

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-99-111

УДК 535.21

## Выбор режимов одностадийной высокопроизводительной печати серебряных проводящих дорожек на поверхности кремния методом лазерного переноса

Алена Александровна Настулявичус<sup>1</sup>✉, Сергей Иванович Кудряшов<sup>2</sup>,  
Никита Александрович Смирнов<sup>3</sup>, Петр Павлович Пахольчук<sup>4</sup>,  
Светлана Николаевна Шелыгина<sup>5</sup>, Евгения Валерьевна Ултургашева<sup>6</sup>,  
Ирина Николаевна Сараева<sup>7</sup>, Дмитрий Альбертович Заярный<sup>8</sup>,  
Виктория Игоревна Пряхина<sup>9</sup>, Дмитрий Николаевич Хмеленин<sup>10</sup>,  
Ольга Владимировна Емельянова<sup>11</sup>, Фам Хонг Мин<sup>12</sup>, Фам Ван Донг<sup>13</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>9</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

<sup>10, 11</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

<sup>12, 13</sup>Институт физики, Вьетнамская академия науки и технологии, Ханой, Вьетнам

<sup>1</sup>nastulyavichusaa@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6657-2739>

<sup>2</sup>kudryashovsi@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2063-4874>

<sup>3</sup>smirnovna@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6058-769X>

<sup>4</sup>p.paholchuk@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2608-7621>

<sup>5</sup>shelyginasn@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2964-5430>

<sup>6</sup>e.ulturgasheva@lebedev.ru

<https://orcid.org/0009-0000-7497-8130>

<sup>7</sup>saraevain@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2362-023X>

<sup>8</sup>zayarniyda@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4944-9883>

<sup>9</sup>viktoria.pryahina@urfu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7001-051X>

<sup>10</sup>xorrunn@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3951-8985>

<sup>11</sup>eolga@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0894-5087>

<sup>12</sup>phminh@iop.vast.vn

<https://orcid.org/0009-0008-7748-1670>

<sup>13</sup>pvduong@iop.vast.vn

<https://orcid.org/0009-0000-4974-5802>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Проводящие дорожки на поверхности монокристаллического кремния. **Цель работы.** Создание эффективного одностадийного способа формирования токопроводящих элементов электрических цепей на кремнии. **Метод.** Нанесение проводящего слоя серебра производится посредством метода лазерно-индуцированного прямого переноса с донорной подложки. Подбор параметров лазерного излучения позволил определить оптимальный режим переноса с достижением максимального значения удельной проводимости проводящего слоя. Топография поверхности и химический состав исследовались методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской и фотоэлектронной спектроскопии. **Основные результаты.** Максимальная удельная проводимость (около 54 кСм/см (килосименс/сантиметр) была получена при переносе серебряной плёнки лазерным излучением с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 120 нс и плотностью мощности 0,21 ГВт/см<sup>2</sup>.

Скорость сканирования при этом составляла 2000 мм/с, что обеспечивало поступление примерно 2 лазерных импульсов в каждую точку плёнки, в результате чего происходил перенос частиц материала плёнки на кремниевую подложку и их последующее спекание. **Практическая значимость.** Метод, представленный в работе, может быть использован для формирования токопроводящих элементов электрических цепей с высокой удельной проводимостью в одну стадию при одновременном упрощении технологического процесса их формирования и сокращения его продолжительности.

**Ключевые слова:** высокопроизводительная лазерная печать, лазерно-индуцированный прямой перенос, серебряные плёнки, наночастицы

**Благодарность:** работа поддержана министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2023-603). Работа выполнена с использованием оборудования Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии» Уральского федерального университета (рег. номер 2968), поддержанного Министерством науки и высшего образования РФ и центра коллективного пользования «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

**Ссылка для цитирования:** Настулявичус А.А., Кудряшов С.И., Смирнов Н.А., Пахольчук П.П., Шелыгина С.Н., Ултургашева Е.В., Сараева И.Н., Заярный Д.А., Прякина В.И., Хмеленин Д.Н., Емельянова О.В., Фам Хонг Мин, Фам Ван Донг. Выбор режимов одностадийной высокопроизводительной печати серебряных проводящих дорожек на поверхности кремния методом лазерного переноса // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 99–111. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-99-111>

Коды OCIS: 140.0140, 240.0310.

## Selection of regimes for one-step high-throughput laser printing of silver conducting lines on silicon by forward laser transfer

ALENA A. NASTULYAVICHUS<sup>1</sup>✉, SERGEY I. KUDRYASHOV<sup>2</sup>, NIKITA A. SMIRNOV<sup>3</sup>,  
PETR. P. PAHOLCHUK<sup>4</sup>, SVETLANA N. SHELIGIN<sup>5</sup>, EVGENIA V. ULTURGASHEVA<sup>6</sup>,  
IRINA N. SARAIEVA<sup>7</sup>, DMITRY A. ZAYARNYI<sup>8</sup>, VICTORIA I. PRYAKHINA<sup>9</sup>, DMITRY N. KHMELININ<sup>10</sup>,  
OLGA V. EMEYANOVA<sup>11</sup>, PHAM HONG MINH<sup>12</sup>, PHAM VAN DUONG<sup>13</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8</sup>P.N. Lebedev Physical institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>9</sup>Ural federal university, Yekaterinburg, Russia

<sup>10, 11</sup>Institute of Crystallography named after. A.V. Shubnikov Federal Research Center “Crystallography and Photonics” RAS, Moscow, Russia

<sup>12, 13</sup>Institute of Physics VANT, Hanoi, Vietnam

<sup>1</sup>nastulyavichusaa@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0001-6657-2739>

<sup>2</sup>kudryashovsi@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0002-2063-4874>

<sup>3</sup>smirnovna@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0001-6058-769X>

<sup>4</sup>p.paholchuk@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0002-2608-7621>

<sup>5</sup>shelyginasn@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0002-2964-5430>

<sup>6</sup>e.ulturgasheva@lebedev.ru <https://orcid.org/0009-0000-7497-8130>

<sup>7</sup>saraevain@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0003-2362-023X>

<sup>8</sup>zayarniyda@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0002-4944-9883>

<sup>9</sup>viktor.pryakhina@urfu.ru <https://orcid.org/0000-0001-7001-051X>

<sup>10</sup>xorrunn@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3951-8985>

<sup>11</sup>eoelga@bk.ru <https://orcid.org/0000-0003-0894-5087>

<sup>12</sup>phminh@iop.vast.vn <https://orcid.org/0009-0008-7748-1670>

<sup>13</sup>pvduong@iop.vast.vn <https://orcid.org/0009-0000-4974-5802>

### Abstract

**The subject of study** is conducting tracks on the surface of monocrystalline silicon. **The aim of the work** is the development of an effective one-stage method for forming conductive elements of electrical circuits on silicon. **Method.** The deposition of a conductive silver layer is carried out using the method of laser-induced direct transfer from a donor substrate. The selection of laser radiation parameters made it possible to determine the optimal transfer mode to achieve the maximum value of the conductive layer conductivity. The surface topography and chemical composition were studied using scanning and transmission electron microscopy, energy-dispersive X-ray and photoelectron spectroscopy. **Main results.** The maximum specific conductivity (approximately 54 kS/cm) was obtained when transferring a silver film by laser radiation with a wavelength of 1064 nm, a pulse duration of 120 ns and a power density of 0.21 GW/cm<sup>2</sup>. The scanning speed in this case was 2000 mm/s, which ensured the arrival of approximately 2 laser pulses at each point of the film, resulting in the transfer of the film material particles to the silicon substrate and their subsequent sintering. **Practical significance.** The method presented in the work can be used to form the conductive elements of the electrical circuits with high specific conductivity in one stage while simultaneously simplifying the technological process of their formation and reducing its duration.

**Keywords:** high-performance laser printing, laser-induced forward transfer, silver films, nanoparticles

**Acknowledgment:** the study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement no. 075-15-2023-603). The equipment of the Ural Center for Shared Use “Modern Nanotechnology” of Ural Federal University (Reg. no. 2968), which is supported by the Ministry of Science and Higher Education RF, and of the Center for Collective Use “Structural Diagnostics of Materials” of the Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences was used.

**For citation:** Nastulyavichus A.A., Kudryashov S.I., Smirnov N.A., Paholchuk P.P., Shelygina S.N., Ulturgasheva E.V., Saraeva I.N., Zayarnyi D.A., Pryakhina V.I., Khmelenin D.N, Emelyanova O.V., Pham Hong Minh, Pham Van Duong. Selection of regimes for one-step high-throughput laser printing of silver conducting lines on silicon by forward laser transfer [In Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 2. P. 99–111. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-99-111>

**OCIS codes:** 140.0140, 240.0310.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных элементов печатных плат являются проводящие контакты. Наиболее распространенным методом их создания является фотолитография, применение которой осложнено использованием большого количества химических компонентов и реактивов [1]. Для изготовления токопроводящих элементов применяют трафаретную печать с нанесением пасты через трафарет и последующую тепловую обработку [2], химическое гравирование (с использованием фоторезиста и дальнейшей гравировки) [3], применение фотоэкспозиции и травления [4]. В последнее время струйная печать также заявила о себе как о перспективном методе нанесения проводящих элементов [1, 5]. Преимуществом данного метода является использование меньшего объема материалов и возможность прямого нанесения на плату межслойных слоёв. Кроме того, технология аэрозольной струйной печати позволяет обе-

спечить печать дорожек шириной до 8 мкм без использования литографии [6].

Большую популярность также приобрели лазерные методы, позволяющие создавать сложные элементы с высокой точностью [7–9]. Прямая печать объёмных материалов с использованием лазерно-индуцированного прямого переноса (лазерная печать, laser-induced forward transfer (LIFT)) является перспективным методом, в том числе для производства гибкой электроники [10, 11]. Данный метод включает в себя несколько основных физических процессов:

1. Лазерное излучение частично поглощается донорной плёнкой, что приводит к её нагреву.

2. При достаточно высокой плотности мощности лазера донорная плёнка может плавиться или испаряться.

3. Нагрев плёнки может вызвать термомеханическое напряжение, которое в свою очередь

может привести к образованию трещин и разрыву, а также отколу плёнки.

4. В это же время материал на границе раздела перегревается выше точки кипения до тех пор, пока (5) результирующее давление пара на границе не вытолкнет расплавленную плёнку к акцепторной подложке [12, 13].

Основным преимуществом лазерного переноса является быстрое и прецизионное размещение материалов на подложке за счёт бесконтактного переноса и точно контролируемого лазерного сканирования [14].

Лазерная печать позволяет переносить плёнку в виде сферических наночастиц контролируемых размеров посредством варьирования плотности энергии лазерного излучения [15]. В данном методе используются как металлические плёнки, так и пасты, или жидкие чернила. В одной из первых работ [16] лазерный перенос медных плёнок на кремниевую подложку осуществлялся в вакууме. В работах [17, 18] был предложен метод нанесения медных дорожек посредством лазерно-индуцированного осаждения меди из глубоких эвтектических растворителей. Сопротивление таких дорожек составляет 0,6 Ом. В работе [19] проводящие серебряные дорожки получали в результате лазерного переноса серебряных нанопроволок. После переноса частиц осуществлялся отжиг образованного токопроводящего элемента в печи для улучшения его проводимости, достигаемая величина удельной проводимости при этом составила 1,56 кСм/см. Наиболее часто для переноса в качестве донорного материала используют пасты. Так, например, в [20] переносили слой металлической пасты толщиной 40–150 мкм на акцепторную подложку, в результате сканирования его излучением второй гармоники Nd:YAG-лазера с длиной волны 532 нм, длительностью импульса 15 нс, частотой следования импульсов 20–150 кГц производили последующее стационарное спекание перенесённых частиц для улучшения электрической проводимости. Авторы в [21] сообщают о переносе наночастиц серебра с помощью излучения четвёртой гармоники Nd:YAG-лазера с длиной волны 266 нм и длительностью импульса 10 нс. Донорные подложки были получены посредством нанесения коммерческих чернил из серебряных наночастиц на кварцевую подложку, предварительно покрытую слоем титана толщиной 40 нм.

Последующая стадия теплового спекания позволила получить значения удельного сопротивления  $2,9 \times 10^{-1}$  Ом см (кСм/см) для температуры 85 °C,  $9,1 \times 10^{-5}$  Ом см (11 кСм/см) при 100 °C и  $8,4 \times 10^{-5}$  Ом см (12 кСм/см) при 150 °C. В работе [22] серебряные пасты наносили лазерным излучением наносекундной (15 нс) и пикосекундной длительности (13 пс) на поверхность кремния (полированные пластины c-Si, текстурированные c-Si, тонкоплёночные солнечные элементы, нанесённые на металлические гибкие подложки). После термической обработки при 200 °C в течение 1 часа удалось достигнуть величины удельного сопротивления 43 мкОм×см (23 кСм/см). Ещё в одной работе по переносу серебряных паст с помощью лазерного излучения и последующего лазерного спекания [23] была получена величина удельного сопротивления серебряного электрода  $7,2 \times 10^{-6}$  Ом×см (140 кСм/с). Вместе с тем, возможность использования печатающего лазерного излучения для одновременного отжига перенесённой плёнки на акцепторной подложке до сих пор не была реализована, так как требует для одностадийного переноса донорной плёнки и её отжига согласования энергии импульсов излучения и параметров фокусировки (размера и длины перетяжки) для удаления вещества с донорной подложки с нужной эффективностью и в нужном структурно-фазовом состоянии, экспозиции в точку (функция размера фокального пятна, скорости сканирования и частоты следования импульсов) и расстояния переноса порядка размеров перетяжки, определяющего структурно-фазовое состояние перенесённого вещества и условия отжига.

В данной работе разработан способ одностадийной печати проводящих дорожек методом лазерно-индуцированного прямого переноса на примере серебряных донорных плёнок и акцепторной подложки кремния и определения оптимальных режимов путём варьирования параметров лазерного излучения и расстояния переноса для достижения наибольшего значения удельной проводимости.

## ЭКСПЕРИМЕНТ (МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ)

Серебряная плёнка толщиной 500 нм осаждалась на стеклянную подложку методом маг-



нетронного напыления в атмосфере аргона SC7620 (Quorum). Затем производился перенос серебряной плёнки в виде наночастиц на поверхность пластины монокристаллического кремния с естественным нанометровым слоем оксида кремния посредством метода лазерно-индуцированного прямого переноса в воздушной атмосфере. В работе использовался волоконный наносекундный лазер HTF MARK (ОКБ «Булат», Москва, Россия) на ионах  $\text{Yb}^{3+}$  (длина волны 1064 нм, длительность импульса на полувысоте 120 нс, максимальная энергия в импульсе 1 мДж, частота повторения импульсов до 80 кГц). Лазерное излучение фокусировалось гальваносканером с фокусным расстоянием объектива 160 мм на серебряной плёнке в пятно с  $1/e$ -диаметром, равном 40 мкм (длина перетяжки 0,6 мм) и производилось сканирование областей  $3 \times 1 \text{ мм}^2$  со скоростью сканирования в диапазоне от 800 до 3000 мм/с (число импульсов в точку с учётом перекрытия между линиями сканирования  $N = 7\text{--}1,5$ ) (рис. 1). При этом энергия в импульсе варьировалась от 0,25 до 0,4 мДж (плотность мощности 0,18–0,28 ГВт/см<sup>2</sup>). Выбор

энергии обусловлен тем, что энергия ниже 0,25 мДж (0,18 ГВт/см<sup>2</sup>) недостаточна для отрыва частиц плёнки, а использование энергии выше 0,4 (0,28 ГВт/см<sup>2</sup>) мДж приводит к повреждению акцепторной подложки. Расстояние между донорной и акцепторной подложками составляло приблизительно  $60 \pm 15 \text{ мкм}$  и было подобрано экспериментальным путём по максимальному значению удельной проводимости.

Визуализация образцов была получена с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN VEGA (Tescan, Брно, Чехия) с приставкой химического анализа (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДРС, Aztec One; Oxford Instruments) для исследования нано/микротекстуры и химического состава. Для проведения исследования структуры проводящего элемента пробоподготовка образца проводилась методом вырезания тонкой ламели поперечного среза образца с помощью фокусированного ионного пучка на растровом электронном микроскопе Scios (Thermo Fisher Scientific, США). Исследования образцов методами просвечивающей (ПЭМ) и просвечивающей растровой (ПРЭМ) электронной микроскопии были выполнены с использованием микроскопа Osiris (Thermo Fisher Scientific, США), оборудованном высокоугловым кольцевым темнопольным детектором (ВКТД) (Fischione, США) и рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Super X (ChemSTEM, ПРЭМ, США). Для обработки и анализа изображений были использованы программные пакеты Gatan Digital Micrograph (Gatan, США) и Bruker Esprit (Bruker, США).

Исследование состава и химического состояния элементов осуществлялось с помощью рентгеновского фотоэлектронного спектрометра (РФЭС) K-Alpha (Thermo Fisher Scientific) с монохроматическим источником ( $\text{Al K}\alpha$ ,  $h\nu = 1486 \text{ эВ}$ ). Накопление спектров осуществлялось в области диаметром 200 мкм со спектральным шагом 0,1 эВ при энергии пропускания 40 эВ. Энергетический диапазон предварительно калибровался по положениям энергий связи линий  $\text{Au } 4f_{7/2}$  (83,9 эВ),  $\text{Ag } 3d_{5/2}$  (368,1 эВ) и  $\text{Cu } 2p_{3/2}$  (932,6 эВ).

Для исследования трёхмерной топографии поверхности и её структуры использовался сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ,

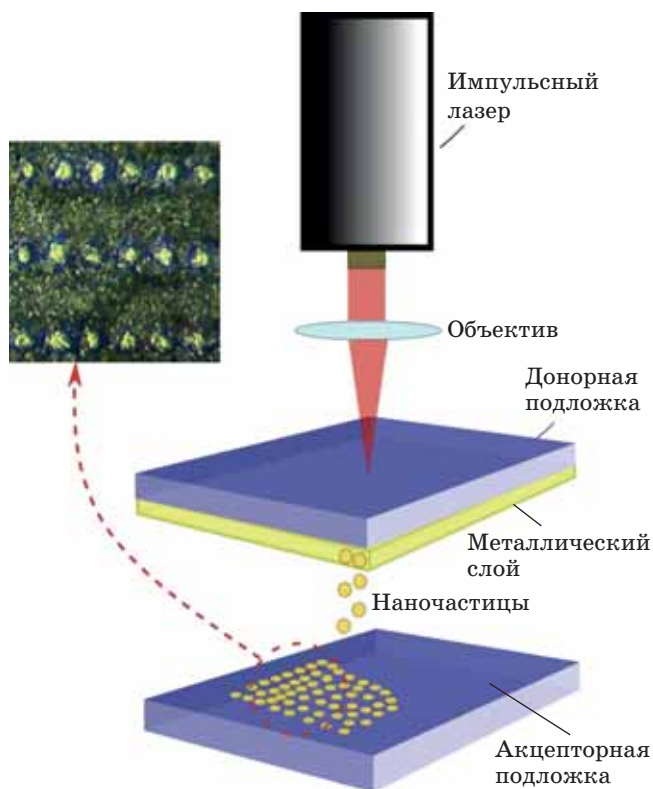


Рис. 1. Экспериментальная схема

Fig. 1. Experimental setup

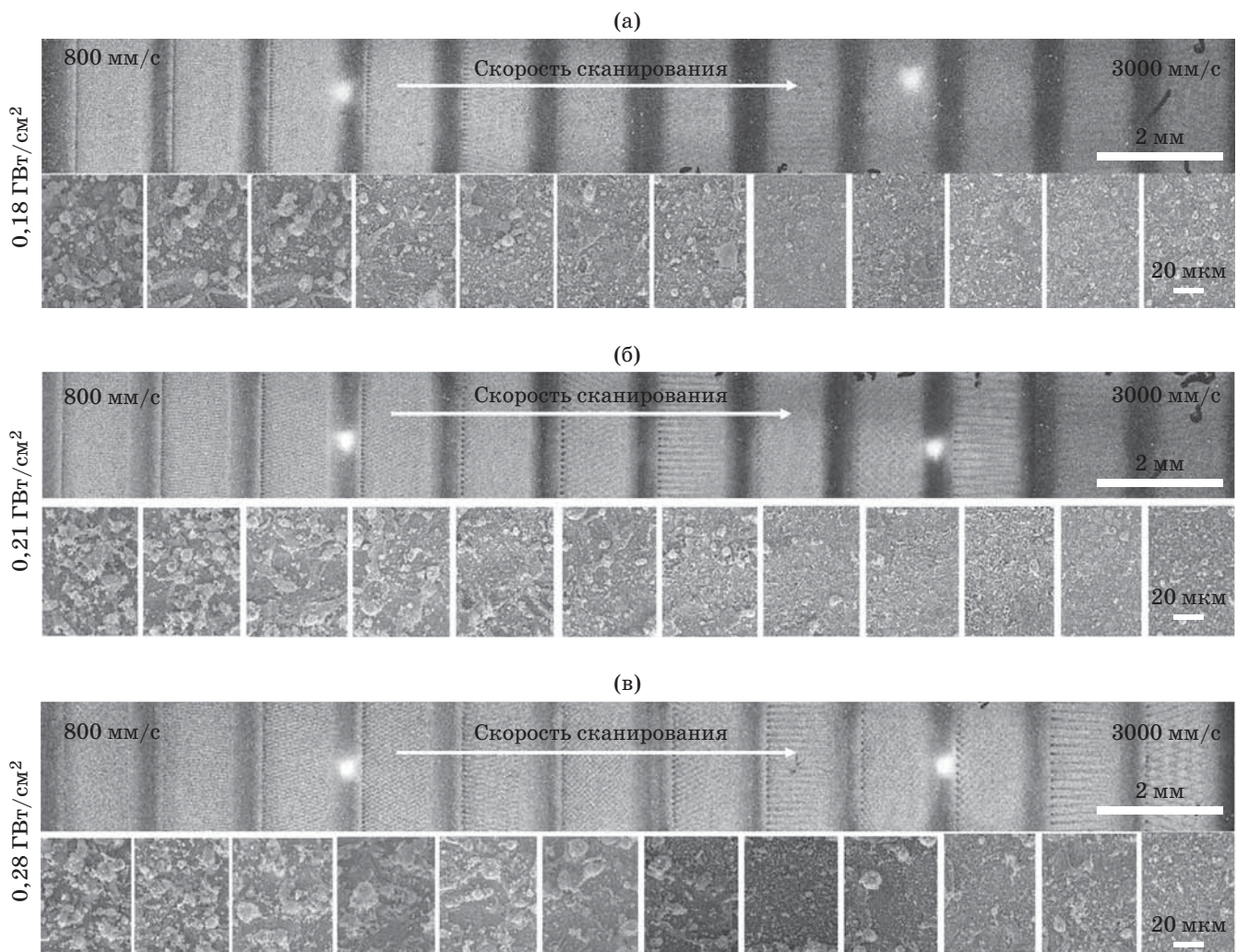
Centrus 5). По полученным профилограммам была произведена оценка микрошероховатости ( $R_z$ ,  $R_a$ ).

Измерение электрического сопротивления напылённых в процессе лазерного переноса проводящих серебряных дорожек осуществлялось с помощью цифрового миллиомметра VC480C + ViCi, позволяющего определять их сопротивление с разрешением до 0,01 миллиома (мОм). Далее, производился пересчёт в удельную проводимость с учётом измеренных значений ширины и толщины дорожки.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Топография и эффективность переноса

Полученные с помощью метода лазерно-индуцированного прямого переноса серебряные дорожки на поверхности кремния были визуализированы с помощью сканирующего электронного микроскопа с ускоряющим напряжением 10 кэВ для двух значений увеличения (рис. 2). Заметно, что топография поверхности для плотностей мощности 0,18 (а), 0,21 (б) и 0,28 (в) ГВт/см<sup>2</sup> меняется с изменением скорости



**Рис. 2.** СЭМ-изображения поверхности кремния с нанесёнными проводящими дорожками для плотностей мощности 0,18 ГВт/см<sup>2</sup> (а), 0,21 ГВт/см<sup>2</sup> (б), 0,28 ГВт/см<sup>2</sup> (в), скорости сканирования 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800, 3000 мм/с; (нижний ряд: тот же участок с большим увеличением)

**Fig. 2.** SEM visualization of a silicon surface with applied conductive tracks for power densities 0.18 GW/cm<sup>2</sup> (a), 0.21 GW/cm<sup>2</sup> (b), 0.28 GW/cm<sup>2</sup> (v), scanning speeds 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800, 3000 mm/s; (bottom row: zoomed in)

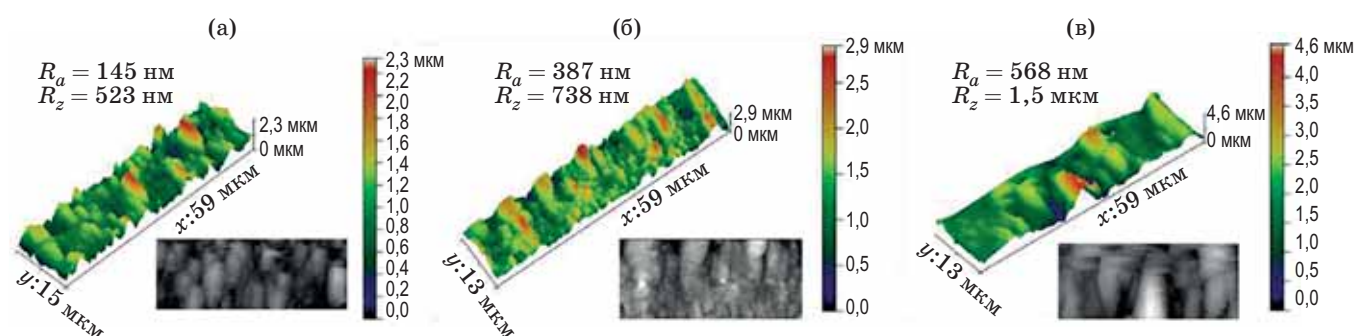


сканирования от 800 до 3000 мм/с — снижение скорости сканирования при одинаковой заливке приводит к увеличению числа повторных перепадов перенесённого вещества, и, как видно из рис. 2 (нижний ряд), с уменьшением скорости размер частиц увеличивается.

Для всех скоростей сканирования материал плёнки удаляется полностью. Как видно из рис. 3, в результате лазерного переноса для плотности мощности 0,18 ГВт/см<sup>2</sup>, скорости сканирования 1500 мм/с (а), 0,21 ГВт/см<sup>2</sup>, 2000 мм/с (б), 0,28 ГВт/см<sup>2</sup>, 2400 мм/с (в) формируется поверхность, состоящая из отдельных

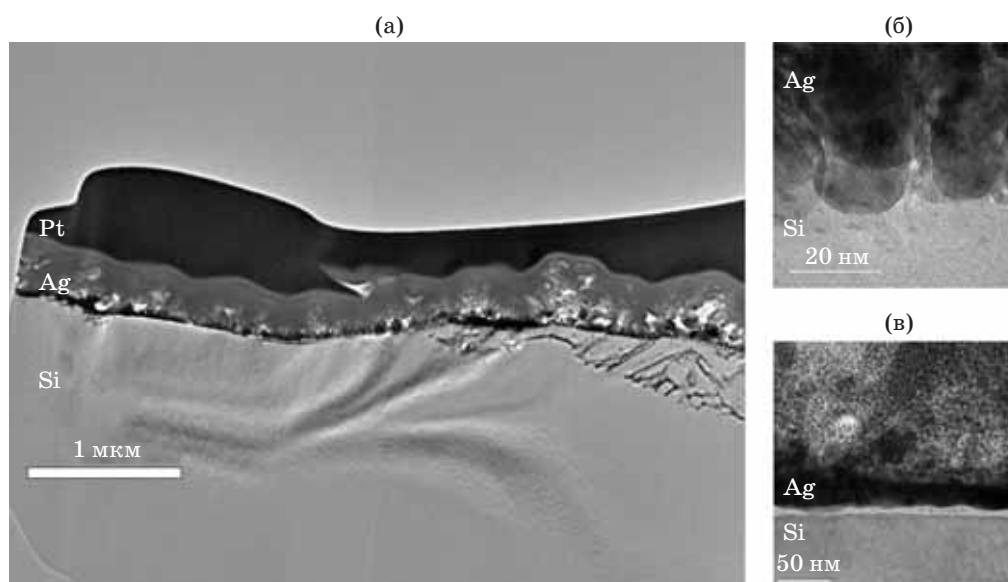
наночастиц и их скоплений. Шероховатость  $R_z$  (высота измеряемых неровностей, определяемая по 10 основным точкам) меняется от 523 до 1500 нм,  $R_a$  (значение исследуемого профиля с возможным среднеарифметическим отклонением) меняется от 145 до 568 нм.

Исследования на просвечивающем электронном микроскопе показали, что в результате переноса на поверхности кремния образуется основной проводящий слой серебряных наночастиц с толщиной примерно 70–100 нм, покрытый более рыхлым слоем из более мелких серебряных наночастиц (рис. 4).



**Рис. 3.** СЗМ-изображение проводящих дорожек, полученных для плотностей мощности 0,18 ГВт/см<sup>2</sup> (а), 0,21 ГВт/см<sup>2</sup> (б) и 0,28 ГВт/см<sup>2</sup> (в)

**Fig. 3.** SPM image of conductive tracks obtained for energies of 0.18 GW/cm<sup>2</sup> (а), 0.21 GW/cm<sup>2</sup> (б) and 0.28 GW/cm<sup>2</sup> (в)



**Рис. 4.** ПЭМ-изображения среза проводящего слоя серебра на кремниевой подложке (для режима с плотностью мощности 0,21 ГВт/см<sup>2</sup> и скоростью сканирования 2000 мм/с) (а), изображения с большим увеличением (б, в)

**Fig. 4.** TEM images of section of silver conductive layer on silicon substrate (for a mode with a power density of 0.21 GW/cm<sup>2</sup> and a scanning speed of 2000 mm/s) (а), high-magnification images (б, в)

### 3.2. Химический состав

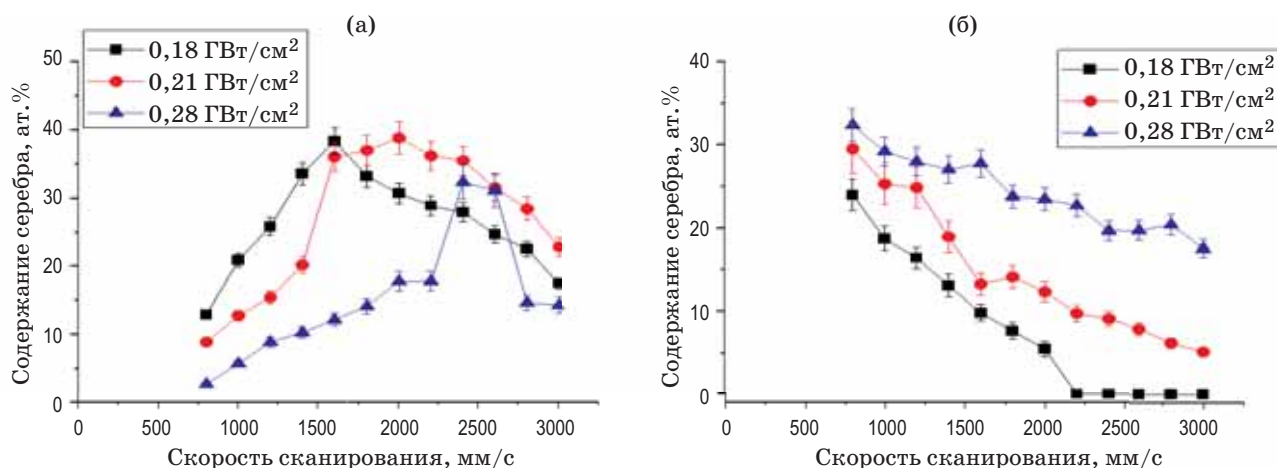
Химический состав перенесённого материала исследовался методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (условия см. в разделе 2).

По данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с увеличением скорости сканирования для всех плотностей мощности лазерного излучения содержание серебра растёт до определенного значения скорости, а затем падает (рис. 5). Наблюдается смещение пика с увеличением плотности мощности лазерного излучения. Содержание кислорода при этом падает с увеличением скорости сканирования и максимально для наибольшей плотности мощности (порядка 35 ат. %).

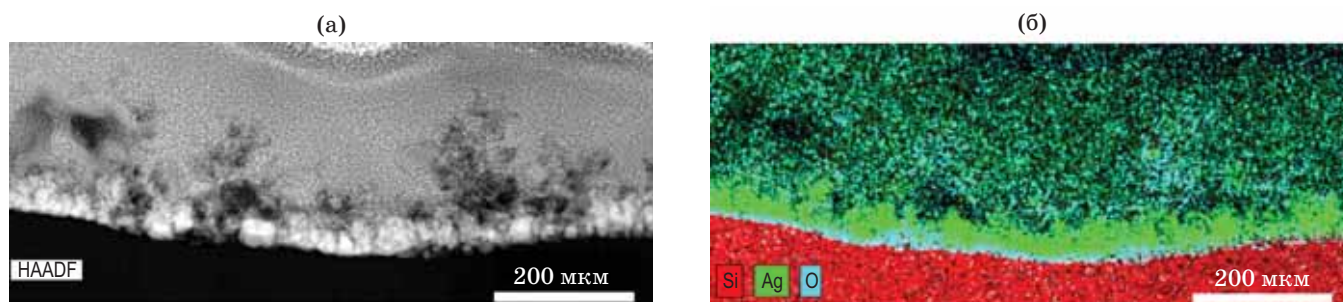
Анализ ПРЭМ-изображений и фурье-дифрактограмм соответствующих областей ламиналы подтверждает, что частицы представляют собой серебро в кубической сингонии (рис. 7).

Анализировались обзорный спектр и спектры областей Si 2p, C 1s, O 1s, Ag 3d, Ag MNN. В области Si 2p выделены пики энергией связи около 99,5 эВ, характеризующий элементный кремний, и около 103,5 эВ, характеризующий диоксид кремния с соответствующим ему пиком около 532,9 эВ в области O 1s. Основная компонента углерода около 284,8 эВ характерна для поверхностного загрязнения при контакте с атмосферой.

Область Ag 3d представлена дублетом с энергиями связи около 368,5 и 374,5 эВ

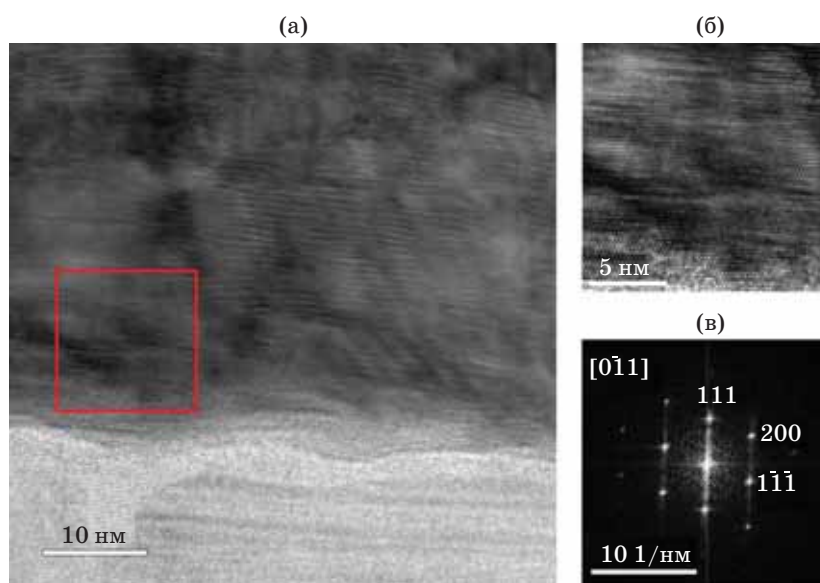


**Рис. 5.** ЭДРС-исследования образцов в зависимости от скорости сканирования для серебра (а), кислорода (б)  
**Fig. 5.** EDX studies of samples as a function of scanning speed (a) for silver, (b) oxygen



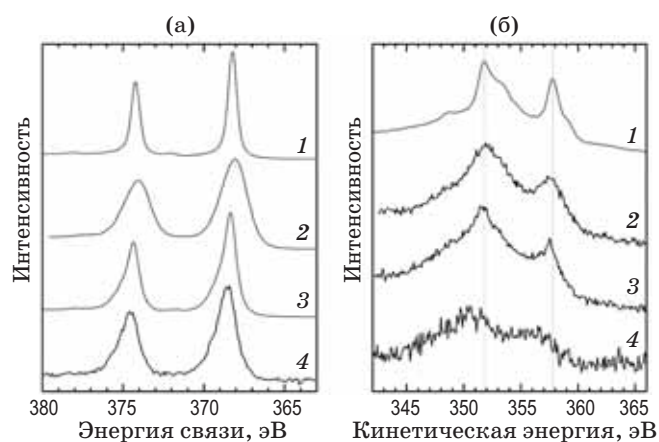
**Рис. 6.** Изображение среза проводящего слоя серебра (для режима с плотностью мощности 0,21 ГВт/см² и скоростью сканирования 2000 мм/с), полученное методом просвечивающей растровой электронной микроскопии, в темном поле под большим углом (а); ЭДРС-карта распределения химических элементов (б)  
**Fig. 6.** Image of section of silver conductive layer (for a mode with a power density of 0.21 GW/cm² and a scanning speed of 2000 mm/s) obtained using high-angle dark-field transmission scanning electron microscopy (a); EDX map of chemical elements distribution (b)





**Рис. 7.** ПЭМ-изображение участка образца (для режима с плотностью мощности 0,21 ГВт/см<sup>2</sup> и скоростью сканирования 2000 мм/с) (а), электронно-микроскопическое изображение решётки серебра (б), фурье-дифракционная картина отмеченного участка (в)

**Fig. 7.** TEM image of a sample area (for a mode with a power density of 0.21 GW/cm<sup>2</sup> and a scanning speed of 2000 mm/s) (a), electron microscopic image of a silver lattice (б), Fourier diffraction pattern of the marked area (v)



**Рис. 8.** Сравнение спектров РФЭС регионов (а) Ag 3d и (б) Ag MNN плёнок (2) для скорости 500 мм/с, (3) 1000 мм/с, (4) 2000 мм/с и (1) металлического серебра (для режима с плотностью мощности 0,21 ГВт/см<sup>2</sup>)

**Fig. 8.** Comparison of XPS spectra of the regions of (a) Ag 3d and (б) Ag MNN films (2) for a speed of 500 mm/s, (3) 1000 mm/s, (4) 2000 mm/s and (1) metallic silver (for mode with power density 0.21 GW/cm<sup>2</sup>)

(Ag 3d<sub>5/2</sub> и Ag 3d<sub>3/2</sub> соответственно) с заметным уширением по сравнению с металлическим серебром (рис. 8а). Форма спектра области Ag MNN наглядно демонстрирует,

Содержание серебра в различных химических состояниях по результатам деконволюции спектров РФЭС (дорожки, полученные при плотности мощности лазерного излучения 0,21 ГВт/см<sup>2</sup>)

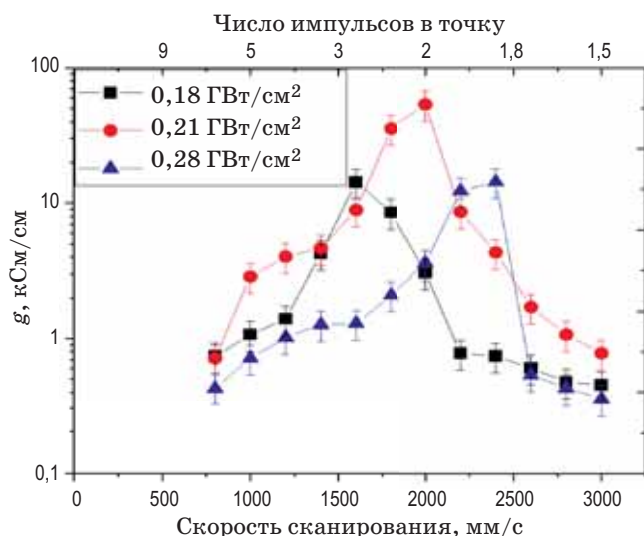
Silver content in different chemical states based on the results of deconvolution of XPS spectra (tracks obtained for power density of laser radiation 0.21 GW/cm<sup>2</sup>)

Образец (скорость сканирования)	2000 мм/с	1000 мм/с	500 мм/с
Концентрация, ат. %			
Ag металл	0,17	2,76	0,81
Ag оксид	0,81	4,17	7,93

что серебро в рыхлом верхнем слое представлено в форме оксида или смеси оксид-металл (рис. 8б) [24, 25]. Анализ спектра области Ag 3d позволил, в результате проведённого спектрального разложения по компонентам [24], оценить вклады оксида и металла для верхнего слоя перенесённого вещества (табл.).

### 3.3. Электрофизические свойства

Удельная проводимость исходной донорной плёнки составляет 250 кСм/см (образец сравнения). По сравнению с этим значением



**Рис. 9.** Зависимость удельной проводимости  $g$  проводящих серебряных дорожек от скорости сканирования (числа импульсов в точку)

**Fig. 9.** Dependence of specific conductivity  $g$  of conducting silver tracks on scanning speed (number of pulses per point)

в зависимости от скорости сканирования диапазоны значений удельной проводимости составляют 0,45–14 кСм/см (плотность мощности — 0,18 ГВт/см<sup>2</sup>), 0,7–54 кСм/см (0,21 ГВт/см<sup>2</sup>) и 0,4–14 кСм/см (0,28 ГВт/см<sup>2</sup>). При этом с увеличением скорости сканирования (уменьшения числа импульсов в точку) наблюдается увеличение проводимости проводящих дорожек (рис. 9), что коррелирует с поведением содержания серебра (рис. 5). Оптимальное значение проводимости достигается в количестве около 2–3 импульсов в точку (скорость сканирования — 1500–2400 мм/с),

в результате чего происходит перенос частиц материала плёнки первым импульсом и их последующее спекание вторым импульсом. При увеличении скорости сканирования (свыше 2400 мм/с) происходит ухудшение сплошности образующегося токопроводящего элемента, поскольку происходит только одноимпульсный перенос без спекания последующими импульсами. При уменьшении скорости сканирования ниже 1500 мм/с происходит абляционное удаление материала частиц с акцепторной подложки множественными импульсами (более 3), приводящее к уменьшению удельной проводимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирован метод формирования токопроводящих серебряных дорожек с удельной проводимостью порядка 54 кСм/см в одну стадию на поверхности монокристаллического кремния с помощью лазерно-индуцированного прямого переноса с донорной серебряной плёнки. Проведена характеристика топографии поверхности дорожек посредством сканирующей и зондовой электронной микроскопии, внутренняя структура визуализирована методами просвечивающей электронной микроскопии. Энергодисперсионный рентгеновский и рентгеновский фотоэлектронный спектральный анализы показали корреляцию содержания серебра и удельной проводимости, а также наличие кислорода, которое уменьшается с увеличением скорости сканирования. В результате исследований были определены оптимальные параметры лазерного излучения и сканирования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков С.Д. Современные технологии производства радиоэлектронной аппаратуры. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 102 с.
2. Yoon I.S., Oh Y., Kim S.H., Choi J., Hwang Y., Park C.H., Ju B.K. 3D printing of self-wiring conductive ink with high stretchability and stackability for customized wearable devices // *Advanced Materials Technologies*. 2019. V. 4. № 9. P. 1900363. <https://doi.org/10.1002/admt.201900363>
3. Naghdi S., Rhee K.Y., Hui D., Park S.J. A review of conductive metal nanomaterials as conductive, transparent, and flexible coatings, thin films, and conductive fillers: Different deposition methods and applications // *Coatings*. 2018. V. 8. № 8. P. 1–27. <https://doi.org/10.3390/coatings8080278>

## REFERENCES

1. Tretyakov S.D. Modern technologies of radio-electronic equipment production. St. Petersburg: ITMO University, 2016. 102 p.
2. Yoon I.S., Oh Y., Kim S.H., Choi J., Hwang Y., Park C.H., Ju B.K. 3D printing of self-wiring conductive ink with high stretchability and stackability for customized wearable devices // *Advanced Materials Technologies*. 2019. V. 4. № 9. P. 1900363. <https://doi.org/10.1002/admt.201900363>
3. Naghdi S., Rhee K.Y., Hui D., Park S.J. A review of conductive metal nanomaterials as conductive, transparent, and flexible coatings, thin films, and conductive fillers: Different deposition methods and applications // *Coatings*. 2018. V. 8. № 8. P. 1–27. <https://doi.org/10.3390/coatings8080278>

4. Kamyshny A., Magdassi S. Conductive nanomaterials for printed electronics // *Small*. 2014. V. 10. № 17. P. 3515–3535. <https://doi.org/10.1002/sml.201303000>
5. Albrecht A., Rivadeneyra A., Abdellah A., Lugli P., Salmerón, J.F. Inkjet printing and photonic sintering of silver and copper oxide nanoparticles for ultra-low-cost conductive patterns // *Journal of Materials Chemistry C*. 2016. V. 4. № 16. P. 3546–3554. <https://doi.org/10.1039/c6tc00628k>
6. Navratil J., Hamacek A., Reboun J., Soukup R. Perspective methods of creating conductive paths by Aerosol Jet Printing technology // 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Eger, Hungary. May 06–10. 2015. P. 36–39. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2015.7247957>
7. Deore B., Sampson K.L., Lacelle T. et al. Direct printing of functional 3D objects using polymerization-induced phase separation // *Nat. Commun.* 2021. V. 12. № 55. P. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20256-3>
8. Edri E., Armon N., Greenberg E. et al. Laser printing of multilayered alternately conducting and insulating microstructures // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. V. 13. № 30. P. 36416–36425. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c06204>
9. Jung S.G., Han Y., Kim J.H. et al. High critical current density and high-tolerance superconductivity in high-entropy alloy thin films // *Nat. Commun.* 2022. V. 13. P. 3373. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30912-5>
10. Serra P., Piqué A. Laser-induced forward transfer: fundamentals and applications // *Adv. Mater. Technol.* 2019. V. 4. № 1. P. 1800099. <https://doi.org/10.1002/admt.201800099>
11. Winter S., Zenou M., Kotler Z. Conductivity of laser printed copper structures limited by nano-crystal grain size and amorphous metal droplet shell // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016. V. 49. № 16. P. 165310. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/16/165310>
12. Morales M., Munoz-Martin D., Marquez A., Lauzurica S., Molpeceres C. Laser-induced forward transfer techniques and applications // *Advances in Laser Materials Processing*. 2018. P. 339–379. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101252-9.00013-3>
13. Shugaev M.V., Bulgakova N.M. Thermodynamic and stress analysis of laser-induced forward transfer of metals // *Appl. Phys. A*. 2010. V. 101. P. 103–109. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5767-0>
14. Lee C.K.W., Pan Y., Yang R., Kim M., Li M.G. Laser-induced transfer of functional materials // *Top Curr Chem (Z)*. 2023. V. 381. № 4. P. 18. <https://doi.org/10.1007/s41061-023-00429-6>
15. Chichkov B. Laser printing: trends and perspectives // *Appl. Phys. A*. 2022. V. 128. № 11. P. 1015. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-06158-9>
16. Bohandy J., Kim B.F., Adrian F.J. Metal deposition from a supported metal film using an excimer laser // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 60. № 4. P. 1538–1539. <https://doi.org/10.1063/1.337287>
17. Avilova E.A., Khairullina E.M., Shishov A.Y., Eltysheva E.A., Mikhailovskii V., Sinev D.A., Tumkin I.I. Direct laser writing of copper micropatterns from deep eutectic solvents using pulsed near-IR radiation // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. № 7. P. 1127. <https://doi.org/10.3390/nano12071127>
18. Avilova E., Khairullina E., Eltysheva E., Zaikina M., Shishov A., Sinev D., Tumkin I. Fabrication of copper
4. Kamyshny A., Magdassi S. Conductive nanomaterials for printed electronics // *Small*. 2014. V. 10. № 17. P. 3515–3535. <https://doi.org/10.1002/sml.201303000>
5. Albrecht A., Rivadeneyra A., Abdellah A., Lugli P., Salmerón, J.F. Inkjet printing and photonic sintering of silver and copper oxide nanoparticles for ultra-low-cost conductive patterns // *Journal of Materials Chemistry C*. 2016. V. 4. № 16. P. 3546–3554. <https://doi.org/10.1039/c6tc00628k>
6. Navratil J., Hamacek A., Reboun J., Soukup R. Perspective methods of creating conductive paths by Aerosol Jet Printing technology // 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Eger, Hungary. May 06–10. 2015. P. 36–39. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2015.7247957>
7. Deore B., Sampson K.L., Lacelle T. et al. Direct printing of functional 3D objects using polymerization-induced phase separation // *Nat. Commun.* 2021. V. 12. № 55. P. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20256-3>
8. Edri E., Armon N., Greenberg E. et al. Laser printing of multilayered alternately conducting and insulating microstructures // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. V. 13. № 30. P. 36416–36425. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c06204>
9. Jung S.G., Han Y., Kim J.H. et al. High critical current density and high-tolerance superconductivity in high-entropy alloy thin films // *Nat. Commun.* 2022. V. 13. P. 3373. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30912-5>
10. Serra P., Piqué A. Laser-induced forward transfer: fundamentals and applications // *Adv. Mater. Technol.* 2019. V. 4. № 1. P. 1800099. <https://doi.org/10.1002/admt.201800099>
11. Winter S., Zenou M., Kotler Z. Conductivity of laser printed copper structures limited by nano-crystal grain size and amorphous metal droplet shell // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016. V. 49. № 16. P. 165310. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/16/165310>
12. Morales M., Munoz-Martin D., Marquez A., Lauzurica S., Molpeceres C. Laser-induced forward transfer techniques and applications // *Advances in Laser Materials Processing*. 2018. P. 339–379. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101252-9.00013-3>
13. Shugaev M.V., Bulgakova N.M. Thermodynamic and stress analysis of laser-induced forward transfer of metals // *Appl. Phys. A*. 2010. V. 101. P. 103–109. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5767-0>
14. Lee C.K.W., Pan Y., Yang R., Kim M., Li M.G. Laser-induced transfer of functional materials // *Top Curr Chem (Z)*. 2023. V. 381. № 4. P. 18. <https://doi.org/10.1007/s41061-023-00429-6>
15. Chichkov B. Laser printing: trends and perspectives // *Appl. Phys. A*. 2022. V. 128. № 11. P. 1015. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-06158-9>
16. Bohandy J., Kim B.F., Adrian F.J. Metal deposition from a supported metal film using an excimer laser // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 60. № 4. P. 1538–1539. <https://doi.org/10.1063/1.337287>
17. Avilova E.A., Khairullina E.M., Shishov A.Y., Eltysheva E.A., Mikhailovskii V., Sinev D.A., Tumkin I.I. Direct laser writing of copper micropatterns from deep eutectic solvents using pulsed near-IR radiation // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. № 7. P. 1127. <https://doi.org/10.3390/nano12071127>
18. Avilova E., Khairullina E., Eltysheva E., Zaikina M., Shishov A., Sinev D., Tumkin I. Fabrication of copper



- patterns on industrial-used dielectric substrates by direct laser metallization from deep eutectic solvents // ChemRxiv. Cambridge: Cambridge Open Engage. 2023. P. 1–12. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-b8pln>
19. Araki T., Mandamparambil R., Martinus Peterus van Bragt D. Stretchable and transparent electrodes based on patterned silver nanowires by laser-induced forward transfer for non-contacted printing techniques // Nanotechnology. 2006. V. 27. № 45. P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/45/45LT02>
  20. DeVaul R.W., Aminzade D. Agent interfaces for interactive electronics that support social cues // US Patent 0 138 333 A1. 2013. Publ. May 21, 2015.
  21. Makrygianni M., Kalpyris I., Boutopoulos C., Zergioti I. Laser induced forward transfer of Ag nanoparticles ink deposition and characterization // Applied surface science. 2014. V. 297. P. 40–44. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.01.069>
  22. Chen Y., Munoz-Martin D., Morales M., Molpeceres C., Sánchez-Cortezon E., Murillo-Gutierrez J. Laser induced forward transfer of high viscosity silver paste for new metallization methods in photovoltaic and flexible electronics industry // Physics Procedia. 2016. V. 83. P. 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.010>
  23. Lim J., Kim Y., Shin J., Lee Y., Shin W., Qu W., Hwang E., Park S., Hong S. Continuous-wave laser-induced transfer of metal nanoparticles to arbitrary polymer substrates // Nanomaterials. 2020. V. 10. № 4. P. 701. <https://doi.org/10.3390/nano10040701>
  24. Ferraria A.M., Carapeto A.P., Botelho do Rego A.M. X-ray photoelectron spectroscopy: Silver salts revisited // Vacuum. 2012. V. 86. № 12. P. 1988–1991. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.05.031>
  25. Kaspar T.C., Droubay T., Chambers S.A., Bagus P.S. Spectroscopic evidence for Ag(III) in highly oxidized silver films by X-ray photoelectron spectroscopy // J. Phys. Chem. C. 2010. V. 114. № 49. P. 21562–21571. <https://doi.org/10.1021/jp107914e>
  19. Araki T., Mandamparambil R., Martinus Peterus van Bragt D. Stretchable and transparent electrodes based on patterned silver nanowires by laser-induced forward transfer for non-contacted printing techniques // Nanotechnology. 2006. V. 27. № 45. P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/45/45LT02>
  20. DeVaul R.W., Aminzade D. Agent interfaces for interactive electronics that support social cues // US Patent 0 138 333 A1. 2013. Publ. May 21, 2015.
  21. Makrygianni M., Kalpyris I., Boutopoulos C., Zergioti I. Laser induced forward transfer of Ag nanoparticles ink deposition and characterization // Applied surface science. 2014. V. 297. P. 40–44. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.01.069>
  22. Chen Y., Munoz-Martin D., Morales M., Molpeceres C., Sánchez-Cortezon E., Murillo-Gutierrez J. Laser induced forward transfer of high viscosity silver paste for new metallization methods in photovoltaic and flexible electronics industry // Physics Procedia. 2016. V. 83. P. 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.010>
  23. Lim J., Kim Y., Shin J., Lee Y., Shin W., Qu W., Hwang E., Park S., Hong S. Continuous-wave laser-induced transfer of metal nanoparticles to arbitrary polymer substrates // Nanomaterials. 2020. V. 10. № 4. P. 701. <https://doi.org/10.3390/nano10040701>
  24. Ferraria A.M., Carapeto A.P., Botelho do Rego A.M. X-ray photoelectron spectroscopy: Silver salts revisited // Vacuum. 2012. V. 86. № 12. P. 1988–1991. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.05.031>
  25. Kaspar T.C., Droubay T., Chambers S.A., Bagus P.S. Spectroscopic evidence for Ag(III) in highly oxidized silver films by X-ray photoelectron spectroscopy // J. Phys. Chem. C. 2010. V. 114. № 49. P. 21562–21571. <https://doi.org/10.1021/jp107914e>

## АВТОРЫ

**Алена Александровна Настулявичус** — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-6657-2739>; [nastulyavichusaa@lebedev.ru](mailto:nastulyavichusaa@lebedev.ru)

**Сергей Иванович Кудряшов** — доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной нанофизики и биомедицины, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-2063-4874>; [kudryashovsi@lebedev.ru](mailto:kudryashovsi@lebedev.ru)

**Никита Александрович Смирнов** — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-6058-769X>; [smirnovna@lebedev.ru](mailto:smirnovna@lebedev.ru)

**Петр Павлович Пахольчук** — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-2608-7621>; [p.paholchuk@lebedev.ru](mailto:p.paholchuk@lebedev.ru)

**Светлана Николаевна Шелыгина** — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-2964-5430>; [shelyginasn@lebedev.ru](mailto:shelyginasn@lebedev.ru)

## AUTHORS

**Alena A. Nastulyavichus** — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-6657-2739>; [nastulyavichusaa@lebedev.ru](mailto:nastulyavichusaa@lebedev.ru)

**Sergey I. Kudryashov** — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Head of Laboratory of laser nanophysics and biomedicine, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2063-4874>; [kudryashovsi@lebedev.ru](mailto:kudryashovsi@lebedev.ru)

**Nikita A. Smirnov** — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-6058-769X>; [smirnovna@lebedev.ru](mailto:smirnovna@lebedev.ru)

**Petr P. Pakholchuk** — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2608-7621>; [p.paholchuk@lebedev.ru](mailto:p.paholchuk@lebedev.ru)

**Svetlana N. Shelygina** — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2964-5430>; [shelyginasn@lebedev.ru](mailto:shelyginasn@lebedev.ru)

**Евгения Валерьевна Ултургашева** — инженер-исследователь, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия; <https://orcid.org/0009-0000-7497-8130>; [e.ulturgasheva@lebedev.ru](mailto:e.ulturgasheva@lebedev.ru)

**Ирина Николаевна Сараева** — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-2362-023X>; [saraevain@lebedev.ru](mailto:saraevain@lebedev.ru)

**Дмитрий Альбертович Заярный** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-4944-9883>; [zayarniyda@lebedev.ru](mailto:zayarniyda@lebedev.ru)

**Виктория Игоревна Пряхина** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Уральский федеральный университет, 620002, Екатеринбург, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-7001-051X>; [viktoria.pryahina@urfu.ru](mailto:viktoria.pryahina@urfu.ru)

**Дмитрий Николаевич Хмеленин** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 117342, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3951-8985>; [xorrunn@gmail.com](mailto:xorrunn@gmail.com)

**Ольга Владимировна Емельянова** — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 117342, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0894-5087>; [eolga@bk.ru](mailto:eolga@bk.ru)

**Фам Хонг Мин** — доктор физ.-мат. наук, профессор, Институт физики, Вьетнамская академия науки и технологии, Ханой, Вьетнам; <https://orcid.org/0009-0008-7748-1670>; [phminh@iop.vast.vn](mailto:phminh@iop.vast.vn)

**Фам Ван Донг** — доктор физ.-мат. наук, Институт физики, Вьетнамская академия науки и технологии, Ханой, Вьетнам; <https://orcid.org/0009-0000-4974-5802>; [pvduong@iop.vast.vn](mailto:pvduong@iop.vast.vn)

**Evgenia V. Ulturgasheva** — Research Engineer, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0009-0000-7497-8130>; [e.ulturgasheva@lebedev.ru](mailto:e.ulturgasheva@lebedev.ru)

**Irina N. Saraeva** — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-2362-023X>; [saraevain@lebedev.ru](mailto:saraevain@lebedev.ru)

**Dmitriy A. Zayarny** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-4944-9883>; [zayarniyda@lebedev.ru](mailto:zayarniyda@lebedev.ru)

**Victoria I. Pryakhina** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Scientific Associate, Ural Federal University, 620002, Yekaterinburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-7001-051X>; [viktoria.pryahina@urfu.ru](mailto:viktoria.pryahina@urfu.ru)

**Dmitry N. Khmelenin** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Shubnikov Institute of Crystallography and Photonics, Russian Academy of Sciences, 117342, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3951-8985>; [xorrunn@gmail.com](mailto:xorrunn@gmail.com)

**Olga V. Emelyanova** — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Shubnikov Institute of Crystallography and Photonics, Russian Academy of Sciences, 117342, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0894-5087>; [eolga@bk.ru](mailto:eolga@bk.ru)

**Pham Hong Minh** — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam; <https://orcid.org/0009-0008-7748-1670>; [phminh@iop.vast.vn](mailto:phminh@iop.vast.vn)

**Pham Van Duong** — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam; <https://orcid.org/0009-0000-4974-5802>; [pvduong@iop.vast.vn](mailto:pvduong@iop.vast.vn)

Статья поступила в редакцию 29.09.2023

Одобрена после рецензирования 08.12.2023

Принята к печати 29.12.2023

The article was submitted to the editorial office 29.09.2023

Approved after review 08.12.2023

Accepted for publication 29.12.2023