

DOI: 10.17725/rensit.2022.14.427

Синтез токопроводящих серебряных чернил с низкой температурой спекания для применения в струйной печати

^{1,2}Рустамова Е.Г., ¹Гриднев А.А., ¹Мухаметова Г.М., ¹Гулин А.А., ²Кагирина М.С., ^{2,3}Губин С.П.

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН, <https://www.chph.ras.ru/>

Москва 119991, Российская Федерация

²НПО "ГРАФЕНИКА", <https://www.grafenika.ru/>

Москва 107143, Российская Федерация

³Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, <http://www.igic.ras.ru/>

Москва 119991, Российская Федерация

E-mail: nebukina@yandex.ru, 99gridnev@gmail.com, mukhametova@mail.ru, aleksandr.gulin@phystech.edu,

maria Kagirina@rambler.ru, gubin@igic.ras.ru

Поступила 22.09.2022, рецензирована 29.09.2022, принята 06.10.2022

Аннотация: Разработаны прозрачные серебряные чернила на основе аминокомплекса серебра для струйной печати. 1,2 –диаминопропан, выполняющий функции растворителя и комплексообразователя, значительно снизил температуру разложения серебряной соли и обеспечил химическую устойчивость полученных чернил при комнатной температуре. Отожженные пленки характеризовались плотной упаковкой и низкими значениями электрического сопротивления (8.5 мкОм·см при температуре отжига 150°C). Полученные чернила обеспечивают производительную струйную печать, сохраняя стабильную работу дюз печатающей головки.

Ключевые слова: серебро, проводящие чернила, органический комплекс серебра, струйная печать, низкотемпературное спекание, печатная электроника

УДК 546.05'57'06

Для цитирования: Рустамова Е.Г., Гриднев А.А., Мухаметова Г.М., Гулин А.А., Кагирина М.С., Губин С.П. Синтез токопроводящих серебряных чернил с низкой температурой спекания для применения в струйной печати. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2022, 14(4):427-436. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.427.

Synthesis of Conductive Silver Ink with a Low Sintering Temperature for Inkjet Printing Applications

Ekaterina G. Rustamova, Maria S. Kagirina

Scientific and Production Association "GRAFENIKA", <https://www.grafenika.ru/>

Moscow 107143, Russian Federation

E-mail: nebukina@yandex.ru, maria Kagirina@rambler.ru

Alexey A. Gridnev, Gulnaz M. Mukhametova, Alexander A. Gulin

Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, <https://www.chph.ras.ru/>

Moscow 119991, Russian Federation

E-mail: 99gridnev@gmail.com, mukhametova@mail.ru, aleksandr.gulin@phystech.edu

Sergey P. Gubin

Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of Russian Academy of Sciences, <http://www.igic.ras.ru/>

Moscow 119991, Russian Federation

E-mail: gubin@igic.ras.ru

Received September 22, 2022, reviewed September 29, 2022, accepted October 6, 2022

Abstract: Transparent silver ink based on silver amino complex for inkjet printing has been developed. 1,2-diaminopropane, which acts as a solvent and complexing agent, significantly lowered the

decomposition temperature of the silver salt and ensured the chemical stability of the resulting ink at room temperature. The annealed films were characterized by close packing and low electrical resistance values ($8.5 \mu\text{Ohm} \cdot \text{cm}$ at an annealing temperature of 150°C). The ink provides productive inkjet printing while maintaining stable operation of the print head nozzles.

Keywords: silver, conductive inks, organic silver complex, inkjet printing, low-temperature sintering, printed electronics

UDC 546.05'57'06

For citation: Ekaterina G. Rustamova, Alexey A. Gridnev, Gulnaz M. Mukhametova, Alexander A. Gulin, Maria S. Kagirina, Sergey P. Gubin. Synthesis of conductive silver ink with a low sintering temperature for inkjet printing applications. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(4):427-436e. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.427.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (428)
 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ (429)
 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЕ И ИХ
ОБСУЖДЕНИЕ (431)
 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (435)
- ЛИТЕРАТУРА (435)

1. ВВЕДЕНИЕ

Печатная электроника – относительно новая область производства различных электронных компонентов и печатных плат на их основе. Ее успешно применяют в таких областях как: изготовление RFID-меток [1], модулей NFC [2], при производстве "гибкой электроники", в том числе различных датчиков [3]. В качестве основных достоинств данной технологии можно выделить простоту и быстроту изготовления конечных изделий. Она особенно полезна в задачах прототипирования, когда требуется быстро и дешево изготовить макеты изделий или проверить на жизнеспособность множество идей, касающиеся устройства прибора или изделия. Еще одним преимуществом печатной электроники является возможность широкого выбора подходящей подложки (стекло, керамика, полимерные материалы и др.).

В настоящий момент в качестве токопроводящих материалов для печатной электроники чаще всего используют чернила на основе углеродных наночастиц

(нанотрубки, графен и др. [4]) или чернил, содержащих наночастицы металлов (серебро, золото, медь, платина и др. [5-7]). Подбор реологических параметров чернил очень зависит от предполагаемого способа печати. Из множества технологий нанесения можно выделить три основных вида печати: трафаретную, струйную и аэрозольную. В данной статье речь будет идти о струйной печати с использованием коммерческого струйного принтера Dimatix DMP-2831 компании Fujifilm Inc., США.

Наиболее популярным типом проводящих чернил для струйного принтера являются чернила, содержащие наночастицы серебра. Это обусловлено оптимальным соотношением "цена – качество". Потребности рынка диктуют необходимость создания и производства высокоточных малоразмерных универсальных и дешевых токопроводящих элементов на легких и гибких подложках. Наносеребро является легкодоступным источником низкого электрического сопротивления при низких температурах постобработки напечатанных структур. Это обусловлено самым низким удельным электрическим сопротивлением серебра как металла, относительной простотой получения и концентрирования золь серебра, а также устойчивостью к окислению на воздухе. Проводимость таких чернил обеспечивается эффектом понижения температуры плавления частиц при уменьшении их размера [8].

Однако, зачастую серебряные чернила, представляющие собой концентрированные золи серебра, имеют склонность к коагуляции и образованию различного рода агрегатов. Этому способствуют как свойства самих наночастиц, так и гидродинамика печатного процесса протекания чернил через узкие капиллярные каналы внутри картриджа принтера, а также сам процесс формирования капель и непосредственно печати, при котором у основания дюз рядом с мениском жидкости может наблюдаться нарост слоя серебра из-за испарения летучих компонентов растворителя.

Одним из потенциальных решений данных проблем могут выступить так называемые безчастичные чернила – чернила, содержащие комплексные соли серебра, которые разрушаются при нагреве, облучении УФ-светом или другом способе активации с образованием металлического серебра. При этом формируется проводящее покрытие. Такие чернила не содержат частиц серебра и представляют собой истинные растворы, поэтому они во многом лишены недостатков чернил, содержащих частицы. При создании таких чернил для струйной печати важно соблюдать следующие критерии:

- состав чернил должен быть подобран таким образом, чтобы обеспечивались длительная химическая устойчивость и оптимальные реологические параметры (вязкость, поверхностное натяжение);
- стабильность печати (стабильное формирование капель чернил без засорения дюз печатающей головки в течение процесса печати);
- концентрация серебра должна обеспечивать максимальную проводимость напечатанных и отожженных структур;
- низкая температура отжига (для создания элементов гибкой электроники).

В связи с выше изложенным, основной целью данного исследования стала разработка стабильных токопроводящих серебряных чернил с низкой температурой спекания для струйной печати на оборудовании подобном принтеру Dimatix DMP (Fujifilm Inc., США).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для выполнения данной работы были использованы следующие материалы: нитрат серебра (хч, ООО "Петронит"), оксалат калия (хч, ООО "РусХим"), 1,2-диаминопропан, (Purity 99%, CAS Number 78-90-0, Sigma-Aldrich), 2-пропанол (осч, АО "ЭКОС-1"), деионизованная вода (удельное сопротивление 18 МОм·см), гидразин гидрат (100%, "РусХим"), ишприцевой мембранный фильтр из полиэфирсульфона (PES 0.22 мкм, Millipore), полиимидная пленка (ПИ, толщина 40 мкм).

Для осуществления струйной печати на оборудовании Dimatix DMP синтезируемые чернила должны обладать следующими характеристиками: вязкость – 10-12 мПа·с, поверхностное натяжение – 28-33 дин, низкая летучесть растворителей (температура кипения выше 100°C) и плотность ≤ 1 .

Серебросодержащие чернила, использованные в данном исследовании, были синтезированы путем растворения оксалата серебра в органических растворителях.

Оксалат серебра был получен в лабораторных условиях ионообменной реакцией путем смешения водных растворов нитрата серебра и оксалата калия, взятых в стехиометрических соотношениях. Образовавшийся белый осадок центрифугировали, промывали несколько раз деионизованной водой и сушили при 40°C.

Получение чернил осуществляли путем растворения 2 г оксалата серебра при охлаждении и интенсивном перемешивании намагнитной мешалке в 1.5 мл деионизованной

воды и 2.5 мл 1,2-диаминопропана до образования прозрачного раствора. Полученный состав содержал 36 масс. % серебра и характеризовался вязкостью более 120 мПа·с и плотностью 2.96 г/см³. Данные параметры значительно превышали оптимальные физические критерии для осуществления струйной печати. В связи с этим для достижения необходимых реологических свойств исходные чернила разбавляли смесью деионизованной воды и изопропилового спирта.

Таким образом, в данном исследовании, путем подбора соотношения растворителей, удалось синтезировать прозрачные серебряные чернила с подходящими реологическими параметрами для струйной печати (вязкость – 10 мПа·с, поверхностное натяжение 33-35 мН/м, плотность 1.01 г/см³). Конечный вариант чернил был отфильтрован с использованием шприцевого фильтра 0.22 мкм для дальнейших испытаний и исследований.

Запись спектров поглощения серебряных чернил осуществляли на спектрофотометре Leki SS2107UV (ЗАО "ЛОИП", Россия) в интервале длин волн от 200 до 1100 нм. Объем образца составлял 3 мл, длина оптического пути – 1 см.

Термическое поведение чернил изучали на анализаторе термогравиметрического анализа (ТГА) фирмы Perkin Elmer (Германия) с использованием алюминиевых ванночек. В ванночку помещали 20 мкл чернил ($m = 20$ мг), подсушивали при температуре 90°C до образования пленки ($m = 8.6$ мг), а затем нагревали в анализаторе до 300°C в атмосфере воздуха со скоростью нагрева 10°C/мин.

Тестирование чернил в печати осуществляли на струйном принтере Dimatix DMP-2831. В процессе печати использовались картриджи Model DMC-11610 с объемом капли 10 пкл, оснащенные пьезоэлектрической печатающей головкой,

имеющей 16 сопел диаметром 21 мкм. Печать вели при комнатной температуре без подогрева подложки, используя стандартные настойки (форма волны Wave 2, напряжение на соплах 23 В).

Формирование печатных элементов (квадратов 7×7 мм, линий 20 мм) выполняли путем послойной печати чернилами (5 слоев) на ПИ-пленке. Для улучшения смачиваемости и адгезии чернил к подложке, ПИ-пленку предварительно очищали от загрязнений, обезжиривали и гидрофилизировали путем выдерживания пленки в гидразингидрате в течение 1 мин. Напечатанные структуры отжигали при различных температурах в течение 30 мин. Отвержденные квадратные пленки использовались для исследования морфологии поверхности, определения качества печати и электрических измерений.

Идентификация фазового состава отоженных образцов была проведена на установке Bruker D8 Advance (Германия), работающей в режиме отражения на Cu-K α – излучении (40 кВ, 40 мА, $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$) с шагом сканирования 4° мин⁻¹.

Морфология и толщина серебряной пленки на поверхности полимерной подложки исследовалась при помощи сканирующего электронного микроскопа Prisma E (Thermo Scientific, Чехия) в режиме высокого вакуума ($\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Па) с ускоряющим напряжением 3.5 кВ. Образец замораживался в жидком азоте в течение 20 мин, затем острым скальпелем производился срез со стороны обратной нанесенному слою серебра. Образец закреплялся на Г-образном держателе при помощи углеродного скотча таким образом, чтобы полученный срез был перпендикулярно оптической оси микроскопа.

Вязкость серебряных чернил измеряли на вибрационном вискозиметре AND SV 10A (Япония).

Поверхностное натяжение чернил оценивали методом стагмометрии.

Сопротивление серебряных пленок измеряли с помощью четырехточечной зондовой системы JG WeChat Support Type ST 2258C (Suzhou Jingge Electronic Co, Китай). Удельное сопротивление (ρ) напечатанных серебряных пленок рассчитывалось, как $\rho = R_s \times W$, где R_s – поверхностное сопротивление, а W – толщина пленки.

Для измерения прочности адгезии серебряных пленок к полиимидной подложке использовали стандартный метод испытаний – метод клейкой ленты (метод испытаний В). Для этого выполняли надрезы на пленке в виде решетки: четыре надреза в обоих направлениях до подложки. На "решетку" накладывали, а затем отрывали клейкую ленту, чувствительную к давлению. Прочность адгезии определяли сравнительным анализом пленки до и после отрыва скотч ленты.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важным фактором в создании проводящих чернил в данной работе являлся выбор правильного соединения в качестве прекурсора. Большая часть неметаллических фаз должна покинуть систему во время термолиза и испарения. Химический прекурсор должен быть разработан таким образом, чтобы химическое превращение в чистую металлическую фазу происходило при достаточно низкой температуре, обеспечивающей устранение неорганических и органических соединений.

Следуя вышеизложенному и опираясь на достижения исследований, описанных в научных публикациях за последние несколько лет [9-14], в данной работе для формирования серебряных чернил использовали процесс комплексообразования между серебряной солью и органическим аминосоединением.

В качестве прекурсора был выбран оксалат серебра, преимуществом которого

является высокое содержание серебра среди карбоксилатов и, согласно экспериментальным данным [15], относительно низкая температура разложения ($T_{разл} = 210^\circ\text{C}$).

Согласно данным литературных источников, аминосоединения, вступая в донорно-акцепторное взаимодействие с ионами серебра образуют комплексы состава $\text{Ag}(\text{R-NH}_2)^{2+}$, которые способствуют значительному снижению температуры термического разложения серебряного прекурсора [16]. Особенно это свойство проявляется у серебряных комплексов с бидентатными аминами. В связи с этим, в качестве комплексообразователя был использован 1,2-диаминопропан. Данное соединение имеет оптимальную температуру кипения (120°C), обладает хорошей растворимостью в воде, спиртах и характеризуется химической стабильностью.

Преимуществом синтеза комплекса оксалата серебра-1,2-диаминопропана является его лёгкость, простота и дешевизна. Схематичная реакция образования серебряного органокомплекса представлена на **Рис. 1**.

На основе синтезированного соединения была разработана формула чернил, удовлетворяющая требованиям, прилагаемым к жидкости, для осуществления струйной печати на установке Dimatix DMP.

Такие органические серебряные чернила представляли собой прозрачную жидкость с содержанием твердой металлической компоненты 15 масс.%. При выдерживании чернил в течение месяца при комнатной температуре не было замечено элементов деструкции (выпадение осадка, изменение

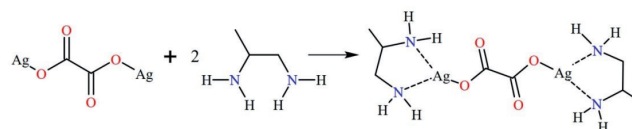


Рис. 1. Реакция образования комплекса оксалата серебра-1,2-диаминопропана.

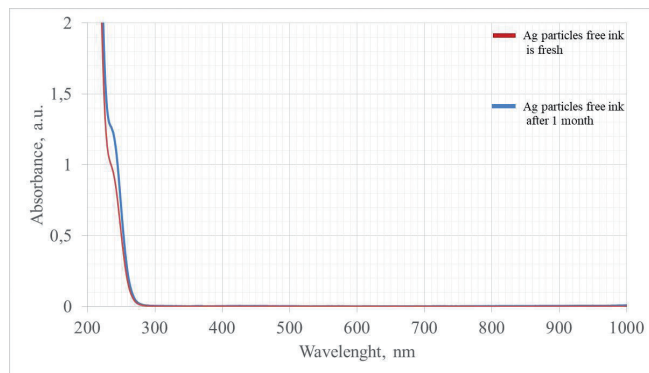


Рис. 2. УФ-видимые спектры поглощения чернил: 1 – свежеприготовленных, 2 – выдержанных при комнатной температуре в течение месяца.

цвета), прозрачность жидкости оставалась неизменной. Данные наблюдения подтверждаются спектральными исследованиями. В спектрах УФ-видимой области поглощения, записанных со свежеприготовленных чернил и выдержанных в течение месяца при комнатных условиях, отсутствуют полосы плазмонного резонанса в диапазоне 390–600 нм, характерные для наноразмерного серебра (**Рис. 2**).

Химическая устойчивость является неоспоримым достоинством полученных в данном исследовании чернил. Кроме того, отсутствие частиц серебра в составе жидкости является преимуществом для использования данных чернил в струйной принтерной технологии, так как это будет исключать риск засорения дюз печатающей головки.

Термическое поведение серебряных органических чернил представлено на **Рис. 3**.

Кривая ТГ демонстрирует два основных этапа потери массы. Первый этап между

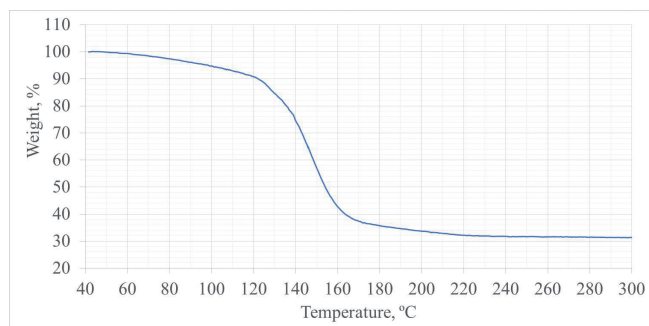


Рис. 3. ТГА-кривая органических серебряных чернил.

40°C и 120°C, соответствует испарению в пленке остаточных легко летучих компонентов: воды, уксусной кислоты и следов спирта. Второй этап (120–165°C) обусловлен разложением комплекса оксалата серебра-1,2-диаминопропана с образованием в составе чернил, способен деструктурировать с образованием металлической компоненты при достаточно низких температурах, в сравнении с температурой разложения оксалата серебра. Рекомендуемой температурой для отжига является 150°C, т.к. многие полимерные подложки не выдерживают воздействие более высоких температур.

Оставшаяся металлическая фаза должна иметь высокую чистоту, чтобы обеспечивать высокую электропроводность. Чтобы это выяснить, образцы отожжённых пленок были исследованы методом рентгенофазового анализа

На дифрактограмме (**Рис. 4**) пленки, сформированной при 150°C, присутствуют сильные рефлексы при углах 38.1°, 44.7°, 64.3°, 77.5° и 81.2°, которые соответствуют плоскостям (111), (200), (220), (311) и (222) кристалла серебра. Эти характерные дифракционные пики подтверждают однофазный состав образца, представляющего серебро с гранецентрированной кубической структурой.

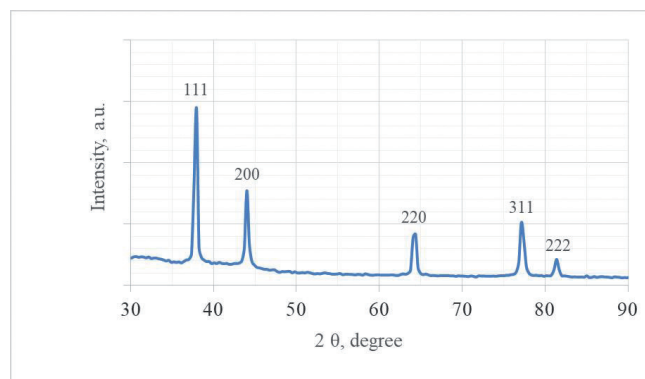


Рис. 4. Дифрактограмма серебряной пленки, полученной при отжиге 150°C.

Другим важным критерием, которым должны обладать чернила – это стабильность в процессе печати.

Чернила, полученные в данной работе, имеют подходящую реологию для осуществления пьезо-струйной печати на установке Dimatix DMP (вязкость ~10 мПа·с, поверхностное натяжение 33-35 мН/м, плотность – 1 г/см³). Картриджи для используемого принтера предусматривают лишь однократную заправку без возможности прочистки сопел печатающей головки промывными жидкостями по завершении процесса печати. Поэтому чернила вынуждены оставаться в закрытой системе до тех пор, пока полностью не израсходуются.

После заправки картриджа, серебряные чернила находились в нем 24 ч семь дней при активной эксплуатации. Каждый день велись наблюдения за внешним видом чернил и отслеживался процесс формирования и вылета капель из сопел с видеокамеры в режиме реального времени.

Замечено, что в течение всего периода картридж исправно работал, печатающая жидкость оставалась неизменно прозрачной и обеспечивала стабильную печать. На **Рис. 5a,b** представлены фотографии вылета капель в первый и седьмой день печати. Капли имеют круглую форму без сателлитов (капель-спутников) и характеризуются прямолинейным вылетом. Напечатанные линии (**Рис. 5c**) имеют четкие края, что так же подтверждает прямолинейность падения капель, стабильную работу печатающих дюз, а также свидетельствует об удовлетворительной смачиваемости поверхности полиимидного материала каплями жидкости.

При отжиге чернил выше 120°C наблюдается бурное выделение газообразных продуктов, которое может способствовать разрыхлению серебряной пленки и нарушению ее целостности. Для обеспечения максимальной проводимости

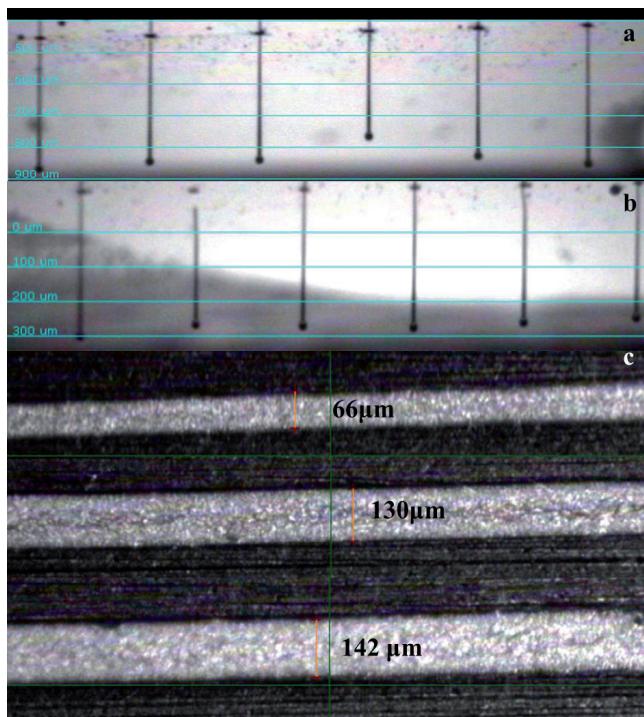


Рис. 5. Вылет капель из дюз печатающей головки: *a* – первый день печати, *b* – седьмой день печати. *c* – серебряные линии различной ширины.

материала, отоженные структуры должны обладать плотной упаковкой. В связи с этим термическую обработку напечатанных квадратов осуществляли ступенчатым образом. Сначала пленки нагревали до 100°C, выдерживали при данных условиях в течение 5 мин для удаления легколетучих компонентов, а затем увеличивали температуру нагрева до необходимой (120-200°C) и отжигали еще 30 мин.

Рис. 6 описывает влияние температуры спекания на поверхностное сопротивление

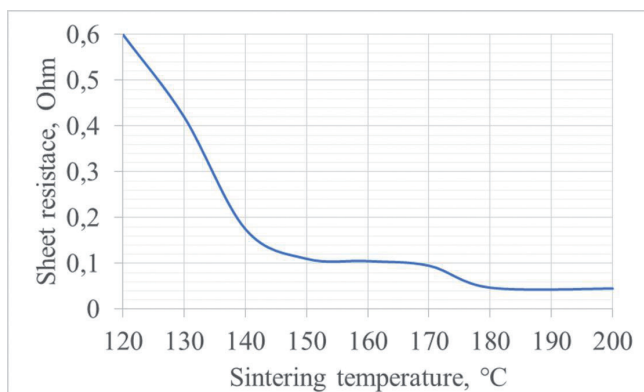


Рис. 6. Поверхностное сопротивление серебряных пленок, отоженных при разных температурах.

серебряного слоя. Наблюдается четкая зависимость сопротивления от температуры обработки. Чем выше температура отжига, тем ниже сопротивление серебряного элемента. При спекании пленок при 180°C и выше значения удельного сопротивления мало отличаются друг от друга.

Отвержденные серебряные пленки отожженные при температурах 130°C, 150°C и 180°C были исследованы с помощью СЭМ для изучения морфологии и структуры в микро-/ наномасштабе. На микроуровне поверхность пленок (Рис. 7*a,b*), независимо от температуры отжига, имеют целостную рельефную структуру (обнаружены множественные разветвленные складочки). Ширина и высота складчатых образований лежит в диапазоне 1-2.5 мкм.

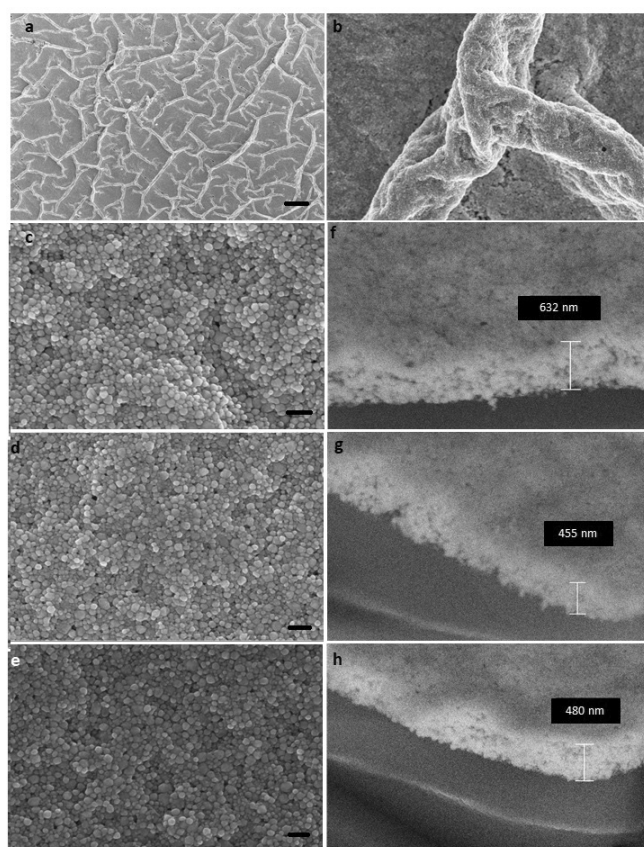


Рис. 7. СЭМ-изображения: *a* – поверхности отвержденной серебряной пленки в микромасштабе (репер 20 мкм), *b* – складки; поверхность пленок в наномасштабе (репер 200 нм), отожженных при разных температурах: *c* – 130°C, *d* – 150°C, *e* – 180°C; толщины пленок, отожженных при *f* – 130°C, *g* – 150°C, *h* – 180°C.

На микрофотографиях, полученных при большем разрешении, видно, что структура серебряных пленок образована сферическими наночастицами (Рис. 7*c-e*), плотно прилегающими друг к другу. Их формирование обусловлено процессами нуклеации и роста. Аминокомплекс серебра под действием температуры (выше 100°C) распадается на ультрамалые серебряные зародыши Ag⁰, которые сталкиваясь друг с другом, образуют наночастицы, тесно связанные между собой. Эти взаимосвязанные наноструктуры обеспечивают множество непрерывных каналов для переноса электронов, что способствует уменьшению сопротивления серебряного слоя. Пленки обладают компактной упаковкой не только на поверхности, но и в объеме. Средняя высота гладких участков пленок отожженных при 130°C составляет 650 нм, при 150°C и 180°C ее значение не превышает 500 нм (Рис. 7*f-h*).

С учетом геометрических параметров было рассчитано удельное электрическое сопротивление серебряных напечатанных элементов. Полученные величины позволяют сделать вывод о том, что отожженные напечатанные структуры характеризуются низкими значениями удельного сопротивления. Для пленок отожженных при 130°C, 150°C и 180°C на ПИ они составляют 13 мкОм·см, 8.5 мкОм·см и 6.5 мкОм·см соответственно.

На Рис. 8 представлены результаты испытания термоотвержденных пленок по определению адгезии серебра к полиимидной пленке. После отрыва клейкой

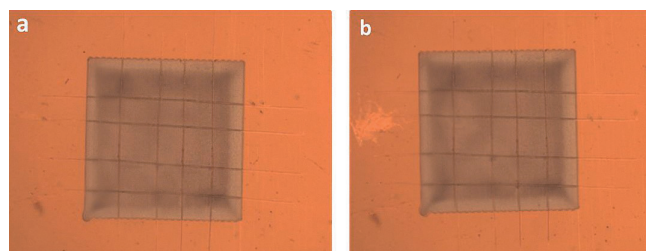


Рис. 8. Фотографии серебряных пленок *a* – до и *b* – после отрыва клейкой ленты.

ленты края надрезов сохранили прежний вид, целостность пленки осталась неизменной. Это свидетельствует о том, что серебряные структуры, отожженные на полиимиде, обладают высокими адгезивными свойствами, которые соответствуют шкале 5В.

Полученные органические чернила сохраняют длительную химическую стабильность более 1 месяца при условии хранения + 25°C и более 6 месяцев при температуре +5-10°C.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были разработаны токопроводящие органические чернила на основе комплекса оксалата серебра-1,2-диаминопропана с подходящей реологией для струйной печати.

Тщательно подобранная формула обеспечивает химическую устойчивость чернил, что облегчает работу с ними при комнатной температуре.

Удачный выбор комплексообразователя обеспечил снижение температуры разложения серебряного прекурсора и образование металлической компоненты высокой чистоты при достаточно низких температурах.

Чернила на основе комплекса оксалата серебра-1,2-диаминопропана имеют потенциал в качестве недорогой альтернативы чернилам на основе наночастиц. Они могут обеспечить высокую проводимость при низких температурах отжига (8.5 мкОм·см при 150°C). Формула не содержит частиц и, как было показано, обеспечивает стабильную струйную печать.

Таким образом, разработанные серебряные чернила являются недорогим и перспективным материалом для низкотемпературного изготовления высокоэффективной печатной электроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dang MC, Nguyen DS, Dang TMD, Tedjini S, Fribourg-Blanc E. Design and testing of RFID sensor tag fabricated using inkjet-printing and electrodeposition. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, 5(2):025012.
2. Ortego I, Sanchez N, Garcia J, Casado F, Valderas D, Sancho JJ. Inkjet Printed Planar Coil Antenna Analysis for NFC Technology Applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012, 8:1-6. DOI: 10.1155/2012/486565.
3. Vasiliev AA, Kim VP, Tkachev SV, Kornilov DYu, Gubin SP, Vlasov IS, Sizov AS. Platinum Based Material for Additive Technology of Gas Sensors. *Proceedings*, 2018, 2(13):738. DOI: 10.3390/proceedings2130738.
4. Saidina DS, Zubir SA, Fontana S, Herold C, Mariatti J. Synthesis and Characterization of Graphene-Based Inks for Spray-Coating Applications. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 48(9):5757–5770. DOI: 10.1007/s11664-019-07376-3.
5. Tkachev SV, Gubin SP, Kim VP, Kushnir AE, Kornilov DYu. The dispersions of nanoparticles in water-organic solvents as the basis for the silver nano-ink for inkjet printing. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2016, 8(2):171-184.
6. Tiyyagura H, Majeric P, Bracic M, Anzel I, Rudolf R. Gold Inks for Inkjet Printing on Photo Paper: Complementary Characterisation. *Nanomaterials*, 2021, 11(3):599.
7. Rustamova EG, Kagirina MS, Gubin SP. Obtaining ink based on palladium nanoparticles for possible use in printed electronics. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(2):127-134. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.127.

8. Asoro M, Kovar D, Damiano J, Ferreira P. Scale Effects on the Melting Behavior of Silver Nanoparticles. *Microscopy and Microanalysis*, 2010, 16(S2):1802-1803.
 9. Cai Ya, Yao Xu, Piao X, Zhang Z, Nie Er, Sun Z. Inkjet printing of particle-free silver conductive ink with low sintering temperature on flexible substrates. *Chemical Physics Letters*, 2019, 737:136857. DOI:10.1016/j.cplett.2019.136857.
 10. Mou Y, Zhang Y, Cheng H, Peng Y, Chen M. Fabrication of highly conductive and flexible printed electronics by low temperature sintering reactive silver ink. *Applied Surface Science*, 2018, 459:249-256. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.07.187.
 11. Bhat KS, Ahmad R, Wang YS and Hahn Y-B. Low-temperature sintering of highly conductive silver ink for flexible electronics. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(36):8522-8527. DOI: 10.1039/c6tc02751b.
 12. Zope KR, Cormier D, Williams SA. Reactive Silver Oxalate Ink Composition with Enhanced Curing Conditions for Flexible Substrates. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(4):3830-3837. DOI: 10.1021/acsami.7b19161.
 13. Bei Y, Cheng H, Zu M. Research Status and Prospects of Particle-Free Silver Conductive Ink. *Materials Science and Engineering*, 2018, 394(4):042060. DOI: 10.1088/1757-899X/394/4/042060.
 14. Yang W, List-Kratochvil EJW, Wang C. Metal particle-free inks for printed flexible electronics. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(48):15098-15117. DOI: 10.1039/c9tc05463d.
 15. Dong Y, Li X, Liu S, Zhu Q, Li J-G, Sun X. Facile synthesis of high silver content MOD ink by using silver oxalate precursor for inkjet printing applications. *Thin Solid Films*, 2015, 589:381-387. DOI: 10.1016/j.tsf.2015.06.001.
 16. Chang Y, Wang D-Y, Tai Y-L and Yang Z-G. Preparation, characterization and reaction mechanism of a novel silver-organic conductive ink. *J. Mater. Chem.*, 2012, 22(48):25296-25301. DOI: 10.1039/c2jm34569b.
- Рустамова Екатерина Геннадьевна**
к.х.н.
НПО "ГРАФЕНИКА"
1/7-8, ул. Пермская, Москва 107143, Россия
nebukina@yandex.ru
- Гриднев Алексей Алексеевич**
д.х.н.
Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН
4, ул. Косыгина, Москва 119991, Россия
99gridnev@gmail.com
- Мухаметова Гульназ Мунировна**
аспирант
Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН
4, ул. Косыгина, Москва 119991, Россия
mukhametova@mail.ru
- Гулин Александр Андреевич**
к.ф.-м.н.
Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН
4, ул. Косыгина, Москва 119991, Россия
aleksandr.gulin@phystech.edu
- Кагирина Мария Сергеевна**
научный сотрудник
НПО "ГРАФЕНИКА"
1/7-8, ул. Пермская, Москва 107143, Россия
mariaakagirina@rambler.ru
- Губин Сергей Павлович**
д.х.н., проф.
ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН
31, Ленинский пр-т, Москва 119991, Россия
gubin@igic.ras.ru