06

Формирование микроструктур методами бесконтактной аэрозольной печати наночастицами

© В.В. Иванов,[1] А.А. Ефимов,[1] В.И. Борисов,[1] М.Н. Уразов,[1] Д.В. Корнюшин,[1]
А.Г. Мусаев,[1] В.А. Ворошилова,[1] В.А. Долгов,[1] Н.П. Симоненко,[2] М.С. Иванов[1]

[1]Московский физико-технический институт, Центр испытаний функциональных материалов,
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
[2]Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Лаборатория физикохимии керамических материалов,
119991 Москва, Россия
e-mail: ivanov.vv@mipt.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 29 апреля 2025 г.
Принято к публикации 29 апреля 2025 г.

Проанализированы условия аэродинамической фокусировки аэрозольных потоков, обжимаемых потоком ограждающего газа, в условиях бесконтактной аэрозольной печати сухими наночастицами металлов и микроразмерными каплями чернил для формирования линий малой ширины на подложках. Численными оценками показано, что в процессах движения к подложке после выхода из сопла сферических наночастиц металлов при средних размерах более 70 nm числа Стокса достаточно высоки и отклонения их траекторий от оси потока составляют менее 1 μm, что подтверждает возможность использования аэродинамической фокусировки для печати сухими наночастицами. Аэрозольной печатью сухими наночастицами Au квазисферической формы получены массивы в виде линий шириной около 30 μm, показавшие высокое плазмонное усиление рамановского спектра низких концентраций красителя BPE (1,2-бис(4-пиридил)этилена) более $2 \cdot 10^4$. Аэрозольная печать квазисферическими наночастицами Ag с одновременным лазерным спеканием позволила сформировать монолитные высокопроводящие микроструктуры с достаточно низким удельным сопротивлением, превышающим всего в 2.2 раза удельное сопротивление крупнокристаллического серебра.

Ключевые слова: аэрозольная печать, аэродинамическая фокусировка, наночастицы металлов, плазмонное усиление, высоко проводящие микроструктуры.

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61233.76-25

Введение

В ряду бесконтактных методов прямой печати микроструктур, используемых в индустрии для контролируемого нанесения различных элементов на несущие поверхности по программируемому рисунку без применения литографии, аэрозольная печать чернилами, разработанная в 2006 г. в США, является наиболее перспективной благодаря возможности формирования трехмерных функциональных элементов с минимальным латеральным размером до 10 μm как на плоских, так и на рельефных подложках [1]. Метод основан на управляемом осаждении на подложку аэродинамически сфокусированных пучков микрокапель чернил, характеризующихся вязкостью в широком диапазоне от 0.5 до 2500 cP. Возможность работы с чернилами на основе наноматериалов различных химических составов, размеров и форм (наночастицы, нанопроволоки, углеродные нанотрубки и др.), а также высокая гибкость в создании структур с заданными свойствами позволяют рассматривать аэрозольную печать как перспективное направление для создания новых элементов и устройств [2]. Аэрозольными принтерами формируют 3*D*-межсоединения электронных компонентов, транзисторы на любых подложках [3], гибкие дисплеи [4], многослойные керамические конденсаторы [5], биологические сенсоры [6] и другие элементы. Дальнейшее улучшение экономической эффективности метода аэрозольной печати чернилами принципиально ограничивается наличием нескольких необходимых дополнительных процессов, реализуемых до процесса печати (синтез наночастиц и приготовление из них чернил) и после процесса печати микроструктур (сушка, термическая постобработка).

В 2017 г. в МФТИ был предложен новый подход сухой аэрозольной печати без применения чернил, основанный на использовании аэрозольного потока наночастиц, синтезируемых в импульсно-периодическом газовом разряде в несущем газе между электродами из необходимого расходного материала [7]. С использованием аэродинамической фокусирующей системы чернильного принтера поток таких наночастиц из Ag и Au обжимался до диаметра около 100 μm, что позволяло печатать на подложках линии соответствующей ширины. Исследования по спеканию лазерным излучением предварительно напечатанных наночастицами линий показали возможность формирования таким методом проводящих элементов на различных подложках, в том числе на пластиковых подложках в случае спекания импульсным

лазерным излучением наносекундной длительности [8]. При этом аэродинамическая фокусировка не позволяла получить ширину линий значительно меньше 100 μm, что предположительно связано с морфологией аэрозольных наночастиц, представляющих собой разветвленные агломераты. Действительно, первичные наночастицы, получаемые в зоне импульсного газового разряда, имеют средний размер порядка 10 nm, а в процессе выхода из горячей зоны газоразрядной камеры и транспортировки несущим газом к фокусирующей системе они объединяются в агломераты низкой плотности с размерами 100–300 nm [9,10]. Для таких агломератов характерно доминирование силы сопротивления потока (сила Стокса) над их инерцией, что может приводить к значительному уширению аэрозольного потока при движении к подложке в процессе печати [11].

Другим недостатком печати агломератами наночастиц является низкая плотность их укладки в формируемом массиве (не более 30 %), что не достаточно для обеспечения полной усадки в процессе спекания для получения монолитного твердого тела [12]. В работе [13] было предложено решение по преобразованию агломератов наночастиц в потоке газа в уединенные наночастицы околосферической формы с размерами от 30 до 120 nm под действием наносекундного импульсного лазерного излучения. Для обеспечения максимальной энергоэффективности преобразования агломератов наночастиц в потоке газа в уединенные наночастицы околосферической формы был разработан способ оптимизации значений параметров импульсного лазерного излучения [14]. Встраивание соответствующего оптимизирующего устройства в аэрозольный принтер перед аэродинамической фокусирующей системой одновременно должно решать обе проблемы: значительно улучшить фокусировку потока наночастиц и повысить плотность их укладки в формируемых массивах. Созданный с использованием предшествующих разработок принтер сухой аэрозольной печати реализует в едином устройстве четыре одновременно протекающих процесса, через которые поток наночастиц проходит последовательно: получение наночастиц в импульсно-периодическом газовом разряде, преобразование агломератов наночастиц в потоке газа в уединенные наночастицы околосферической формы под воздействием лазерного излучения, печать аэродинамически сфокусированным потоком наночастиц и лазерное спекание осаждаемых на подложке наночастиц.

В настоящей работе анализируются условия аэродинамической фокусировки потоков квазисферических наночастиц ряда металлов со средними размерами порядка 100 nm, и проводится оценка для формирования на подложках линий достаточно малой ширины принтером сухой аэрозольной печати в сопоставлении с принтером чернильной печати. Полученные оценки подтверждаются формированием аэрозольным принтером на подложках массивов квазисферических наночастиц Au в форме линий шириной около 30 μm, для которых исследуется плазмонное усиление спектров рамановского рассеяния при определении малых концентраций тестового красителя. Исследуется возможность получения аэрозольной печатью квазисферическими наночастицами Ag с одновременным лазерным спеканием монолитных высоко проводящих микроструктур с достаточно низким удельным сопротивлением.

1. Режимы аэродинамической фокусировки потоков сферических частиц

Аэрозольная печать линий малой ширины на подложке обеспечивается двумя основными эффектами механики аэрозолей: сжатием аэрозольного потока посредством воздействия потока фокусирующего (ограждающего) газа и обеспечением заданного прямолинейного движения аэрозольных частиц (или капель) от выхода сопла к подложке. Сжатие аэрозольного потока происходит внутри фокусирующей системы, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Поток несущего газа с аэрозольными частицами подается по центральному каналу в переходную область, где его цилиндрически симметрично обволакивает поток фокусирующего газа. Далее поток аэрозоля в оболочке фокусирующего газа движется ускоренно по каналу печатающего сопла с медленно уменьшающимся поперечным сечением к выходу из сопла. В правильно спроектированной фокусирующей системе потоки аэрозоля и фокусирующего газа при дозвуковых скоростях являются ламинарными и аксиально-симметричными, что предотвращает их смешивание. Число Стокса для частиц в переходной области и скорость потока малы, а на выходе из печатающего сопла — велики. При этом локальная скорость потока

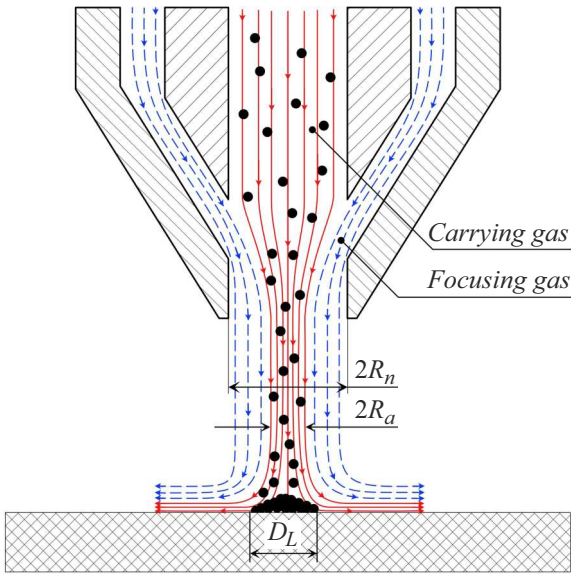

Рис. 1. Принципиальная схема фокусирующей системы аэрозольного принтера.

не должна приближаться к скорости звука для предотвращения перехода течения газа в турбулентный режим. Оболочка фокусирующего газа выполняет еще одну функцию — предотвращает удар и осаждение частиц аэрозоля на внутреннюю стенку сопла и направляет поток аэрозоля. Увеличивая расход фокусирующего газа Q_s при фиксированном значении расхода аэрозоля Q_a, можно дополнительно уменьшать диаметр струи аэрозоля $2R_a$. Таким образом, на выходе сопла формируется тонко сфокусированная струя аэрозоля, диаметр которой может в несколько раз быть меньше выходного диаметра сопла $2R_n$.

Для ламинарного режима течения струи аэрозоля и фокусирующего газа, описываемого законом Пуазейля, в работе [15] получено выражение

$$\psi = \sqrt{1 - \frac{\chi}{\chi - 1}}, \qquad (1)$$

устанавливающее однозначную связь отношения радиуса струи аэрозоля и выходного радиуса сопла $\psi = R_a/R_n$ с отношением расходов фокусирующего газа и аэрозоля $\chi = Q_s/Q_a$. Для $\chi = 1$ радиус аэрозольной струи равен примерно половине выходного радиуса сопла. Из зависимости (1) видно, что при увеличении χ примерно до 6 значение ψ убывает быстро, а при больших значениях χ убывание ψ замедляется с тенденцией выхода на насыщение. В частности, при $\chi = 6$ радиус аэрозольной струи становится примерно в 4 раза меньше выходного радиуса сопла. Именно такое сжатие аэрозольной струи принимается наиболее эффективным и часто используется в аэрозольной печати.

Соотношение (1) определяет диаметр аэрозольной струи только непосредственно на выходе из сопла, поэтому ширина печатных линий может быть идентична диаметру струи аэрозоля только при размещении подложки непосредственно у выхода из сопла. По мере удаления подложки от выходного сечения сопла ширина печатных линий D_L может уширяться по ряду причин, основной из которых является отклонение траекторий частиц (или капель) от оси симметрии фокусирующей системы под воздействием перпендикулярной составляющей потока несущего газа, возникающей в результате столкновения с подложкой. Степень отклонения траекторий частиц от оси системы определяется соотношением кинетического импульса и импульса силы трения (сила Стокса) окружающего вязкого газа, которая выражается безразмерным числом Стокса

$$St = C_m \frac{\rho_p d_p^2 v_g}{9\eta R_a}, \qquad (2)$$

где ρ_p — плотность частицы, v_g — скорость потока несущего газа на выходе из сопла, η — динамическая вязкость газа, R_a — радиус потока аэрозоля на выходе из сопла, d_p — диаметр частицы, C_m — коэффициент Каннингема.

Если число Стокса много меньше единицы, то частицы или капли будут идеально следовать линиям тока газа, тогда как для чисел Стокса, больших единицы, доминирует инерция частиц, и они достигают подложки с минимальным отклонением траектории. Число Стокса можно рассматривать как меру того, насколько легко или трудно частице двигаться через газовую среду, в зависимости от ее размера и плотности, вязкости и скорости течения газа, а также радиуса аэрозольной струи.

Для типовых условий чернильной и сухой аэрозольной печати в таблице представлены оценки чисел Стокса St и отклонений траектории частиц от прямолинейного движения к подложке Δx, выполненные при условии ламинарного течения газа и рекомендуемой максимальной скорости аэрозольного потока в выходном сужении сопла, равной 1/2 от скорости звука для аргона в качестве несущего газа $v_g = 160.5\,\mathrm{m/s}$. Степень сжатия аэрозольной струи ψ при выходном диаметре сопла $100\,\mu\mathrm{m}$ принята равной 0.25, что соответствует радиусу аэрозольного потока на выходе из сопла $R_a = 12.5\,\mu\mathrm{m}$. Для аэрозольного чернильного принтера характерное значение числа Стокса при использовании аргона в качестве несущего газа (динамическая вязкость $\eta = 22.5\,\mu\mathrm{Pa{\cdot}s}$) для капель со средним диаметром $1\,\mu\mathrm{m}$, плотностью $1.3\,\mathrm{g/cm^3}$, составляет около 86, что согласуется с данными, полученными ранее в работе [15].

Отклонение траектории частицы от прямолинейного движения к подложке может быть оценено по действию поперечной силы Стокса, возникающей при повороте потока несущего газа вблизи подложки на 90°. Она направлена перпендикулярно первоначальной траектории частицы (вдоль линий потока газа) и определяется выражением

$$F_x = 3\pi\eta d_p v_g. \qquad (3)$$

Для оценки принято, что поперечная сила Стокса действует на частицу в процессе времени преодоления растекающегося вдоль подложки потока несущего газа, исходя из чего время действия силы составляет $t \approx R_a/v_g$. Скорость течения и толщина слоя при этом равны скорости и радиусу аэрозольного потока на выходе из сопла соответственно. При этом поперечное отклонение частиц при приближении к подложке оценивается как $\Delta x = a_x t^2/2$, где a_x — ускорение частицы под действием силы Стокса. С учетом (3) оценка поперечного отклонения частиц определяется выражением

$$\Delta x \cong \frac{9}{8}\left(\frac{\eta}{\rho_p v_g}\right)\left(\frac{R_a}{d_p}\right)^2. \qquad (4)$$

Представленные в таблице расчеты по выражениям (2) и (4) показывают, что при движении к подложке сферические наночастицы металлов со средним размером более 70 nm имеют высокое значение числа Стокса, а отклонение их траекторий от оси потока составляет менее $1\,\mu\mathrm{m}$ (за исключением алюминия, имеющего низкую плотность). Это подтверждает возможность использования аэродинамической фокусировки как для печати сухими наночастицами, так и для микрокапель

Значения чисел Стокса и поперечных отклонений траекторий для ряда частиц при рекомендуемых условиях аэрозольной печати

Тип частиц	Плотность, g/cm^3	Диаметр частиц, nm	Радиус несущего потока на выходе из сопла, μm	Число Стокса	Поперечное отклонение, μm
Микрокапли чернил с 30 weight% наночастиц Pt	1.3	1000	12.5	85.8	0.02
Pt	21.1	70	12.5	7.32	0.24
Au	19.32	70	12.5	6.70	0.26
Ag	10.5	70	12.5	3.64	0.48
Ni	8.9	70	12.5	3.09	0.57
Al	2.7	70	12.5	0.94	1.86
Al	2.7	120	12.5	2.68	0.63

чернил. Отметим, что к фокусировке при печати сухими наночастицами с низкой массовой плотностью предъявляются дополнительные требования. Например, чтобы достичь достаточно высокого значения числа Стокса и малого поперечного отклонения в случае Al требуется использовать наночастицы диаметром не менее 120 nm.

Полученные оценки показывают, что сухая аэрозольная печать квазисферическими наночастицами с использованием аэродинамической фокусирующей системы перспективна для формирования малой ширины линий печати, приближающихся к ширине линий при аэрозольной печати чернилами. При заданных размерах наночастиц аэродинамическая фокусировка более эффективна для наночастиц металлов более высокой плотности.

2. Сухая аэрозольная печать квазисферическими наночастицами Au

Принтером сухой аэрозольной печати были сформированы массивы наночастиц в виде линий на кварцевых подложках. Для синтеза наночастиц использовались золотые электроды высокой чистоты (99.9999 %). Были подобраны оптимальные условия для спекания агломератов в отдельные наночастицы квазисферической формы. Процесс спекания происходил в потоке газа под воздействием импульсного лазерного излучения с длиной волны 1053 nm (лазер TECH-1053) при следующих параметрах: длительность импульса 40 ns, частота следования импульсов 500 Hz и энергия импульса 12 mJ/cm^2. Для формирования структур малой ширины было установлено фокусирующее сопло с диаметром выходного отверстия 100 μm. Распределение полученных наночастиц квазисферической формы по размерам, регистрируемое в потоке на выходе из сопла с помощью анализатора TSI Inc. SMPS 3936 по дифференциальной электрической подвижности, достаточно точно аппроксимируется логнормальной функцией с максимумами около 120 nm (рис. 2, a). На рис. 2, b представлено характерное изображение вида сверху напечатанной линии, полученное в растровом электронном микроскопе JEOL JSM 7001F, демонстрирующее ровные края линии при ширине около 30 μm.

Был получен набор образцов напечатанных линий с различной высотой в диапазоне от 0.2 до 3.2 μm из наночастиц Au квазисферической формы, которые исследовались в качестве плазмонных наноструктур для усиления спектров рамановского рассеяния при определении малых концентраций тестового красителя BPE (1,2-бис(4-пиридил)этилена) более $2 \cdot 10^4$. Для SERS-анализа химического состава растворов такие наноструктуры из наночастиц золота представляют особый интерес благодаря высокой химической устойчивости к воздействию атмосферного кислорода и тестовым веществам, а также соответствию области плазмонного резонанса золотых наночастиц длине волны широко используемых лазеров современных рамановских спектрометров (532 nm). Для исследований на указанной длине волны также важно использовать подложку из материала, не проявляющего люминесценции или собственного рамановского рассеяния в исследуемой спектральной области, чему кварцевое стекло вполне соответствует.

Растворы тестового красителя BPE с разной концентрацией наносились на полученные плазмонные наноструктуры в виде капли объемом 1 μl с помощью лабораторного дозатора (Thermo Scientific 0.1–10 μl). После высыхания растворителя производились измерения рамановских спектров BPE на приборе Thermo Scientific DXR Raman Microscope при следующих параметрах: длина волны возбуждающего лазерного излучения 532 nm, мощность лазера 9 mW, объектив 10x, разрешение 4.7–8.7 cm^{-1}, апертура 50 μm щелевая, характерный диаметр освещенного пятна 2.1 μm. Единичные снимки получены усреднением по 10 кадрам с выдержкой 1 s.

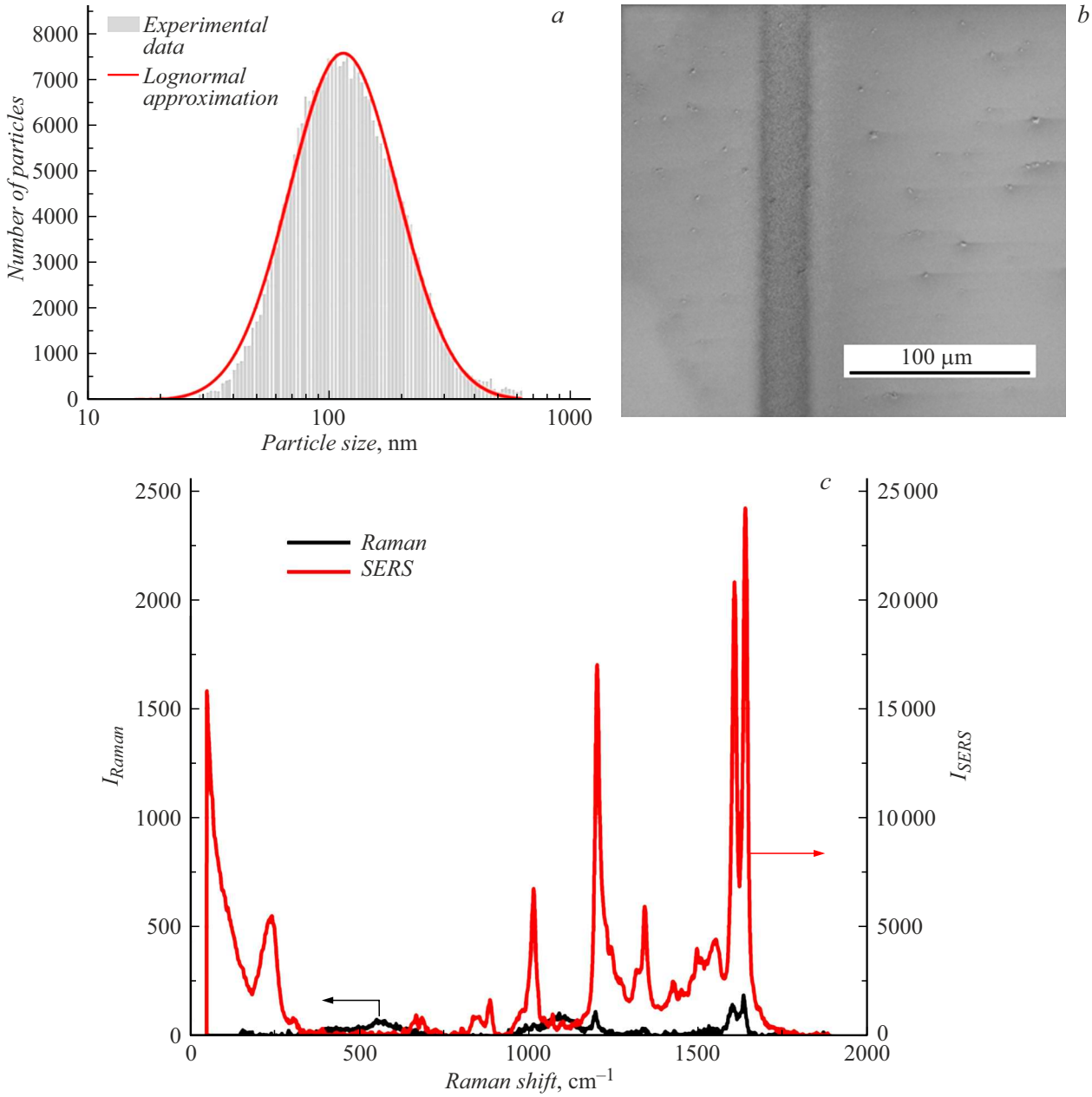

Рис. 2. *a* — распределение Au наночастиц по размерам на выходе из фокусирующего сопла; *b* — РЭМ изображение плазмонной наноструктуры в виде печатной линии; *c* — сопоставление спектров BPE (1,2-бис(4-пиридил)этилена): красным обозначен SERS-спектр, полученный для раствора с концентрацией 10^{-4} mol/l на печатной линии с высотой 0.1 μm, черным — исходный рамановский спектр для раствора концентрацией 10^{-2} mol/l.

Коэффициент усиления плазмонной структуры EF рассчитывался по отношению интенсивностей двух характерных пиков рамановского спектра BPE (максимумы на 1603 и 1630 cm^{-1}, рис. 2, *c*): SERS-спектра на наночастицах, концентрация наносимого раствора аналита 10^{-4} mol/l, и рамановского спектра (на подложке без наночастиц), концентрация раствора 10^{-2} mol/l (предельная детектируемая без использования наночастиц):

$$EF = \frac{1}{n} k_i \sum_{i=1}^{n} \frac{I_{SERS_i}}{I_{Raman_i}}, \qquad (5)$$

где $k_i = 15.5$ — поправочный коэффициент, полученный экспериментально на основании роста интенсивности сигнала при увеличении концентрации на два порядка, с 10^{-4} до 10^{-2} mol/l, $n = 2$ — количество пиков, по которым рассчитывается усиление.

Так, для полученной плазмонной наноструктуры из наночастиц Au высотой 0.2 μm максимальный коэффициент усиления для красителя BPE (1,2-бис(4-пиридил)этилена) составил $1.9 \cdot 10^3$, что обеспечило снижение предельной концентрации обнаружения с 10^{-3} до 10^{-6} mol/l (рис. 2, *c*).

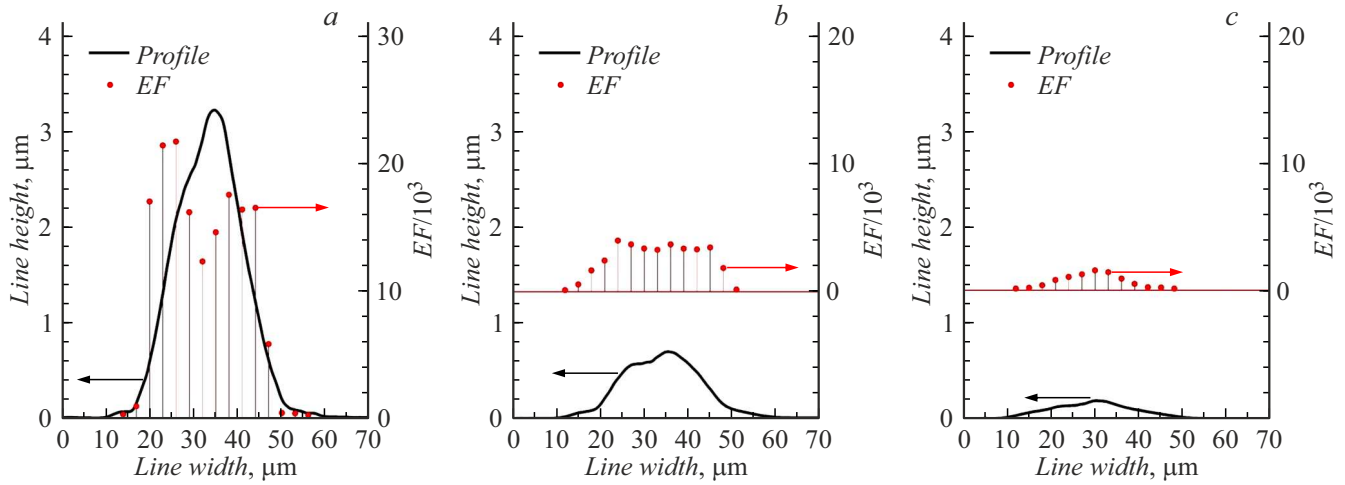

Рис. 3. Профили плазмонных наноструктур и значения коэффициента плазмонного усиления при толщине печатной линии 3.2 (*a*), 0.8 (*b*) и 0.2 μm (*c*).

Для напечатанных линий из Au наночастиц с разной высотой производились измерения профиля плазмонного усиления для красителя BPE путем регистрации рамановских спектров с последовательного ряда площадок поперек линии с расстоянием между центрами соседних площадок 3 μm в автоматическом режиме. На рис. 3 полученные профили плазмонного усиления представлены совместно с геометрическим профилем линий, измеренным оптическим профилометром Sensofar S-Neox, для трех характерных линий разной высоты. Из сравнения зависимостей коэффициента плазмонного усиления для красителя BPE от локальной высоты линии наблюдается повышение коэффициента усиления до высоты линий примерно 1.5 μm. Вторым эффектом является наличие локального минимума коэффициента плазмонного усиления в области максимума профиля линий при повышенных высотах в образцах (*a*) и (*b*).

Первый эффект повышения коэффициента плазмонного усиления с ростом толщины линии логично связать с проникновением лазерного излучения и выходом сигнала рамановского рассеяния до определенной глубины массива наночастиц порядка 1.5 μm (около 20 слоев наночастиц). Эффект локального минимума коэффициента плазмонного усиления в области максимума профиля линий можно объяснить совместным проявлением двух следующих закономерностей. Во-первых, ввиду присутствия в спектре распределения частиц по размерам значительного количества частиц малых размеров до 30 nm и больших размеров до 300 nm (рис. 2, *a*), при осаждении на подложку частицы малых размеров, в соответствии с (4), должны отклоняться на большее расстояние от центра аэрозольного потока, что приведет к осаждению в центральной зоне формируемой линии большей доли крупных частиц и доминированию более мелких частиц на склонах линии. Во-вторых, ранее теоретически и экспериментально было показано, что наночастицы золота с размерами 50–80 nm характеризуются значительно большей экстинкцией излучения в области плазмонного резонанса, чем более крупные частицы [16]. В этой связи плазмонное усиление может быть выражено сильнее на склоне печатной дорожки (рис. 3), так как в этой области средний размер частиц обладает более сильным эффектом плазмонного резонанса для длины волны зондирующего излучения 532 nm.

Получаемые сухой аэрозольной печатью плазмонные наноструктуры, благодаря показанному высокому плазмонному усилению, могут найти широкое применение в поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии (SERS) как в научных исследованиях, так в практической медицине, фармацевтике, криминалистике и реставрации предметов искусства [17]. Также значительные перспективы применения технологии аэрозольной печати плазмонных наноструктур из ряда металлов ожидаются для повышения эффективности ряда оптоэлектронных устройств, в частности, солнечных панелей и светодиодных излучателей [18].

3. Сухая аэрозольная печать высокопроводящих элементов наночастицами Ag с одновременным лазерным спеканием

Печать проводящих микроструктур производилась аэрозольным принтером с использованием электродов из серебра (с чистотой 99.9999 %) при оптимизированных условиях газоразрядного синтеза наночастиц и преобразования агломератов наночастиц в потоке газа в уединенные наночастицы квазисферической формы под действием импульсно-периодического лазерного излучения с характеристиками, представленными выше для

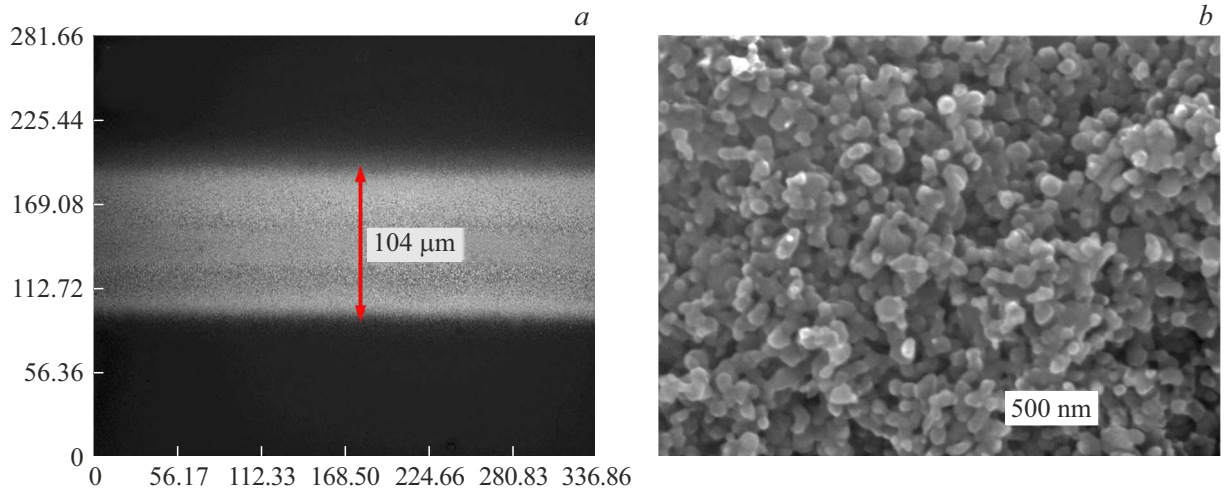

Рис. 4. *a* — изображение вида сверху спеченной линии из наночастиц Ag, полученное в оптическом микроскопе; *b* — изображение микроструктуры излома спеченной линии, полученное в растровом электронном микроскопе JEOL JSM 7001F.

формирования плазмонных наноструктур золота. При этом использовались фокусирующая система с выходным диаметром сопла 200 μm и импульсно- периодический лазер Tech-527 с длиной волны излучения 527 nm и длительностью импульсов 20 ns для спекания массивов наночастиц в процессе их осаждения на подложках из кварцевого стекла.

Высокая проводимость микроструктур Ag достигается спеканием квазисферических наночастиц в процессе их осаждения на подложку под воздействием импульсного лазерного излучения с плотностью энергии порядка 200 J/cm^2. Использование лазерного излучения с длиной волны 532 nm, близкой к частоте максимума плазмонного резонанса на наночастицах Ag (420 nm), обеспечивает высокую эффективность поглощения энергии излучения наночастицами диаметром 50–100 nm и в совокупности с наносекундной длительностью импульсов не производит значительного нагрева подложки. Лазерное излучение вводится в камеру печати через окно с использованием длиннофокусного объектива и моторизированного диэлектрического зеркала, размещенных снаружи камеры.

Как можно видеть из изображений на рис. 4, аэрозольная печать квазисферическими наночастицами Ag с одновременным лазерным спеканием обеспечивает высокую монолитизацию структуры массива наночастиц с минимальным количеством пор. В результате достигается высокое удельное сопротивление наноструктурного серебра с размерами кристаллитов порядка 50–100 nm — до 3.54 mΩ·cm, что составляет около 220 % от удельного сопротивления крупнокристаллического серебра. Определение удельного сопротивления спеченных серебряных линий производилось из данных измерений абсолютного сопротивления линий четырехконтактным методом мультиметром Fluke 287,

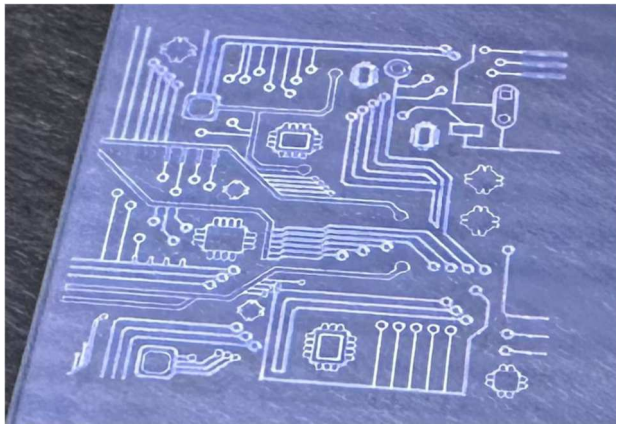

Рис. 5. Фотография макета разводки электронной платы.

и их профиля поперечного сечения и длины с помощью оптического профилометра Sensofar S-Neox.

Полученное значение удельного сопротивления для нанокристаллического серебра близко к предельному показателю, поскольку в него вносит значительный вклад, наряду с рассеянием свободных электронов на фононах, рассеяние на межкристаллитных границах. Действительно, длина свободного пробега электрона в объемном образце серебра составляет 52 nm [19], что сопоставимо с размером нанокристаллитов в полученных аэрозольной печатью образцах.

В разработанном режиме сухой аэрозольной печати с одновременным лазерным спеканием был изготовлен макет разводки электронной платы печатью серебром на подложке из кварцевого стекла (рис. 5). Изготовление подобной структуры производится в автоматическом режиме по заданному чертежу. Поскольку процесс печати реализуется в закрытой вакуумируемой камере в остаточной инертной атмосфере аргона, имеется воз-

можность печати микроструктур и другими металлами, в том числе медью, никелем и др.

Заключение

Анализ процессов аэродинамической фокусировки потоков квазисферических наночастиц металлов показал, что при средних размерах наночастиц более 70 nm отклонения их траекторий от оси потока не превышают 1 μm, что открывает возможность использования данного подхода для печати сухими наночастицами. С применением аэрозольной печати сухими наночастицами Au и Ag квазисферической формы реализовано формирование массивов в виде линий шириной до 30 μm и с достаточно плотной укладкой наночастиц. Одновременное лазерное спекание массивов наночастиц Ag обеспечивает формирование монолитных высоко проводящих микроструктур с достаточно низким удельным сопротивлением, превышающим всего в 2.2 раза удельное сопротивление объемного серебра.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560 (13.1902.24.31).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M.J. Renn. USA Patent 7108894B2 (2006)
[2] T. Seifert, M. Baum, F. Roscher, M. Wiemer, T. Gessner. Mater. Today Proc., **2**, 4262 (2015).
[3] C.S. Jones, X. Lu, M. Renn, M. Stroder, W.-Sh. Shih. Microelectron. Eng., **87**, 434 (2010).
[4] C. Yang, E. Zhou, S. Miyanishi, K. Hashimoto, K. Tajima. ACS Appl. Mater. Interfaces, **3**, 4053 (2011).
[5] C.E. Folgar, C. Suchicital, S. Priya. Mater. Lett., **65**, 1302 (2011).
[6] I. Grunwald, E. Groth, I. Wirth, J. Schumacher, M. Maiwald, V. Zoellmer, M. Busse. Biofabrication, **2**, 14106 (2010).
[7] A.A. Efimov, G.N. Potapov, A.V. Nisan, V.V. Ivanov. Results Phys., **7**, 440 (2017).
[8] K. Khabarov, D. Kornyushin, B. Masnaviev, D.N. Tuzhilin, A.A. Efimov, D.L. Saprykin, V.V. Ivanov. Appl. Sci., **10** (1), 246 (2020).
[9] K.E.J. Lehtinen, R.S. Windeler, S.K. Friedlander. J. Aer. Sci., **27**, 883 (1996).
[10] N.S. Tabrizi, M. Ullmann, V.A. Vons, U. Lafont, A. Schmidt-Ott. J. Nanopart. Res., **11**, 315 (2009).
[11] W.C. Hinds. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd eds. (Wiley-Interscience, 1999)
[12] M.J. Mayo. Interna. Mater. Rev., **41** (3), 85 (2013).
[13] K. Khabarov, M. Nouraldeen, S. Tikhonov, A. Lizunova, A. Efimov, V. Ivanov. Nanomaterials, **11**, 2701 (2021).
[14] М.Н. Уразов, В.А. Долгов, М.С. Иванов, В.В. Иванов, В.А. Ворошилова, Д.В. Корнюшин, В.И. Борисов. Патент РФ RU2828069C1. Бюл. № 28 (2024)
[15] S. Binder, M. Glatthaar, E. Rädlein. Aer. Sci Tech., **9** (48), 924 (2014).
[16] S.V. Gaponenko, D.V. Guzatov. Pr. IEEE, **108** (5), 704 (2020).
[17] Н.Ю. Жигалов, В.Ф. Гольчевский, И.Л. Бадзюк. Вестник Московского ун-та МВД России, **2**, 14 (2017).
[18] Т.Ю. Могильная, Ю.Л. Крит, Н.В. Морозова, В.В. Кувшинов, В.В. Слепцов, М.В. Федотикова, Л.Л. Пагава, М.Ю. Горожеев. ЭОМ, **6**, 67 (2020).
[19] P.B. Johnson, R.W. Christy. Phys. Rev., **6** (12), 4370 (1972).