



УДК 621.384.6+ 681.6-32

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.634.636

РАЗВИТИЕ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА 3D-МИКРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ АЭРОЗОЛЬНОЙ ПЕЧАТИ НАНОЧАСТИЦАМИ С ЛОКАЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЕКАНИЕМ

DEVELOPING ADDITIVE TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF 3D-MICROSTRUCTURES BASED ON AEROSOL NANOPARTICLES PRINTING WITH LOCAL LASER SINTERING

ИВАНОВ ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ¹

ivanov.vv@mipt.ru

IVANOV VICTOR V.¹

ivanov.vv@mipt.ru

ТУЖИЛИН ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ¹TUZHILIN DMITRY N.¹ЕФИМОВ АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ¹EFIMOV ALEXEY A.¹МЫЛЬНИКОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ¹MYLNIKOV DMITRY A.¹ХАБАРОВ КИРИЛЛ МИХАЙЛОВИЧ¹KHABAROV KIRILL M.¹АРСЕНОВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ¹ARSENOV PAVEL V.¹САПРЫКИН ДМИТРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ²

dsaprykin@yandex.ru

SAPRYKIN DMITRY L.²

dsaprykin@yandex.ru

¹ Московский физико-технический институт
(государственный университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

² ЗАО «Научно-исследовательский институт электронного
специального технологического оборудования»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 1

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

² ESTO Co. JSC
bld. 1, 5 Georgievsky Ave., Zelenograd, Moscow, 124460,
Russian Federation

Разработаны принципы аэрозольной печати 3D-микроструктур, объединяющей процессы газоразрядного синтеза, аэрозольного осаждения и локального лазерного спекания массивов наночастиц в едином технологическом цикле. Лазерное спекание микроструктур реализуется в широком окне скоростей процесса от 0,01 до 4 мм/с и позволяет согласовывать процессы аэрозольного осаждения и спекания наночастиц на подложках.

Ключевые слова: печатная электроника; аэрозольная печать; локальное лазерное спекание; электронная компонентная база; 3D-микроструктуры; наночастицы.

The paper highlights the principles of aerosol printing of 3D-microstructures, combining the processes of gas-discharge synthesis, aerosol deposition and local laser sintering of nanoparticle arrays in a single technological cycle. Laser sintering of microstructures is realized in a wide window of process speeds from 0.01 to 4 mm/s and allows coordinating the processes of aerosol deposition and sintering of nanoparticles on substrates.

Keywords: printed electronics; aerosol printing; local laser sintering; electronic components base; 3D-microstructures; nanoparticles.

Для большого ряда изделий микроэлектроники с масштабom структур в микронном диапазоне размеров оказалось многократно экономичней отказаться от литографических технологий и развивать технологии печатной электроники, использующие прямую доставку материалов для формирования микроструктур методами печати. Такие методы являются более производительными, дешевыми и содержат меньше стадий. На старте развития печатной электроники использовались ранее известные технологические решения, основанные на процессах струйной печати или методах трафаретной печати чернилами на основе

функциональных материалов, которые достигли высокого уровня развития [1].

В настоящее время наиболее перспективной развивающейся технологией в печатной электронике является технология аэрозольной печати, основанной на селективном осаждении на подложку аэродинамически сфокусированных пучков наночастиц. В первой реализации технологии наночастицы осаждаются в виде микрокапель из дисперсии наночастиц (чернил) [2]. Аэрозольная печать позволяет формировать на подложке функциональные микроструктуры с минимальной шириной линии

порядка 10 мкм, что значительно ниже, чем, например, с помощью технологий струйной (20–30 мкм) и трафаретной (50 мкм) печати. Аэрозольная печать позволяет создавать микроструктуры на искривленных поверхностях, 3D-межсоединения электронных компонентов, транзисторы [3], гибкие дисплеи [4], многослойные керамические конденсаторы [5], биологические сенсоры [6] и другие элементы.

В последнее время [7] был предложен новый подход в аэрозольной печати без использования чернил, базирующийся на применении в качестве источника наночастиц газоразрядного генератора аэрозолей. Наночастицы синтезируются непосредственно перед использованием в импульсно-периодических процессах электрического разряда в проточном газе между электродами из требуемого материала. Аэрозольный поток наночастиц фокусируется и доставляется на обрабатываемую поверхность, частицы осаждаются в сухой форме без растворителя.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются положения и результаты в развитии аэрозольной печати, благодаря которым процессы осаждения и монолитизации структур из наночастиц осуществляются в едином технологическом цикле с использованием лазерного излучения, обеспечивающего локальное лазерное спекание массива наночастиц без перегрева подложки. Сильной стороной данного подхода является совмещение в едином устройстве трех одновременно протекающих процессов: газоразрядного получения, локальной аэрозольной доставки и локального лазерного спекания наночастиц на подложке.

Совместную разработку аддитивной технологии и оборудования для формирования 3D-микроструктур электроники и фотоники на основе аэрозольной печати наночастицами с локальным лазерным спеканием проводят Московский физико-технический институт (государственный университет) совместно с промышленным партнером ЗАО «Научно-исследовательский институт электронного специального технологического оборудования». Технология включает реализуемые в едином устройстве составляющие процессы: генерацию наночастиц (с характерным размером порядка 10 нм) в импульсно-периодическом газовом разряде, формирование и фокусировку потока частиц на подложку в пятно размером порядка 25 мкм с использованием коаксиального аэродинамического сопла, монолитизацию массивов осаждаемых на подложке наночастиц посредством лазерного спекания при мощности излучения в диапазоне 0,5–100 Вт и трехмерное перемещение подложки с точностью позиционирования около 5 мкм.

Для реализации технологии в состав аэрозольного принтера входят: аэрозольный технологический модуль для получения и фокусировки потока наночастиц, лазерно-оптический технологический модуль для локального спекания массивов наночастиц на подложке, модуль защитной атмосферы для обеспечения процессов печати в бескислородной среде, координатно-кинематический модуль для осуществления взаимного перемещения и позиционирования рабочего инструмента и изделия в модуль управления. Новизна решений заключается в объединении процессов

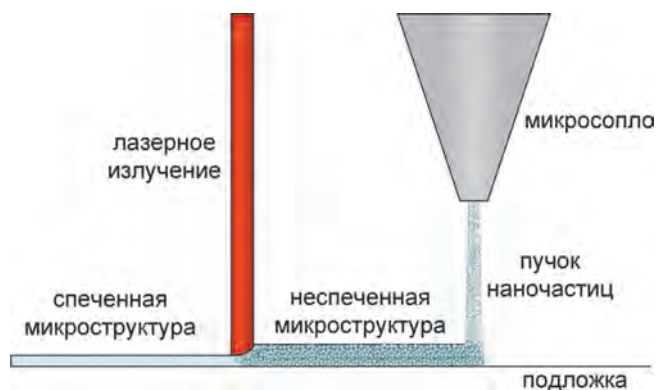


Рис. 1. Схема процесса аэрозольной печати с локальным лазерным спеканием для формирования функциональных микроструктур

доставки вещества (наночастиц) и энергии (лазерного излучения) в целях создания функциональных микрогабаритных компонентов и изделий на поверхности подложки.

Принципиальная схема функционирования аэрозольного принтера с локальным лазерным спеканием для формирования функциональных микроструктур представлена на рис. 1. Важной является реализация совместности скоростей двух процессов: доставки на подложку наночастиц через фокусирующее сопло и лазерное спекание массивов осажденных наночастиц. Характерный вид РЭМ-изображения поперечного сечения сформированной линии из спеченных наночастиц Ag демонстрируется на рис. 2а, и внешний вид такой линии в оптическом микроскопе — на рис. 2б. Сформированные микроструктуры из наночастиц Ag характеризуются малой шириной основания в диапазоне 30–100 мкм и имеют относительно низкое удельное электрическое сопротивление в диапазоне 7,5–30 мΩ·см, что является достаточным для многих применений, например для создания межсоединений, микронагревателей газовых сенсоров, микрополосковых антенн, датчиков скорости потока и др. Лазерное спекание таких линий реализуется при средней мощности импульсного лазерного излучения 0,5–1,5 Вт в широком окне скоростей процесса от 0,01 до 4 мм/с, что позволяет гибко синхронизировать процесс спекания с процессом аэрозольной доставки наночастиц на подложку.

Новая аэрозольная технология аддитивного формирования микрокомпонентов, изделий и материалов найдет широкое применение в электронной промышленности,

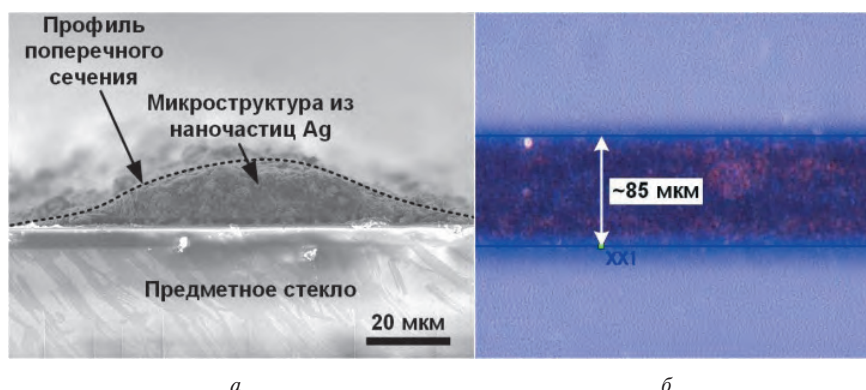


Рис. 2. Растровое электронное изображение профиля поперечного сечения (а) и оптическое изображение (б) микроструктуры из осажденных наночастиц Ag



точном машиностроении, энергетике, аэрокосмической, легкой и медицинской отраслях. Разрабатываемая технология, например, имеет перспективы использования для изготовления широкополосных 3D-микроантенн, токопроводящих пространственных межсоединений, нагревателей и чувствительных слоев, газовых микросенсоров, гибких электронных структур, токоведущих матриц дисплеев и солнечных батарей, а также активных (транзисторы, диоды) и пассивных (резисторы, конденсаторы) электронных компонентов.

Ожидаемыми социально-экономическими эффектами от разрабатываемой технологии будут снижение материалоемкости производства, уменьшение отрицательного техногенного воздействия на окружающую среду, а также кратное уменьшение себестоимости и сроков изготовления электронных компонентов.

*Работа выполнена при поддержке
Министерства образования и науки
Российской Федерации (RFMEFI57517X0160).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Cui Z. Introduction, in: Printed Electronics. John Wiley & Sons, Singapore Pte. Ltd, 2016. P. 1–20.
2. Seifert T., Baum M., Roscher F., Wiemer M. and Gessner T. *Aerosol Jet Printing of Nano Particle Based Electrical Chip Interconnects* // Mater. Today Proc.: nanoFIS 2014 — Functional Integrated nanoSystems, 2, 2015. P. 4262–4271.
3. Jones C.S., Lu X., Renn M., Stroder M. and Shih W.-S. *Aerosol-jet-printed, high-speed, flexible thin-film transistor made using single-walled carbon nanotube solution* // Microelectron. Eng., Materials for Advanced Metallization: 2009 Proceedings of the eighteenth European Workshop on Materials for Advanced Metallization, 87, 2010. P. 434–437.
4. Yang C., Zhou E., Miyanishi S., Hashimoto K. and Tajima K. *Preparation of Active Layers in Polymer Solar Cells by Aerosol Jet Printing* // ACS Appl. Mater. Interfaces, 3, 2011. P. 4053–4058.
5. Folgar C.E., Suchicital C. and Priya S. *Solution-based aerosol deposition process for synthesis of multilayer structures* // Mater. Lett., 65, 2011. P. 1302–1307.
6. Grunwald I., Groth E., Wirth I., Schumacher J., Maiwald M., Zoellmer V. and Busse Matthias. *Surface biofunctionalization and production of miniaturized sensor structures using aerosol printing technologies* // Biofabrication, 2, 2010. 14106 p.
7. Efimov A.A., Potapov G.N., Nisan A.V. and Ivanov V.V. *Controlled focusing of silver nanoparticles beam to form the microstructures on substrates* // Results Phys., 7, 2017. P. 440–443.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 2600 руб.

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА. ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ, БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРЯМОЕ ЦИФРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер

при поддержке Департамента станкостроения и инвестиционного машиностроения Минпромторга России

Книга посвящена новейшим технологиям, которые дают возможность на основе данных о виртуальных моделях твердых тел изготавливать физические модели в результате быстрых и легких производственных процессов. Авторы книги — признанные специалисты в области аддитивных технологий, имеющие многолетний опыт работы и исследований. Второе издание существенно переработано и дополнено, новая информация включена в дополнительные разделы и главы.

Разработчики АП и представители промышленности найдут полезные сведения в этой книге, поскольку она поможет понять состояние дел в отрасли и укажет возможности для дальнейших исследований. Издание предназначено также для преподавателей, студентов и аспирантов, изучающих аддитивное производство, может быть использовано в качестве автономного курса или как модуль в большой программе по технологии производства.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — 656 с.
ISBN 978-5-94836-447-6

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru