	19.5 ± 0.6
1.9×10^{-4}	45.8 ± 0.4	11.2 ± 0.2
3.7×10^{-4}	22.5 ± 0.1	8.8 ± 0.3
7.4×10^{-4}	13.2 ± 0.1	10.3 ± 0.5
1.0×10^{-3}	13.6 ± 0.1	9.2 ± 0.6

не. С учетом длины молекулы Span 80 диаметр металлического ядра частиц составил около 5 нм [13].

Спектры плазмонного поглощения серебра в растворах (рис. 1) по форме и положению максимума ($\lambda = 401$ нм) совпадают для всех его концентраций, что является косвенным доказательством преобладания в них частиц близкого размера и отсутствия агрегации наночастиц.

Характеризация подложек. Предварительно установлено, что степень сорбции серебра из редиспергата нанокompозита заметно зависит от типа стекла (визуальный контроль). Поэтому для сравнения в качестве материала подложек выбраны предметное натрий-кальциевое силикатное стекло и кварцевое стекло КУ-1. Подложки готовили по методике, представленной в экспериментальной части.

Согласно [15] адсорбционные свойства стекол зависят от природы силанольных групп. Для их

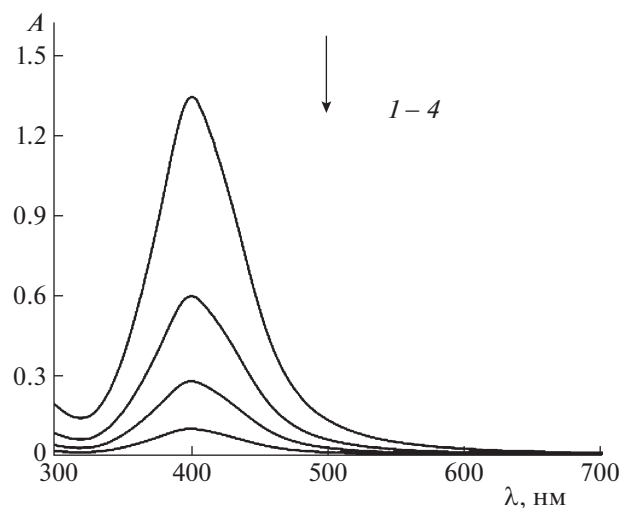


Рис. 1. Спектры поглощения растворов редиспергата композита Ag-Span 80 в гептане в зависимости от концентрации серебра 7.4×10^{-4} (1), 3.7×10^{-4} (2), 1.9×10^{-4} (3) и 7.4×10^{-5} М (4), $l = 0.1$ см.

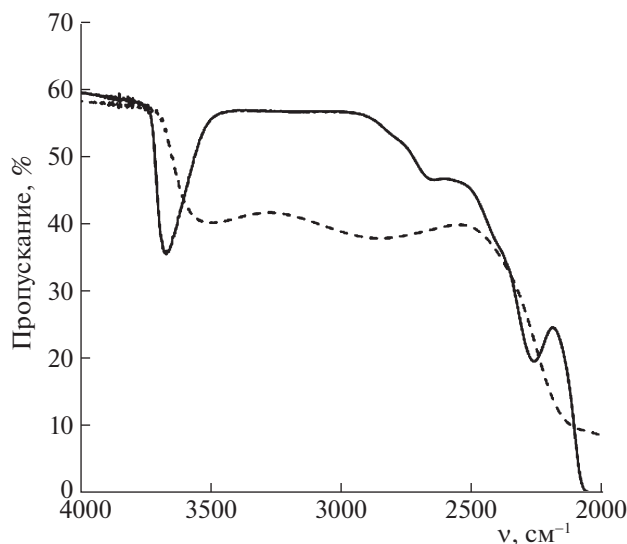


Рис. 2. ИК-спектры кварцевой и стеклянной (пунктирная линия) подложек толщиной 1 мм.

идентификации использовали метод ИК-спектроскопии. Из вида полученных спектров (рис. 2) следует, что для кварца характерно наличие свободных форм силанольных групп кислоты природы (полоса $\nu_{\text{OH}} = 3673 \text{ см}^{-1}$) [15–17]. Стекло поглощает в области ν_{OH} 3200–3500 нм, что отвечает ассоциированным формам силанольных групп, связанных водородными связями [15, 17].

Представляло интерес сопоставить гидрофильные свойства материалов подложки, поскольку от этого параметра также может зависеть адсорбция из неполярных сред. С этой целью проводили измерения краевых углов смачивания подложек водой (табл. 2). Очевидно, что гидрофильность стекла выше, что коррелирует с данными ИК-спектроскопии и соответствует данным [15]. Выдержка подложек в течение суток в

Таблица 2. Значения краевых углов смачивания водой подложки и пленок, рассчитанные по алгоритму Young–Laplace ($n = 3$, $P = 0.95$)

№	Образец	Краевой угол, град	
		стекло	кварц
1	Подложка	18 ± 2	28 ± 2
2	Подложка/гептан	16 ± 2	–
3	Подложка/раствор ПАВ	43 ± 1	33 ± 2
4	Пленка	54 ± 3	68 ± 2
5	Пленка/200°C	15 ± 1	65 ± 2
6	Пленка/400°C	4.2 ± 0.6	–

Примечание. Раствор ПАВ – 4×10^{-5} М Span 80 в гептане; концентрация серебра в растворе гептана для получения пленок – 4×10^{-4} М.

растворе 4×10^{-5} М Span 80 в гептане приводит к увеличению угла смачиваемости для стекла более чем вдвое, а для кварца он практически не меняется (табл. 2).

Получение адсорбционных пленок серебра. Для приготовления двусторонних пленок подложки погружали в растворы нанокompозита Ag-Span 80 (8×10^{-5} – 1×10^{-3} М Ag в гептане) и оставляли в темноте на сутки (оптимальное время выдержки) при комнатной температуре. Процесс адсорбции носит обратимый характер, поскольку при промывании гептаном свежеприготовленных пленок они растворяются. Пленки становятся устойчивыми к промывке спустя сутки после их получения.

Для количественного описания адсорбции полученные пленки растворяли в HNO_3 (1:1) и определяли содержание серебра методом ААС. Зависимость поверхностной концентрации серебра от его содержания в исходном растворе (рис. 3) носит линейный характер ($R^2 = 0.98$) для обеих подложек. Сорбция протекает на 1–4%. Дополнительно определена плотность пленок – $(0.2\text{--}4) \times 10^{-6}$ г/см² и выполнена оценка их эффективной толщины (при допущении использования плотности серебра 10.5 г/см^3). Толщина пленок на стекле составила 0.25–0.77 нм. Это значительно меньше среднего размера частиц 5 нм, что указывает на не сплошной – “островковый” характер покрытия. Последнее подтверждено методом СЭМ (рис. 4а). В случае кварцевой подложки, плотность и эффективная толщина полученных в аналогичных условиях пленок увеличивается примерно в 4.5 раза. Измерение краевых углов смачивания показало заметное уменьшение гидрофильности пленок по сравнению с исходными подложками (табл. 2). Низкая погрешность и хорошая воспроизводимость значений краевых углов, измеренных на различных участках пленки, свидетельствуют о макроскопической однородности полученных пленок. В ходе работы установлен факт зависимости цвета пленок от концентрации композита в исходном растворе, поэтому представлялось интересным исследовать их оптические свойства.

Оптические свойства пленок. Влияние концентрации серебра. С целью их изучения использовали спектрофотометрию. Поскольку вид спектра обусловлен совокупностью процессов поглощения и рассеивания пользовались интегральным показателем – экстинкцией. На основе анализа полученных спектров (рис. 5а, 6а) пленок, высушенных при комнатной температуре, сделан вывод, что их характер зависит от содержания нанокompозита Ag-Span 80 в исходном растворе независимо от типа подложки. Так для низких концентраций $(0.8\text{--}2) \times 10^{-4}$ М наблюдается плазмонное поглощение серебра в области 402–410 нм

и пленки имеют желтый цвет. Спектр поглощения пленок (4, рис. 5) идентичен спектрам поглощения растворов, что свидетельствует об отсутствии агрегации наночастиц при низких концентрациях в процессе высыхания. С ростом концентрации происходит наложение более интенсивной длинноволновой (500–520 нм) полосы, а пленки становятся серо-красноватыми. Такой вид спектра, вероятно, обусловлен наличием помимо малых частиц крупных агрегатов наночастиц [18]. В области 700–1000 нм проявляются процессы рассеивания. Процесс агрегации наночастиц при высыхании в случае больших концентраций (3.9×10^{-4} – 9.7×10^{-4} М) подтверждается снимками СЭМ (рис. 4а). На них отчетливо видны агрегаты (агломераты) наночастиц размером 0.5–1 мкм (малые наночастицы на снимках неразличимы вследствие слабого увеличения). Для кварца по сравнению со стеклом получены большие значения экстинкции пленок, полученных одновременно в одинаковых условиях (рис. 6а).

Влияние температуры. Одним из способов изменения характеристик пленок является их термическая обработка [10]. Нами изучено влияние нагревания пленок при 200–400°C в атмосфере воздуха на их оптические свойства, смачиваемость и морфологию. Показано, что термическая обработка при 200°C пленок, полученных в растворах с высокой концентрацией нанокомпозита, приводит к сдвигу основной полосы поглощения в коротковолновую область (405–440 нм), появлению плеча на 360–370 нм и уменьшению вклада рассеивания (рис. 5). Такая картина наблюдается для пленок на обоих видах подложек. Пленки приобретают желтый цвет; по-видимому, происходит частичная дезагрегация крупных агрегатов наночастиц. Распад агрегатов при 200°C подтверждается данными СЭМ (рис. 4б). Такое поведение свидетельствует о том, что наночастицы серебра в агрегатах не имеют кристаллизационных контактов вследствие стабилизации слоем ПАВ, разложение которого при 200°C незначительно. При малых концентрациях термолиз не приводит к изменению вида спектров, однако поглощение в точке максимума падает в несколько раз. С увеличением температуры до 300–400°C, начинается распад Spn 80, происходит исчезновение полос поглощения и падение фона рассеивания. Величина экстинкции падает, остается практически постоянной и независимой от длины волны. Пленки теряют окраску. Ранее установлено [13], что характер термического разложения и Spn 80 и композита совпадает. Оно протекает в диапазоне 200–550°C и включает несколько плохо разделенных ступеней, сопровождающихся экзоэффектами. Разложение ПАВ-стабилизатора при больших концентрациях серебра приводит к спеканию наночастиц с образованием микронных металлических частиц со свойствами объемного

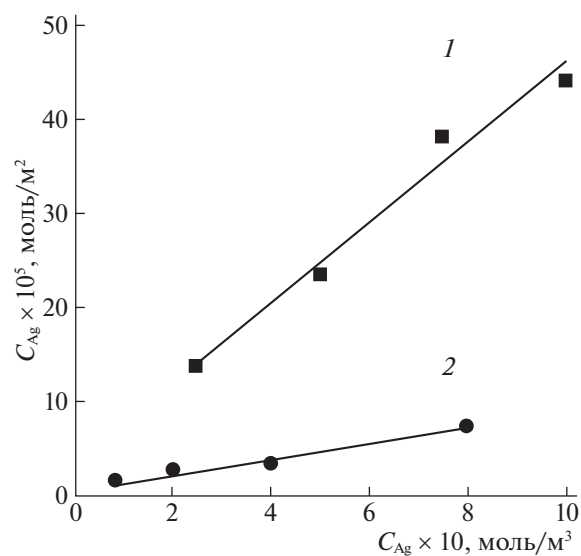


Рис. 3. Зависимости адсорбции серебра на кварцевой (1) и стеклянной (2) подложках от концентрации серебра в растворе.

металла (рис. 4в). При малых концентрациях серебра спекания наночастиц с увеличением температуры до 400°C не происходит (рис. 4г). В отсутствие стабилизатора наночастицы при высоких температурах, согласно [19], могут стабилизироваться стеклянной диэлектрической матрицей, диффузно проникая при ее термическом размягчении как в приповерхностный слой, так и в объем. Возможно, и в нашем случае часть наночастиц при термолизе также переходит с поверхности в объем матрицы, однако зафиксировать их по наличию плазмонного поглощения невозможно вследствие чрезвычайно низкой концентрации. Косвенным подтверждением разложения ПАВ является резкое возрастание гидрофильности пленок на стеклянной подложке при нагревании (табл. 2). Однако, величина угла смачиваемости пленки на кварце остается без изменения. Скотч-тест пленок до и после термообработки показал большую адгезию пленок без термообработки.

В качестве дополнительного способа изменения оптических свойств пленок опробована обработка их полярными растворителями (этиловый спирт, ацетон, хлороформ) [20]. Пленки на стеклянной подложке спустя сутки после приготовления погружали в стакан с растворителем на 5 мин. Пленки, проявляющие коротковолновое плазмонное поглощение (концентрация нанокомпозита в растворе 8×10^{-5} – 2×10^{-4} М) его сохраняли. В спектрах остальных пленок (4×10^{-4} – 1×10^{-3} М) исчезали полосы поглощения и они становились матово-серыми. Типичное изменение спектра приведено на рис. 6б. Следует под-

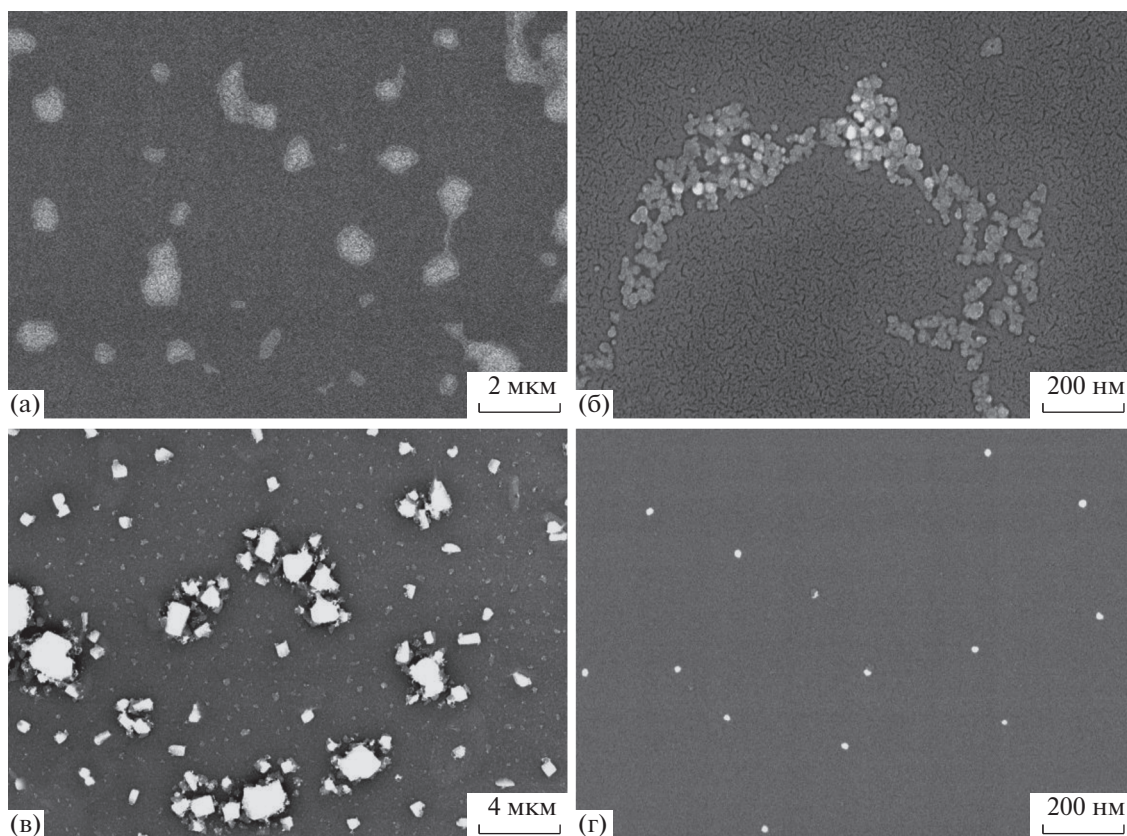


Рис. 4. СЭМ-изображения в обратно-рассеянных электронах пленок на стеклянной подложке без (а) и после термической обработки при 200°C (б) и 400°C (в, г). Концентрация серебра в растворе 4×10^{-4} М (а, б, г) и 1×10^{-3} М (в).

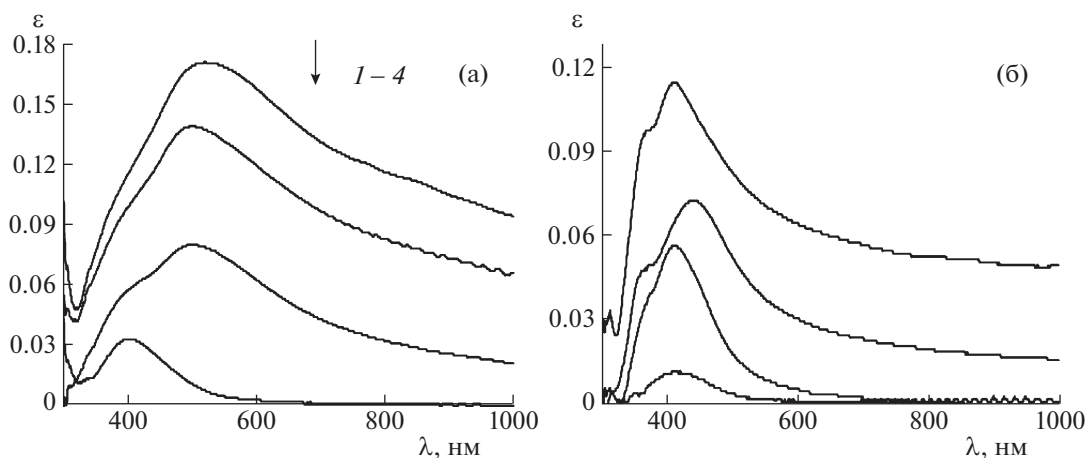


Рис. 5. Спектры пленок на стеклянных подложках до (а) и после термической обработки (б) при 200°C. Концентрация растворов наночастиц серебра – 9.7×10^{-4} (1), 7.8×10^{-4} (2), 3.9×10^{-4} (3) и 7.8×10^{-5} М (4); ϵ – экстинкция.

черкнуть, что обработка гептаном не влияла на оптические свойства пленок во всем диапазоне концентраций.

Таким образом, в настоящей работе предложена методика получения двусторонних серебряных пленок плотностью $(0.2-4) \times 10^{-6}$ г/см² в геп-

тановых растворах нанокompозита серебро-сорбитан моноолеат на стеклянной и кварцевой подложках. Более высокая плотность серебра установлена для кварцевой подложки. Показано влияние концентрации нанокompозита, природы подложки, нагрева при 200–400°C и обработ-

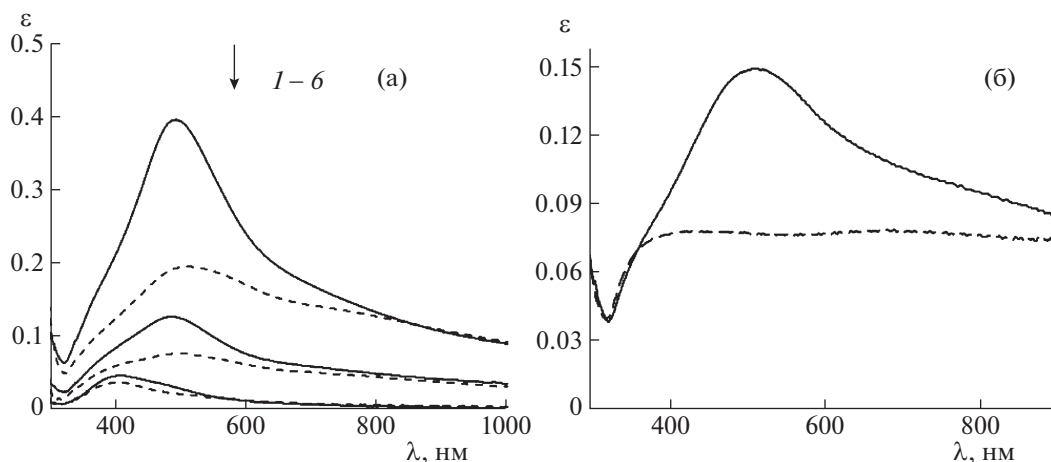


Рис. 6. Сопоставление спектров пленок серебра на стеклянных (пунктирная линия) и кварцевых (сплошная линия) подложках, полученных из растворов серебра концентрацией 8.7×10^{-4} (1, 2); 3.4×10^{-4} (3, 4); 8.5×10^{-5} М (5, 6) (а). Изменение спектра пленки после обработки этиловым спиртом (пунктирная линия), концентрация серебра в растворе — 1×10^{-3} М (б).

ки их полярными органическими растворителями на оптические свойства и морфологию пленок. Выполнена сравнительная оценка гидрофильных свойств подложек и пленок, приготовленных в разных условиях. Показана возможность получения пленок, обладающих коротковолновым плазмонным поглощением.

Авторы признательны к.ф.-м.н. Л.А. Шелудяковой, Н.Ф. Бейзель и к.х.н. А.П. Зубаревой за помощь в проведении анализа методами ИК-спектроскопии, атомно-абсорбционной спектроскопии и элементного микроанализа.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХ СО РАН в области фундаментальных научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jeong S.H., Choi Y., Kim J.Y., Lee T.W. // Part. Part. Syst. Charact. 2015. V. 32. P. 164.
2. Naghdi S., Rhee K.Y., Hui D., Park S.J. // Coatings. 2018. V. 8. P. 278.
3. Baburin A.S., Merzlikin A.M., Baryshev A.V. et al. // Optical Materials. Express. 2019. V. 9. № 2. P. 611.
4. Escoubas L., Carlberg M., Le Rouzo J. et al. // Progress in Quantum Electronics. 2019. V. 63. P. 1.
5. Loiseau A., Asila V., Boitel-Aullen G. et al. // Biosensors. 2019. V. 9. P. 78.
6. Makela M., Hatanpaa T., Mizohata K. et al. // Chem. Mater. 2017. V. 29. P. 2040.
7. Grabell C.N., Freppon D., Hettinger M., Kuebler S.M. // Applied Surface Science. V. 466. P. 230.
8. Antonello A., Jia B., He Z. et al. // Plasmonics. 2012. V. 7. P. 633.
9. Pudlauskaitė J., Jankauskaitė V., Lasauskas A. et al. // Collid. Polym. Sci. 2013. V. 291. P. 1787.
10. Chou K.S., Huang K.C., Lee H.H. // Nanotechnology. 2005. V. 16. P. 779.
11. Magdassi S., Grouchko M., Berezin O., Kamyshny A. // ACS Nano. 2010. V. 4. P. 1943.
12. Shen S.C., Pan C.T., Chang S.J., Lin S.C. // Materials and Manufacturing Processes. 2014. V. 29. P. 498.
13. Демидова М.Г., Арымбаева А.Т., Плюснин П.Е. и др. // Журн. физ. химии. 2019. Т. 93. № 4. С. 573.
14. Michor E.L., Berg J.C. // Langmuir. 2015. V. 31. P. 9602.
15. Старик И.Е. Основы радиохимии. Ленинград: Наука, 1969. 647 с.
16. Красовский А.Н., Шмыков А.Ю., Осмоловская Н.А. и др. // Научное приборостроение. 2014. Т. 24. № 2. С. 5.
17. Гордон А., Форд Р. Спутник химика. М.: Мир, 1976. 541 с.
18. Khlebtsov N.G., Dykman L.A. // J. Quan. Spect. Rad. Trans. 2010. V. 111. P. 1.
19. Ченцова И.Е., Дубовик В.И., Ковивчак В.С. // Вестн. Ом. ун-та. 2012. № 2. С. 110.
20. Булавченко А.И., Поповецкий П.С., Максимовский Е.А. // Журн. физ. химии. 2013. Т. 87. № 10. С. 1779.