06

Условия формирования серебряных электродов с высокой проводимостью методом сухой аэрозольной печати

© Д.В. Корнюшин, А.Д. Филиппов, Е.В. Колисова, В.А. Ворошилова, О.В. Вершинина, А.А. Лизунова, В.И. Борисов, В.В. Иванов

Московский физико-технический институт, Центр испытаний функциональных материалов,
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
e-mail: korniushin.d@mipt.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 29 апреля 2026 г.
Принято к публикации 29 апреля 2026 г.

Исследованы условия формирования на подложках из оксидированного кремния серебряных электродов с высокой проводимостью с помощью принтера сухой аэрозольной печати, не использующего растворителей и стабилизирующих добавок, с одновременным лазерным спеканием и термическим пост-спеканием. При работе принтера в процессе импульсно-периодического газового разряда реализуется получение аэрозольного потока первичных наночастиц с размерами порядка 20 nm, которые в процессе транспортировки к зоне печати объединяются в дендрит-подобные агломераты. Печать электродов производилась сфокусированными потоками как агломератов первичных наночастиц, так и потоками квазисферических наночастиц со средним размером порядка 90 nm, получаемых трансформацией агломератов при их лазерной обработке в потоке. Спекание электродов из наночастиц, осаждаемых на подложках, производилось двумя способами: импульсным лазерным излучением с длиной волны 527 nm при плотностях энергии лазерного импульса от 44 до 352 mJ/cm^2 непосредственно в процессе печати, либо в муфельной печи при температурах спекания от 150 °C до 450 °C после печати электродов. Изучены проводимость, усадка при спекании и микроструктура полученных электродов. Наибольшей проводимостью, до $3.3 \cdot 10^7$ S/m, обладают электроды, напечатанные квазисферическими наночастицами серебра при одновременном лазерном спекании, что примерно в 1.9 раза меньше проводимости объемного серебра, тогда как при термическом пост-спекании проводимость электродов достигает $3.1 \cdot 10^7$ S/m.

Ключевые слова: сухая аэрозольная печать, наночастицы серебра, лазерное спекание, высокопроводящие электроды.

DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63496.129-26

Введение

В настоящее время производство электронных устройств с помощью печатных методов привлекает все больше внимания благодаря своей экономической эффективности. Это связано как с развитием гибкой электроники, требующей недорогих и крупноформатных компонентов, так и с концепцией „зеленой“ электроники, стремящейся к минимизации отходов и уменьшению количества технологических стадий, что напрямую коррелирует с преимуществами аддитивных методов печати. Печатные технологии позволяют формировать функциональные компоненты электроники путем прямого нанесения рисунка функциональными материалами на подложках без необходимости привлечения дорогостоящих литографических методов: микросенсоры [1], антенны [2], топливные элементы [3], гибкие дисплеи [4], транзисторы и другие электронные устройства. Широко используются технологии печати с использованием чернил на основе наночастиц (НЧ) или истинных растворов: струйная [5], аэрозольная чернильная [6], трафаретная [7], микроплоттерная [8], электрогидродинамическая [9] и др. [10–12]. Несмотря на распространенность, методы, использующие чернила, сталкиваются с проблемой „эффекта кофейного пятна“, для исключения которого требуется тщательный подбор реологии растворителей и типа подложек. В этой связи особый интерес представляет метод сухой аэрозольной печати, свободный от использования чернил, (САП) [13,14]. Он характеризуется совмещением в едином устройстве одновременно нескольких протекающих технологических процессов: синтез НЧ в импульсном газовом разряде, лазерная модификация размера и формы НЧ, осаждение на подложку и одновременное лазерное спекание. В отличие от печатных технологий, основанных на использовании наночернил, ключевым преимуществом метода САП является отказ от химических соединений в чернилах и исключение стадий дальнейших постобработок для получения однородных массивов НЧ на подложке, что позволяет существенно сократить время изготовления функциональных элементов электроники.

С целью получения высокопроводящих серебряных микроструктур при минимизации времени их обработки на различных подложках ранее был исследован широкий спектр способов спекания массивов НЧ: термический [15], лазерный [16], химический [17], микроволно-

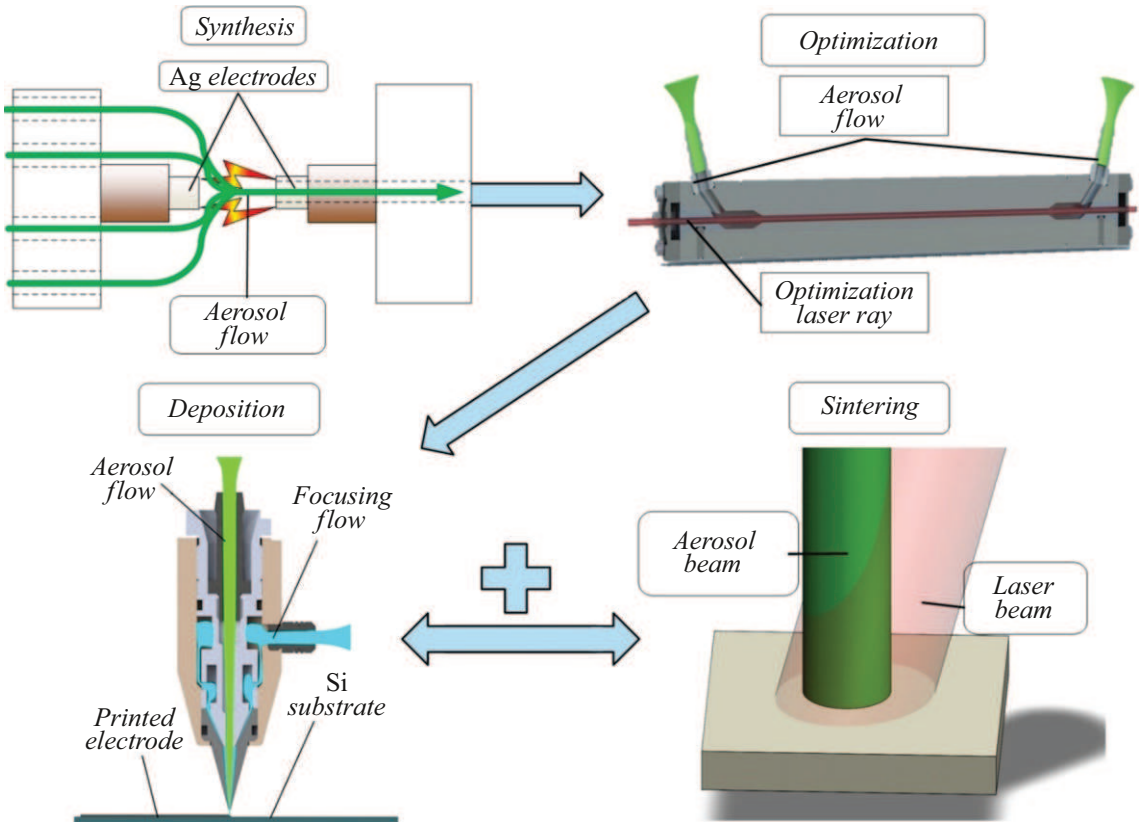

Рис. 1. Принципиальная схема процессов сухой аэрозольной печати, реализующая одновременно четыре технологических процесса: синтез первичных НЧ, оптимизация агломератов первичных НЧ и сфокусированное осаждение на подложку модифицированных НЧ квазисферической формы с одновременным лазерным спеканием.

вый [18]. В сравнении с известными подходами метод САП имеет преимущество в совмещении двух технологических процессов: формирования функциональных элементов сфокусированным осаждением НЧ металлов и их одновременного спекания импульсным лазерным излучением. Еще одним ключевым отличием процесса спекания в САП является локальность воздействия лазерного излучения, что позволяет минимизировать влияние на чувствительные подложки и, что важно, добиться специфической микроструктуры. Лазерное спекание может способствовать формированию более плотной упаковки частиц, что напрямую сказывается на проводимости формируемых микроструктур. Размер нанокристаллитов в микроструктуре оказывает существенное влияние на удельную проводимость элементов в печатной электронике. Это может приводить к дополнительным вкладам в электросопротивление элементов благодаря рассеянию электронов на границах зерен и пор: уменьшение их размера увеличивает количество границ, что приводит к уменьшению проводимости. Поэтому контроль микроструктуры и проводимости печатаемых проводников и их оптимизация от условий формирования являются актуальными.

В настоящей работе исследовались условия формирования на подложках из оксидированного кремния серебряных электродов в форме линий с высокой проводимостью с помощью принтера сухой аэрозольной печати с одновременным лазерным спеканием и термическим пост-спеканием. Электроды формировали агломератами из первичных НЧ и модифицированных квазисферических НЧ серебра. Исследовали зависимости проводимости серебряных электродов от режимов печати и спекания.

1. Методы и материалы

Принципиальная схема процессов САП для получения металлических электродов представлена на рис. 1. Она реализует в себе одновременно четыре технологических процесса: синтез первичных НЧ металлов в импульсном газовом разряде, лазерную модификацию агломератов первичных НЧ в процессе транспортировки в потоке газа, сфокусированное осаждение НЧ на подложку и их одновременное лазерное спекание. Эта последовательность процессов обеспечивает преобразование материала электрода, установленного в газоразрядном генераторе НЧ, в микроразмерные элементы, которые формируются на подложке за счет сфокусированного осаждения НЧ.

Синтез первичных НЧ в газоразрядной ячейке производился в импульсном газовом разряде за счет электрической эрозии серебряных электродов (Ag $\geq$ 99.99 %) в потоке аргона (Ar 4.8). Процесс оптимизации агломератов первичных НЧ производился в специально сконструированной ячейке (ячейка оптимизации) с диаметром и длиной рабочего канала 3 и 220 mm соответственно. Лазерное излучение заводилось в ячейку оптимизации через кварцевое стекло в направлении, противоположном аэрозольному потоку, для повышения эффективности процесса оптимизации агломератов первичных НЧ.

Для оптимизации агломератов первичных НЧ импульсным лазерным излучением с длиной волны 1064 nm использовался лазер CNI 1064 (Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Китай). Частота импульсов и плотность энергии одного импульса составляли 100 Hz и 11 mJ/cm^2 соответственно. Данные эксплуатационные параметры лазерного излучения были выбраны на основе исследований, проведенных с помощью аэрозольного спектрометра дифференциальной электрической подвижности SMPS 3936 (TSI Inc., Shoreview, MN, USA) и просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 (JEOL, Ltd., Tokyo, Japan). Выбранные частота импульсов и плотность энергии соответствуют оптимальным значениям, позволяющим достичь полной модификации агломератов первичных НЧ в квазисферические уединенные частицы. В частности, в работе [19] на примере НЧ золота описаны кривые усадки размеров НЧ под воздействием лазерного излучения.

Размер, морфология и кристаллическая структура синтезированных первичных и модифицированных НЧ исследовались с использованием просвечивающего электронного микроскопа (JEM-2100, JEOL Ltd., Токио, Япония). Сфокусированное осаждение НЧ на подложки в камере печати с динамическим вакуумом производилось с использованием коаксиального микросопла с диаметром выходного отверстия 130 μm. Формирование электродов осуществлялось путем перемещения подложки, закрепленной на координатном столе, в плоскости Oxy, с точностью позиционирования 10 μm при перемещении на 1 cm. Геометрия аэрозольного пучка контролировалась соотношением аэрозольного и фокусирующего потоков газа аргона, с возможностью получения минимальной ширины печатного электрода около 40 μm [20]. Кроме контроля ширины формируемого электрода на поверхности подложки, фокусирующий газ играет роль ограждающего, который предотвращает касание НЧ стенок канала коаксиального сопла. В настоящей работе значения аэрозольного и фокусирующего потоков составляли 75 и 50 ml/min соответственно. Лазерное спекание НЧ производилось с использованием импульсного лазерного источника с длиной волны 532 nm модели CNI 532 (Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Китай). Частота импульсов составляла 1000 Hz, а плотность энергии одиночного импульса варьировалась в диапазоне от 44 до 352 mJ/cm^2. Постобработка термическим спеканием производилась в муфельной печи SNOL (AB „Umega“, Литва) при температурах от 150 °C до 450 °C в течение 30 min. Скорость нагрева составляла 5 °C/min с естественным охлаждением до комнатной температуры. Увеличение температуры спекания до 500 °C и более приводило к образованию макроскопических дефектов на поверхности электродов в виде трещин и разрывов, что не позволило исследовать их электрические характеристики. Измерения электрического сопротивления спеченных электродов из НЧ Ag производились с использованием мультиметра (U1272A, Agilent Technologies Inc., Санта-Клара, Калифорния, США). Для измерений сопротивления на концах спеченных электродов формировались контактные площадки серебряной пастой PELCO® (Ted Pella, Inc., Реддинг, Калифорния, США), которая затвердевала при комнатной температуре. Микроструктура напечатанных электродов исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM−7001F (JEOL Ltd., Токио, Япония). Площадь поперечного сечения и длина электродов измерялись с помощью оптического 3D-профилометра (S neox, Sensofar, Терраса, Испания). На основе данных о площади поперечного сечения электродов рассчитывалась степень усадки их сечения в зависимости от параметров режимов спекания по формуле:

$$S = \frac{A_0 - A}{A_0}, \tag{1}$$

где S, A_0 и A — усадка, площади поперечного сечения неспеченного и спеченного электрода соответственно.

2. Результаты

В процессе синтеза в газоразрядной ячейке в результате электрической эрозии синтезировались первичные НЧ Ag со средним размером 25 nm. В процессе перемещения в аэрозольном потоке в результате броуновского движения и коагуляции первичные НЧ формировали агломераты со средним размером порядка 220 nm. На рис. 2, a представлено характерное ПЭМ−изображение агломератов первичных НЧ Ag. В ячейке оптимизации агломераты первичных НЧ под воздействием импульсного лазерного излучения модифицировались в уединенные НЧ квазисферической формы со средним размером порядка 86 nm (рис. 2, b). Процесс оптимизации инициируется поглощением энергии лазерного излучения агломератами НЧ, которая создает условия с повышенной температурой, достаточной для спекания агломератов в газовой фазе с трансформацией их формы и размера. В соответствии с теорией спекания, нагретый и размягченный материал НЧ под действием сил поверхностного натяжения стремится принять сферическую форму, отвечающую минимуму поверхностной энергии.

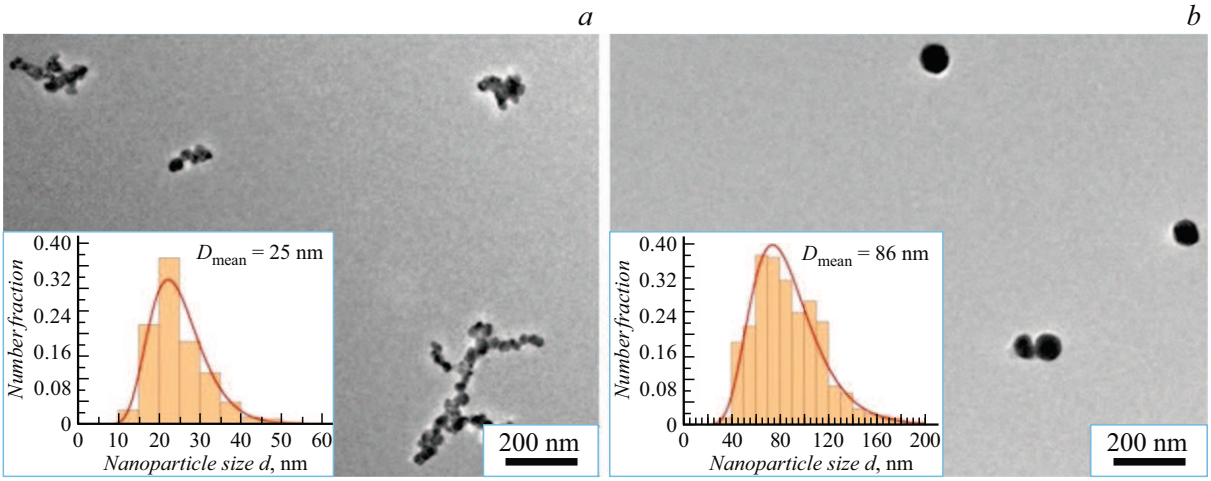

Рис. 2. ПЭМ изображения: *a* — агломератов первичных НЧ; *b* — модифицированных НЧ квазисферической формы. На вставках представлены характерные распределения по размерам для каждого типа НЧ.

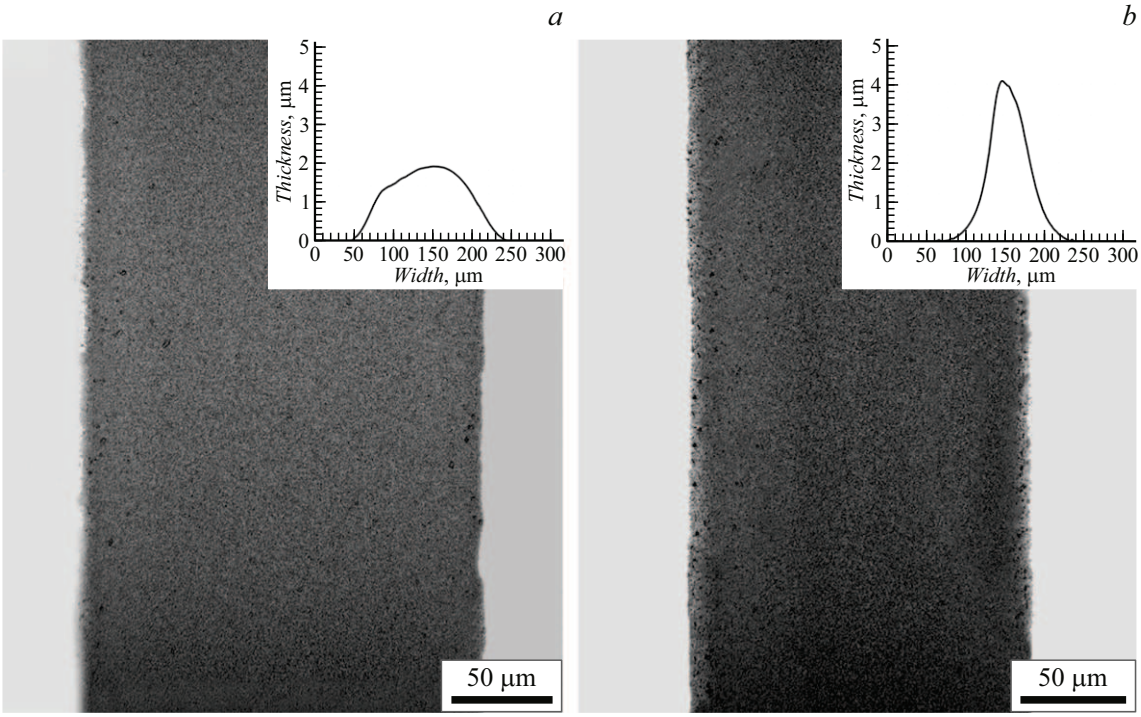

Рис. 3. Оптические снимки: *a* — электрода, сформированного первичными НЧ; *b* — электрода, сформированного модифицированными НЧ. На вставках представлены характерные профили сечения электродов.

Путем сфокусированного осаждения агломератов первичных НЧ и модифицированных НЧ через коаксиальное микросопло формировались электроды на подложках оксидированного кремния. На рис. 3 представлены характерные оптические снимки напечатанных неспеченных электродов и их профили сечений. Из представленных данных видно, что осаждение модифицированных НЧ на подложку позволяет формировать более узкие и высокие электроды. Это связано с более эффективной газовой фокусировкой квазисферических частиц, в отличие от разветвленных агломератов первичных НЧ.

С целью определения оптимальных параметров получения высокопроводящих электродов на оксидированном кремнии производилось два типа спекания: лазерное и термическое. Лазерное спекание импульсным излучением с длиной волны 532 nm производилось одновременно с осаждением НЧ на подложку (рис. 1) с варьируемой плотностью энергии одного импульса от 44 до 352 mJ/cm^2. Выбор режимов лазерного спекания опирался на ранее полученные авторами результаты [21]. Лазерное излучение заводилось в камеру печати через боковое окно, а размер лазерного пучка, перекрываю-

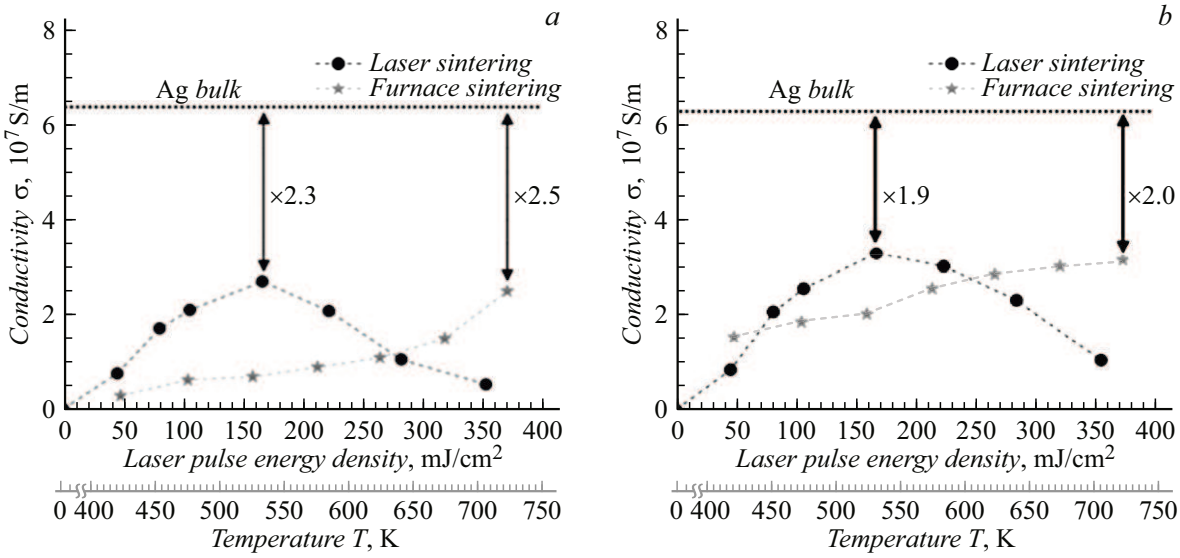

Рис. 4. Зависимости проводимости электродов от плотности энергии импульса лазерного излучения или от температуры спекания: *a* — для электродов, сформированных первичными НЧ Ag; *b* — для электродов, сформированных модифицированными НЧ Ag.

щий аэрозольный пучок на подложке, контролировался с использованием длиннофокусного объектива и моторизированного диэлектрического зеркала, размещенных снаружи камеры.

Термическое спекание напечатанных заготовок электродов производилось в муфельной печи при температурах от 150 °C до 450 °C. Были получены зависимости от температурного или лазерного воздействия для удельной проводимости напечатанных и спеченных электродов (рис. 4), сформированных первичными и модифицированными НЧ и спеченных двумя методами.

Из результатов исследований видно, что электроды, сформированные модифицированными НЧ Ag, обладают более высокой проводимостью вне зависимости от типа спекания по сравнению с электродами, сформированными первичными НЧ. Кроме того, применение одновременного лазерного спекания электродов из модифицированных НЧ приводит к получению более высокопроводящих электродов. Таким образом, при использовании импульсного лазерного излучения с плотностью энергии 166 mJ/cm^2 были сформированы электроды с проводимостью $3.3 \cdot 10^7$ S/m, что в 1.9 раз отличается от проводимости крупнокристаллического серебра. Достигнутые значения проводимости электродов сопоставимы с альтернативными методами, основанными на аэрозольной печати чернилами с НЧ Ag. Например, в работе [22] сообщалось о достижении проводимости печатных серебряных элементов, равной $1.3 \cdot 10^7$ S/m при температуре спекания 200 °C. В работе [23] с использованием аэрозольной чернильной печати продемонстрирована проводимость серебряных микроструктур $2.2 \cdot 10^7$ S/m при использовании фотонного спекания галогеновой лампой с мощностью излучения 500 W в течение 1 min. В работе [24] продемонстрирована проводимость серебряных линий, равная $3.9 \cdot 10^7$ S/m, достигнутая путем осаждения наночернил аэрозольной печатью на подогреваемую подложку с температурой 100 °C и дальнейшим спеканием при температуре 400 °C в течение 60 min.

С целью выявления причин различий удельной проводимости спеченных электродов изучались микроструктуры сечений (сколов) электродов, спеченных различными методами. Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа, изображения которого представлены на рис. 5.

При сравнении микроструктуры сколов неспеченных электродов (рис. 5, *a,b*) можно видеть, что электроды, сформированные первичными НЧ, имеют более рыхлую микроструктуру вследствие малого среднего размера первичных НЧ. При исследовании микроструктуры сколов термически спеченных при 450 °C электродов наблюдается значительное уплотнение материала электродов (рис. 5, *c,d*). Однако следует отметить, что при детальном исследовании микроструктура скола термически спеченных электродов, сформированных первичными НЧ Ag, обладает менее однородной структурой, что приводит к получению электродов с меньшей проводимостью по сравнению с электродами из модифицированных НЧ, — $2.5 \cdot 10^7$ и $3.1 \cdot 10^7$ S/m соответственно. Аналогичная ситуация наблюдается при изучении микроструктур электродов, спеченных импульсным лазерным излучением: микроструктура электродов из модифицированных НЧ более однородна по сравнению с электродами из первичных НЧ (рис. 5, *e,f*), а удельные проводимости составляют $3.3 \cdot 10^7$ и $2.7 \cdot 10^7$ S/m соответственно. Такое различие в эффективности спекания импульсным лазерным излучением электродов, сформированных первичными и модифицированными НЧ,

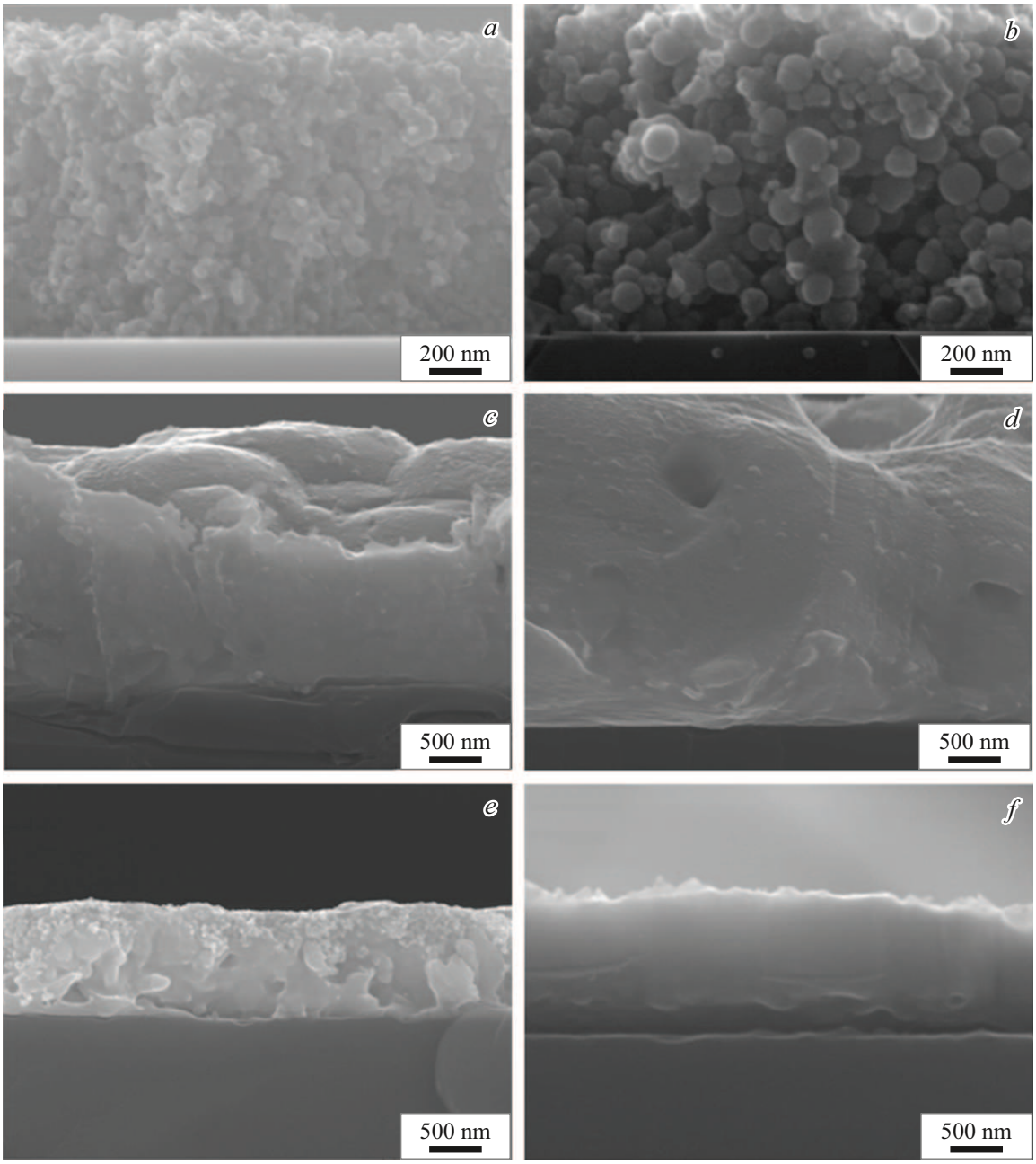

Рис. 5. РЭМ изображения сколов электродов: *a,b* — неспеченные электроды, сформированные первичными НЧ и модифицированными НЧ соответственно; *c,d* — термически спеченные при 450 °C электроды, сформированные первичными НЧ и модифицированными НЧ соответственно; *e,f* — спеченные импульсным лазерным излучением с плотностью энергии 166 mJ/cm^2 электроды, сформированные первичными и модифицированными НЧ соответственно.

также связано с эффективностью поглощения излучения с длиной волны 532 nm. В работе [25] продемонстрировано, что сферические НЧ Ag со средним размером 15 nm эффективнее поглощают излучение с длиной волны 400 nm, а при смещении длины волны в красную сторону эффективность падает. Однако для НЧ с размером 100 nm наибольшая эффективность поглощения излучения наблюдается при длине волны 527 nm. Таким образом, возможен резонансный эффект поглощения лазерного излучения, который объясняет различия в эффективности лазерного спекания для электродов, сформированных первичными и модифицированными НЧ. Следует также отметить, что при спекании импульсным лазерным излучением электроды, сформированные первичными и модифицированными НЧ, обладают более однородной микроструктурой, чем спеченные термическим способом, что, в свою очередь, приводит к увеличению проводимости и объясняется наличием меньшего количества пор в сечении.

Степень усадки сечения электродов в зависимости от типа НЧ и метода спекания

Термическое спекание электродов			Лазерное спекание электродов		
T, K	Степень усадки S, %		W_S, mJ/cm^2	Степень усадки S, %	
	Первичные НЧ	Модифицированные НЧ		Первичные НЧ	Модифицированные НЧ
473	4	6	45.0	48	28
573	19	20	86.0	51	35
673	38	41	105.6	58	59
723	54	61	166.0	61	68

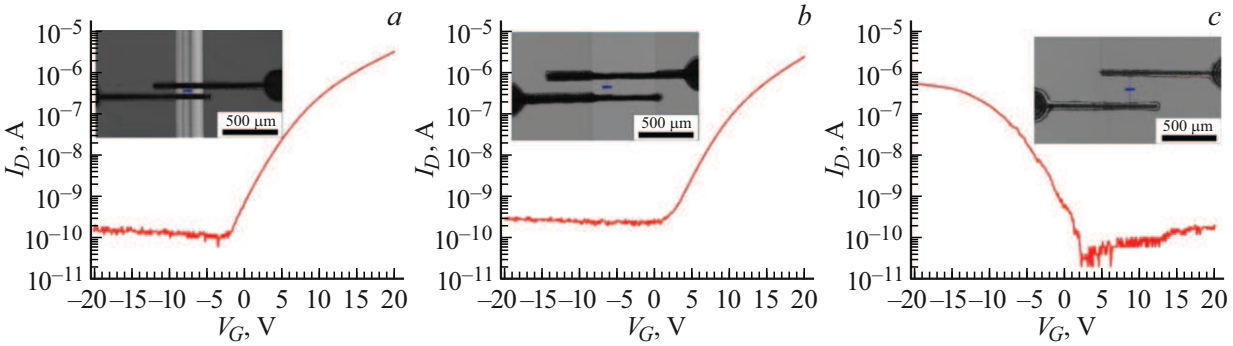

Рис. 6. ВАХ полупроводниковых транзисторов: *a* — на основе IGZO, сформированного струйной печатью; *b* — на основе IGZO, сформированного микроплоттерной печатью; *c* — на основе УНТ, сформированного микроплоттерной печатью. На вставках к ВАХ представлены оптические фотографии проводящих электродов серебра поверх полупроводниковых каналов.

Помимо исследования микроструктуры сколов электродов, был проведен анализ степени усадки S электродов, рассчитанной по формуле (1), в зависимости от типа НЧ и параметров спекания с использованием оптического профилометра. Результаты исследования представлены в таблице.

Механизмы спекания, которые приводят к уплотнению/усадке материала как при термическом, так и при одновременном лазерном спекании, одинаковые. Различается только способ доставки энергии для активации данных процессов. Таким образом, ключевым параметром является количество энергии, переданной системе. С повышением температуры спекания/плотности энергии одиночного импульса увеличивается степень контакта между частицами, что приводит к формированию более плотной микроструктуры и уменьшению количества остаточных пор в результате возникающих перетяжек и сужения между НЧ. Это обусловлено силами поверхностного натяжения. Поверхность НЧ по сравнению с их объемной частью имеет некоторый избыток энергии, возникающей благодаря тому, что атомам на поверхности вещества энергетически невыгодно находиться на границе раздела сред. Стремление системы минимизировать этот избыток поверхностной энергии является движущей силой спекания, что приводит к диффузии материала в область межчастичного контакта и уплотнению структуры.

По результатам исследования степени усадки электродов можно сделать следующие выводы. Во-первых, степень усадки электродов, сформированных первичными НЧ, при термическом и лазерном спекании ниже, чем у электродов, сформированных модифицированными НЧ. Это объясняется неоднородностями в микроструктуре электродов, связанными с размерными характеристиками и агломерацией НЧ. Агломерация НЧ приводит к формированию пористой структуры с крупными межагломератными и мелкими внутриагломератными порами [26]. В процессе спекания мелкие поры сжимаются быстрее из-за большей локальной кривизны, тогда как крупные удалить сложнее. Следовательно, агломерация приводит к остаточным пустотам и неоднородной микроструктуре в процессе спекания. Также известно, что малые размеры НЧ ограничивают усадку микроструктур в процессе спекания по причине увеличения межчастичного взаимодействия [27]. Во-вторых, использование лазерного спекания позволяет достичь большей степени усадки электродов, сформированных первичными и модифицированными НЧ Ag, и, как следствие, повышает их проводимость. Таким образом, низкая удельная проводимость обусловлена высокой остаточной пористостью, связанной с агломерированием и размерными характеристиками НЧ. Согласно результатам профилометрии спеченных электродов, установлено, что минималь-

ная толщина сформированных элементов варьируется в интервале от 0.8 до 1.5 μm.

На основе результатов проведенного исследования была разработана методика формирования электродов стока и истока поверх полупроводниковых каналов транзисторов на основе IGZO и углеродных нанотрубок (УНТ). На рис. 6 представлены характерные ВАХ транзисторов с напечатанными методом САП проводящими электродами серебра поверх полупроводниковых слоев IGZO (рис. 6, *a,b*) и УНТ (рис. 6, *c*) на подложке оксидированного кремния и оптические фотографии электродов.

Заключение

Развивающийся метод САП, включающий в себя четыре технологических процесса — от синтеза НЧ до формирования функциональных элементов на подложках, — имеет перспективы в производстве элементов печатной электроники благодаря отсутствию необходимости в приготовлении наночернил и универсальности спектра используемых материалов в качестве источника НЧ (металлы, сплавы и их оксиды). В работе продемонстрировано влияние микроструктуры формируемых электродов и методов спекания на их удельную проводимость. Впервые показано, что использование одновременного лазерного спекания в процессах формирования электродов САП как первичными, так и модифицированными НЧ позволяет достичь большей проводимости по сравнению с термическим спеканием в муфельной печи. Также продемонстрировано, что при использовании одновременного лазерного спекания электродов, сформированных модифицированными НЧ со средним размером 86 nm, достигается проводимость $3.3 \cdot 10^7$ S/m, что находится на уровне мировых достижений для наноструктурированных серебряных высокопроводящих элементов, и в 1.9 раз отличается от проводимости крупнокристаллического серебра.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] O. Kassem, M. Saadaoui, M. Rieu, J.-P. Viricelle. J. Mater. Chem. C, **7**, 12343 (2019). DOI: 10.1039/C9TC04170B
[2] R. Singh, E. Singh, H.S. Nalwa. RSC Adv., **7**, 48597 (2017). DOI: 10.1039/C7RA07191D
[3] G.D. Han, K. Bae, E.H. Kang, H.J. Choi, J.H. Shim. ACS Energy Lett., **5**, 1586 (2020). DOI: 10.1021/acsenergylett.0c00721
[4] H. Zhu, E.-S. Shin, A. Liu, D. Ji, Y. Xu, Y.-Y. Noh. Adv. Functional Mater., **30**, 1904588 (2020). DOI: 10.1002/adfm.201904588
[5] L. Nayak, S. Mohanty, S.K. Nayak, A. Ramadoss. J. Mater. Chem. C, **7**, 8771 (2019). DOI: 10.1039/C9TC01630A
[6] N.J. Wilkinson, M.A.A. Smith, R.W. Kay, R.A. Harris. Int. J. Adv. Manuf. Technol., **105**, 4599 (2019). DOI: 10.1007/s00170-019-03438-2
[7] J. Suikkola, T. Björninen, M. Mosallaei, T. Kankkunen, P. Iso-Ketola, L. Ukkonen, J. Vanhala, M. Mäntysalo. Sci. Rep., **6**, 25784 (2016). DOI: 10.1038/srep25784
[8] F.S. Fedorov, N.P. Simonenko, V. Trouillet, I.A. Volkov, I.A. Plugin, D.P. Rupasov, A.S. Mokrushin, I.A. Nagornov, T.L. Simonenko, I.S. Vlasov, E.P. Simonenko, V.G. Sevastyanov, N.T. Kuznetsov, A.S. Varezhnikov, M. Sommer, I. Kiselev, A.G. Nasibulin, V.V. Sysoev. ACS Appl. Mater. Interfaces, **12**, 56135 (2020). DOI: 10.1021/acsami.0c14055
[9] D. Gao, J.G. Zhou. Int. J. Bioprint., **5**, 172 (2018). DOI: 10.18063/ijb.v5i1.172
[10] K. Wegner, S. Vinati, P. Piseri, A. Antonini, A. Zelioli, E. Barborini, C. Ducati, P. Milani. Nanotechnology, **23**, 185603 (2012). DOI: 10.1088/0957-4484/23/18/185603
[11] H. Kim, J. Kim, H. Yang, J. Suh, T. Kim, B. Han, S. Kim, D.S. Kim, P.V. Pikhitsa, M. Choi. Nature Nanotech., **1**, 117 (2006). DOI: 10.1038/nnano.2006.94
[12] G.-Y. Lee, J.-I. Park, C.-S. Kim, H.-S. Yoon, J. Yang, S.-H. Ahn. ACS Appl. Mater. Interfaces, **6**, 16466 (2014). DOI: 10.1021/am504304g
[13] A.A. Efimov, G.N. Potapov, A.V. Nisan, V.V. Ivanov. Results Phys., **7**, 440 (2017). DOI: 10.1016/j.rinp.2016.12.052
[14] S. Aghajani, A. Accardo, M. Tichem. ACS Appl. Nano Mater., **3**, 5665 (2020). DOI: 10.1021/acsanm.0c00887
[15] W. Shen, X. Zhang, Q. Huang, Q. Xu, W. Song. Nanoscale, **6**, 1622 (2014). DOI: 10.1039/C3NR05479A
[16] K. Ryu, Y.-J. Moon, K. Park, J.-Y. Hwang, S.-J. Moon. J. Electron. Mater., **45**, 312 (2016). DOI: 10.1007/s11664-015-4073-1
[17] M. Layani, M. Grouchko, S. Shemesh, S. Magdassi. J. Mater. Chem., **22**, 14349 (2012). DOI: 10.1039/C2JM32789A
[18] J. Perelaer, R. Abbel, S. Wünscher, R. Jani, T. van Lammeren, U.S. Schubert. Adv. Mater., **24**, 2620 (2012). DOI: 10.1002/adma.201104417
[19] K. Khabarov, M. Nouraldeen, S. Tikhonov, A. Lizunova, A. Efimov, V. Ivanov. Nanomaterials, **11**, 2701 (2021). DOI: 10.3390/nano11102701
[20] V.V. Ivanov, V.I. Borisov, V.A. Dolgov, D.V. Kornyushin, M.S. Ivanov, V.A. Voroshilova, M.N. Urazov. Russ. J. Phys. Chem., **99**, 3114 (2025). DOI: 10.1134/S0036024425702553
[21] K. Khabarov, D. Kornyushin, B. Masnaviev, D. Tuzhilin, D. Saprykin, A. Efimov, V. Ivanov. Appl. Sci., **10**, 246 (2019). DOI: 10.3390/app10010246
[22] A.G. Kelly, S. Sheil, D.A. Douglas-Henry, E. Caffrey, C. Gabbett, L. Doolan, V. Nicolosi, J.N. Coleman. ACS Appl. Mater. Interfaces, **15**, 39864 (2023). DOI: 10.1021/acsami.3c07459
[23] K. Skarżyński, J. Krzemiński, M. Jakubowska, M. Słoma. Sci. Rep., **11**, 18141 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-97312-5

[24] A. Efimov, P. Arsenov, D. Kornyushin, A. Lizunova, I. Volkov, V. Ivanov. Materials, **13**, 730 (2020). DOI: 10.3390/ma13030730
[25] M. Hlaing, B. Gebear-Eigzabher, A. Roa, A. Marcano, D. Radu, C.-Y. Lai. Opt. Mater., **58**, 439 (2016). DOI: 10.1016/j.optmat.2016.06.013
[26] D. Giuntini, R.K. Bordia, E.A. Olevsky. J. American Ceramic Society, **102**, 628 (2019). DOI: 10.1111/jace.15899
[27] A.V. Ragulya. Adv. Appl. Ceram., **107**, 118 (2008). DOI: 10.1179/174367608X318844