

Сухая аэрозольная печать наночастицами металлов и оксидов с
управляемыми размерами

В.В. Иванов, К.М.Хабаров, М.Нуралдин, А.А.Лизунова, О.В.Серая, Э.М. Филалова

*Московский физико-технический институт, Россия, 141700 Долгопрудный,
Институтский пер., 9*

Dry aerosol printing with size-controlled metal and oxide nanoparticles

V.V. Ivanov, K.M. Khabarov, M. Nouraldeen, A.A.Lizunova, O.V.Seraya, E.M. Filalova

*Moscow Institute of Physics and Technology, Russia, 141700 Dolgoprudny,
Institutskiy per.,9*

e-mail: ivanov.vv@mipt.ru

doi 10.26201/ISSP.2022/FC.4

Предложен оригинальный подход в аэрозольной печати без использования чернил, базирующийся на применении в качестве источника наночастиц газоразрядного источника аэрозолей [1]. 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.

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. 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, модуль управления. Новизна решений заключается в объединении процессов доставки вещества (наночастиц) и энергии (лазерного излучения) с целью создания функциональных микро-размерных компонентов на поверхности подложки.

В последние 20 лет многими исследователями разрабатывается метод синтеза наночастиц в импульсно-периодическом газовом разряде, позволяющий получать первичные наночастицы с характерными размерами менее 10 нм. Синтез наночастиц происходит в результате испарения и конденсации электродного материала в процессах импульсного газового разряда в межэлектродном промежутке. Используя электроды из разных проводящих материалов, возможно получать наночастицы металлов, сплавов, полупроводников и их оксидов [2]. Представляется развитие данного метода в направлениях получения наночастиц с высокой энергетической эффективностью, что крайне актуально для использования наночастиц в новых решениях при создании устройств и технологий в электронике и энергетике. Ценность импульсного газоразрядного метода особенно высока для синтеза наночастиц без оксидных модификаций, который происходит в атмосфере чистого аргона [3]. Установлено, что получение неокисленных наночастиц реализуется в импульсно-периодическом газовом разряде при концентрации остаточного кислорода в газовой атмосфере тем меньшей, чем больше энтальпия окисления материала

электрода.

Изучено взаимодействие импульсного наносекундного лазерного излучения с потоком аэрозольных дендритоподобных агломератов металлических наночастиц. В потоке газа частицы представляют собой пространственно-разделенные объекты: их взаимодействие друг с другом и с потенциальными конденсированными средами незначительно. Поглощаемая ими энергия расходуется на нагревание и дальнейшую модификацию с изменением формы и размера. Продемонстрировано, что энергия импульса и эффективность поглощения частиц сильнее влияют на результат спекания в сравнении с частотой следования импульсов.

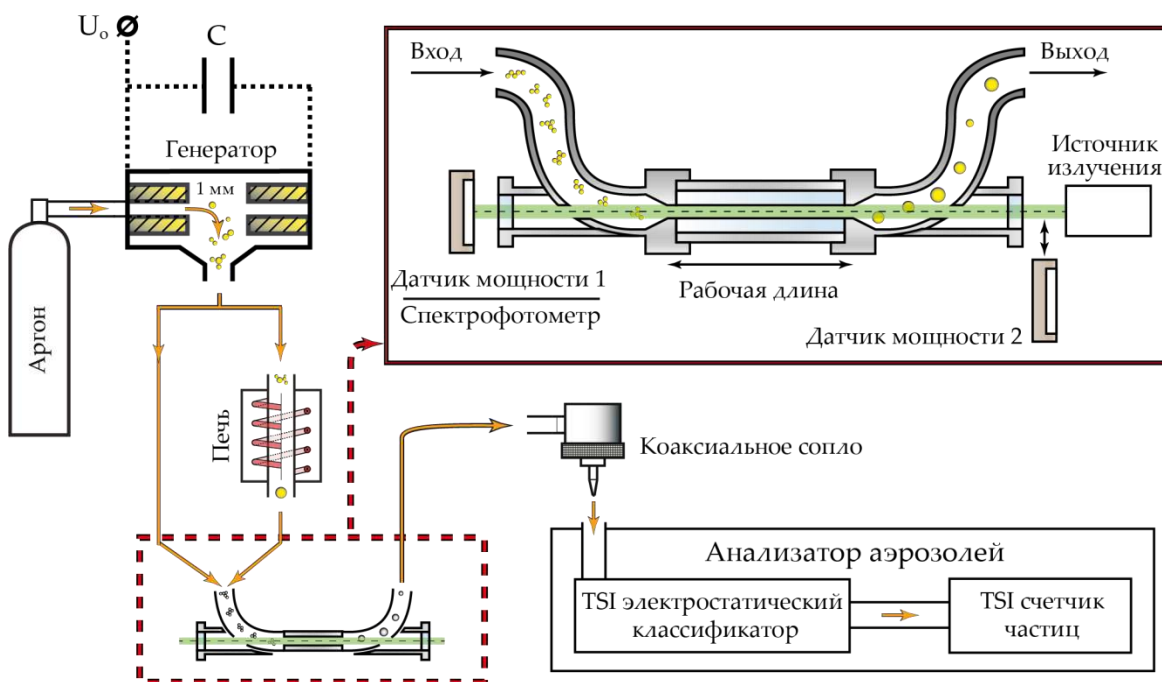


Рисунок 1. Схема аэрозольного принтера: на вставке приведено схематическое изображение ячейки лазерной модификации, совмещающей аэрозольный поток и оптическое излучение, которым опционально может быть лазерное излучение или источник белого света.

В потоке газа исследованы процессы лазерного спекания аэрозольных агломератов наночастиц платины (Pt), золота (Au) и серебра (Ag), полученных в импульсном газовом разряде, под действием наносекундного импульсно-периодического лазерного излучения с длиной волны 1053 нм при плотности энергии импульса, регулируемой в диапазоне до 13 мДж/см^2 , и частотах следования импульсов 50 и 500 Гц [4,5].

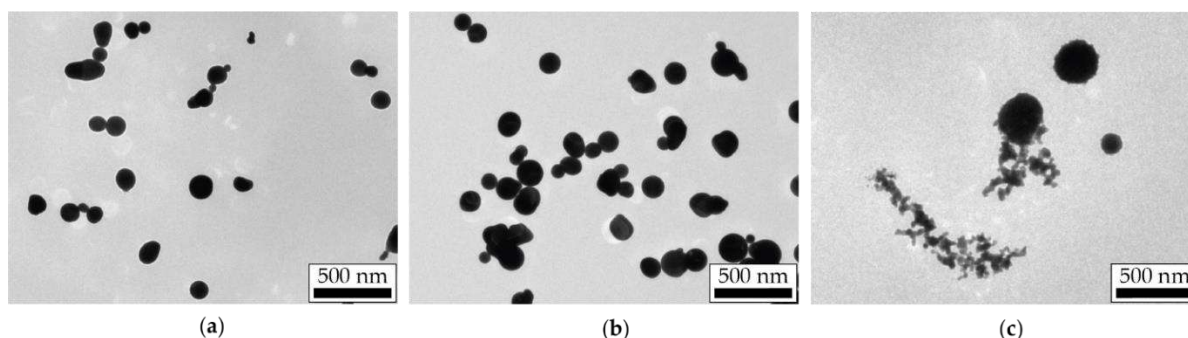


Рисунок 2. ПЭМ изображения агломератов платиновых (а), золотых (б) и серебряных наночастиц (в), модифицированных лазерным излучением с длиной волны 1053 нм с максимальной плотностью энергии на частоте повторения импульсов 500 Гц при расходе аэрозоля 50 мл/мин .

Полная модификация агломератов первичных наночастиц с размерами 150 - 300 нм с их превращением в отдельные сферические наночастицы достигнута только для Pt и Au при плотностях энергии выше 3,5 и 7 мДж/см², соответственно. При этом, Ag наночастицы, обладающие наименьшим коэффициентом экстинкции в ИК области, полностью не модифицируются (Рис. 2). Получены кривые лазерной усадки агломератов наночастиц трех металлов в зависимости от плотности энергии лазерного импульса (Рис.3). Предложена модель, объясняющая процессы усадки агломератов наночастиц особенностями оптического поглощения нанокристаллами разных размеров. Показано, что лазерная Au и Ag модификация идет по двухступенчатому процессу, тогда как Pt по одноступенчатому.

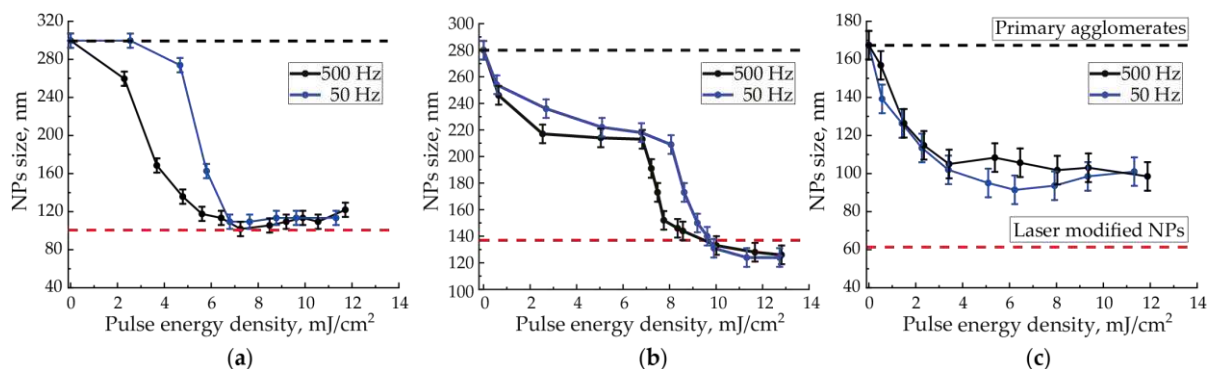


Рисунок 3. Зависимости размера платиновых (а), золотых (b) и серебряных (с) наночастиц на выходе из фокусирующего сопла после ячейки лазерной модификации от энергии импульса лазерного излучения с длиной волны 1053 нм при частотах следования импульса 50 и 500 Гц и расходе аэрозоля 50 мл/мин.

Новая аэрозольная технология аддитивного формирования микрокомпонентов и тонких слоев наночастиц с управляемыми размерами имеет перспективы применений в микроэлектронике, аэрокосмической и медицинской отраслях, и также в водородной энергетике, в частности, для печати каталитических, электродных и электролитических слоев в топливных элементах, электролизерах и топливных процессорах.

Литература

- [1] A.A. Efimov, G.N. Potapov, A.V. Nisan, and V.V. Ivanov, “Controlled focusing of silver nanoparticles beam to form the microstructures on substrates”, *Results Phys.*, N7, pp. 440–443 (2017).
- [2] D. Mylnikov, A. Efimov, V. Ivanov, “Measuring and Optimization of Energy Transfer to the Interelectrode Gaps during the Synthesis of Nanoparticles in a Spark Discharge”, *Aerosol Science and Technology*, vol.53, pp.1393–1403 (2019).
- [3] K. Khabarov, M. Urazov, A. Lizunova, E. Kameneva, A. Efimov, V. Ivanov, “Influence of Ag Electrodes Asymmetry Arrangement on Their Erosion Wear and Nanoparticle Synthesis in Spark Discharge”, *Appl. Sci.*, N11, p.4147 (2021).
- [4] K. Khabarov, M. Nouraldeen, S. Tichonov, A. Lizunova, A. Efimov, V. Ivanov, “Modification of Aerosol Gold Nanoparticles by Nanosecond Pulsed-Periodic Laser Radiation”, *Nanomaterials*, N11, p.2701 (2021).
- [5] K. Khabarov, M. Nouraldeen, S. Tikhonov, A. Lizunova, O. Seraya, E. Filalova, V.Ivanov, “Comparison of Aerosol Pt, Au and Ag Nanoparticles Agglomerates Laser Sintering”, *Materials*, N15, p.227 (2022).