

УДК 621.315:533.5

Вакуум как континуальная среда, формирующая энергетические неоднородности с высокой плотностью энергии в жидкой фазе

© 2022 г. В. В. Слепцов, А. О. Дителева✉, Д. Ю. Кукушкин,
Р. А. Цырков, Е. О. Дителева

*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: anna.diteleva@mail.ru

Аннотация. Изучен метод формирования наночастиц металлов в локализованном объеме с высокой плотностью энергии за счет протекания импульсного электрического разряда и эффекта кавитации. Рассмотрен механизм формирования энергетических неоднородностей, который обеспечивает генерацию наночастиц с высокой удельной энергоемкостью. Формирование динамической неоднородности осуществляется в три этапа. Происходит пробой межэлектродного пространства и формирование вакуумного объема, который заполняется парогазовой средой. В результате роста в пузырьке давления, зажигается импульсный газовый разряд, что приводит к генерации наночастиц металла. В результате возникает локализованный объем, в котором энергия в разряде достигает величины до 10^6 К. Рост энергии в пузырьке приводит к его схлопыванию и наночастицы металла переходят из среды с высокой энергией (10^6) в воду при комнатной температуре, что приводит к их закаливанию. Получаются особо чистые наночастицы различных металлов размером 5—15 нм, которые можно выращивать на монокристаллической поверхности кремния при комнатной температуре и позиционировать их на поверхность пористых материалов и изделий сложной конфигурации.

Ключевые слова: энергетические неоднородности, наночастицы металлов, генерация наночастиц, электроимпульсная технология, позиционирование наночастиц, углеродная матрица

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Российской Федерацией в лице Минобрнауки России соглашение № 075–15–2020–770.

Для цитирования: Слепцов В.В., Дителева А.О., Кукушкин Д.Ю., Цырков Р.А., Дителева Е.О. Вакуум как континуальная среда, формирующая энергетические неоднородности с высокой плотностью энергии в жидкой фазе. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2022; 25(2): 146—153. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-146-153>

Vacuum as a continuum medium forming energy inhomogeneities with high energy density in the liquid phase

V. V. Sleptsov, A. O. Diteleva✉, D. Yu. Kukushkin, R. A. Tsytkov, E. O. Diteleva

*Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe Highway, Moscow 125993, Russian Federation*

✉ Corresponding author: anna.diteleva@mail.ru

Abstract. A method for the formation of metal nanoparticles in a localized volume with a high energy density due to the flow of a pulsed electric discharge and the effect of cavitation has been studied. The mechanism of formation of energy inhomogeneities, which provides the generation of nanoparticles with high specific energy intensity, is considered. The formation of dynamic heterogeneity is carried out in three stages. There is a breakdown of the interelectrode space and the formation of a vacuum volume, which is filled with a vapor–gas medium. As a result of an increase in pressure in the bubble, a pulsed gas discharge is ignited, which leads to the generation of metal nanoparticles. As a result, there is a localized volume in which the energy in the discharge reaches a value of up to 10^6 K. The growth of energy in the bubble leads to its collapse and metal nanoparticles pass from a medium with high energy (10^6) into water at room temperature, which leads to their hardening. Particularly pure nanoparticles of various metals with a size of 5–15 nm are obtained, which can be grown on a single-crystal silicon surface at room temperature and positioned on the surface of porous materials and products of complex configuration.

Acknowledgment: The study was carried out with the financial support of the project by the Russian Federation represented by the Ministry of Education and Science of Russia, agreement No. 075–15–2020–770.

Keywords: energy inhomogeneities, metal nanoparticles, generation of nanoparticles, electric pulse technology, positioning of nanoparticles, carbon matrix

For citation: Sleptsov V.V., Diteleva A.O., Kukushkin D.Yu., Tsytkov R.A., Diteleva E.O. Vacuum as a continuum medium forming energy inhomogeneities with high energy density in the liquid phase. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(2): 146–153. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-146-153>

Введение

Наночастицы разных материалов в настоящее время активно используют в различных областях науки и техники. Это связано с тем, что они обладают размерными и квантово–размерными свойствами существенно отличными от массивных материалов. Высокая, по сравнению с массивными материалами, энергоёмкость, не линейные оптические и электрофизические характеристики, возможность получать материалы с высоко диэлектрической проницаемостью (10^7 – 10^9), уникальная биоактивность и в ряде случаев, селективность воздействия, определяют широкий диапазон научного и практического использования в микроэлектронике и нанобиотехнологии. Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений научных исследований является область изучения свойств наноразмерных частиц. Это связано с тем,

что открылись новые перспективные возможности использования наноматериалов во многих областях науки и техники, в частности для получения эффективных и избирательных катализаторов, для создания элементов микроэлектронных и оптических устройств, эффективных накопителей электрической энергии, биотехнологий и для синтеза новых материалов с уникальными характеристиками недостижимыми для массивных материалов. На сегодняшний день существует множество способов формирования металлических наночастиц. Большинство методов основано на химических процессах формирования наночастиц металлов, в которых необходимо для каждого материала подбирать или разрабатывать исходные компоненты, составляющие которых, могут присутствовать в конечном продукте и существенно влиять на свойства получаемых материалов. Кроме того, химическими методами синтеза в жидкой среде

сложно получать наночастицы сплавов. Поэтому актуальной и своевременной является разработка унифицированного, физического, электроимпульсного метода синтеза наночастиц металлов в жидкой диэлектрической среде из исходно чистого металла, исследование их свойств и возможности обработки поверхности твердого тела наночастицами металлов, включая обработку порового пространства материалов с высокой удельной поверхностью (более $1000 \text{ м}^2/\text{г}$).

Целью работы является создание реактора, в котором протекают процессы с высокой энергонасыщенностью.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Сформировать теоретические положения, на основе которых можно определить направление поиска.
2. Рассмотреть механизмы подвода энергии к системе и результаты ее воздействия.
3. Оценить практическую реализацию в настоящее время и в перспективе.

Теоретические положения, на основе которых можно определить направление поиска

Теоретической базой, используемой для создания локализованных, энергоемких объемов, являются последние достижения науки о свойствах динамических неоднородностях. Динамическая неоднородность представляет собой локальный объем на поверхности или внутри среды с отличными от ее окружения свойствами, которая не имеет внутри себя статических неоднородностей и генерируется в результате определенных физико-химических процессов. Динамическая неоднородность может быть локализована или может перемещаться по рабочему объему континуальной среды в результате взаимодействия с различными физическими полями или динамическими не-

однородностями такой же или другой физической природы. В результате в локализованный объем закачивается энергия, которая существенно превышает энергию окружающей среды. Важным элементом такой энергетической однородностью является возможность ее существования в определенный промежуток времени. Континуальная среда является вторым элементом модели. Вообще говоря, она может иметь любое агрегатное состояние. В данной работе в качестве континуальной среды используется дистиллированная вода, в которой на начальном этапе процесса формируется вакуумный пузырек размером 100 мкм . Третьим элементом модели является генератор энергии, формирующий в континуальной среде динамические неоднородности. Рассмотрим ситуацию, когда материал находится под воздействием электрической энергии и вещества и переходит в состояние, далекое от термодинамического равновесия, в так называемый нелинейный режим. В нелинейном режиме термодинамические потоки J_a не являются больше линейными функциями термодинамических сил F_a . В результате состояния, далекие от равновесия, могут терять свою устойчивость и переходить к одному из возможных новых состояний [1]. В связи с тем, что базовым явлением, возникающим на нано размерном уровне, является нарушение электронейтральности, то в первую очередь нас будут интересовать влияние электрического поля на соответствующую континуальную среду и механизм диссипации электрической энергии при их взаимодействии.

Механизмы подвода энергии к системе и результаты ее воздействия

Принцип действия установки для генерации наночастиц металлов за счет формирования напряжения с наносекундным временем нарастания в разрядном промежутке, расположенном

в дистиллированной воде показан на рис. 1. В данной конструкции используется схема на базе специально сконструированного неуправляемого воздушного разрядника P с плоскими электродами и межэлектродным расстоянием $d \approx 1 \text{ мм}$ и разрядной камеры KP с вращающимися электродами с межэлектродным расстоянием $\sim 100 \text{ мкм}$.

Высоковольтный блок питания Sh-0105 обеспечивает требуемый для работы

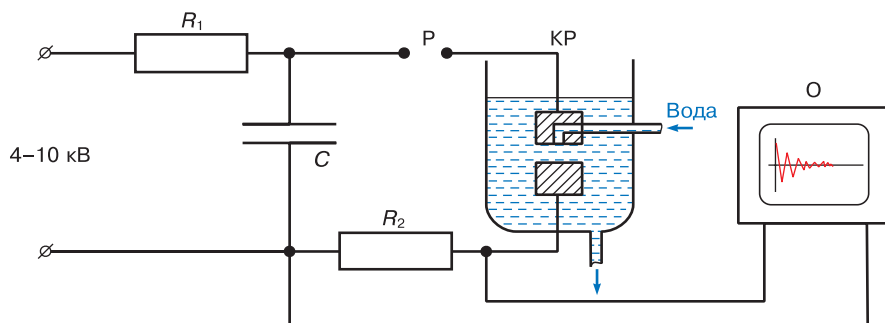


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема установки генерирования наночастиц металла при пробое в дистиллированной воде:

C — высоковольтный конденсатор 15 кВ ; P — разрядник воздушный (высоковольтный коммутатор); O — осциллограф; KP — камера разрядная; R_2 — измерительный резистор; R_1 — балластный резистор

Fig. 1. Schematic diagram of the installation for generating metal nanoparticles during a breakdown in distilled water: C is high-voltage capacitor 15 кВ ; P is air arrester (high-voltage switch); O is oscilloscope; KP is discharge chamber; R_2 is measuring resistor; R_1 is ballast resistor

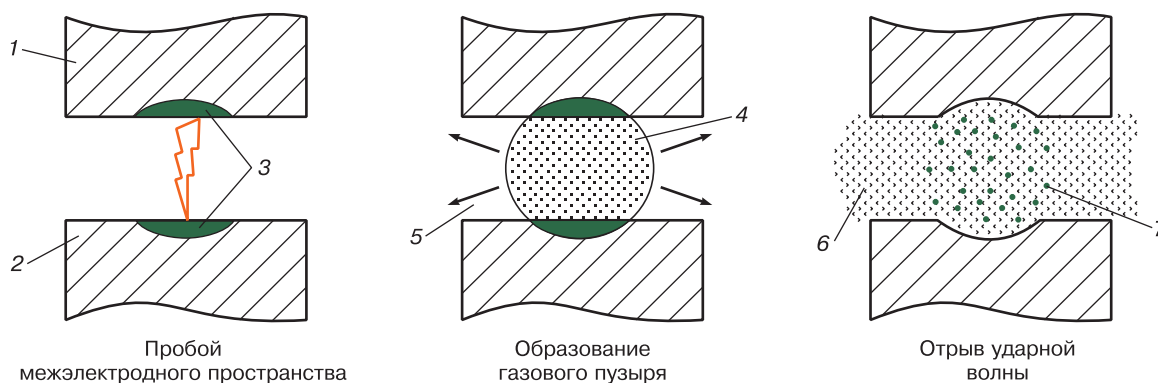


Рис. 2. Принципиальная схема формирования динамической неоднородности:

1, 2 — электроды; 3 — расплавленный металл электродов; 4 — пары жидкости и металла; 5 — направление распространения ударной волны; 6 — наночастицы металла; 7 — микрочастицы металла

Fig. 2. Schematic diagram of the formation of dynamic inhomogeneity: (1), (2) electrodes; (3) molten metal of electrodes; (4) vapors of liquid and metal; (5) direction of propagation of the shock wave; (6) metal nanoparticles; (7) metal microparticles

реактора диапазон напряжений 4—10 кВ. При достижении заданного на высоковольтном коммутаторе Р пробивного напряжения, через электродную систему, помещенную в рабочую жидкость, возникает искровой разряд, вызывая их эрозию. Емкость конденсатора С подбирается в зависимости от конструкции электродов и требуемого режима работы реактора. Напряжение пробоя определяется зазором между рабочими электродами и регулировкой воздушного разрядника Р.

На рис. 2 показана схема формирования динамической неоднородности в виде парогазового пузырька в котором зажигается импульсный разряд в межэлектродном промежутке 1–2.

Формирование динамической неоднородности происходит в три этапа, каждый из которых сопровождается фазовым переходом. На первом этапе происходит пробой межэлектродного пространства и формируется вакуумный объем, который заполняется парогазовой средой. Происходит первый фазовый переход. Затем, в результате роста в пузырьке давления, зажигается импульсный газовый разряд, что приводит к генерации наночастиц металла. Второго фазовый переход. В результате возникает локализованный объем, в котором энергия в разряде достигает величины до 10^6 К [2, 3].

Рост энергии в пузырьке приводит к его схлопыванию и наночастицы металла переходят из среды с высокой энергией (10^6) в воду при комнатной температуре, что приводит к их закаливанию. При схлопывании пузырька возникает кавитация, которая обеспечивает рост кинетической энергии наночастиц [4].

Импульсный электрический разряд происходит в единичном газовом пузырьке, который возникает в межэлектродном промежутке при прохождении

электрического тока между электродами. Возникает импульсный разряд в момент формирования газового пузырька, а заканчивается в момент его схлопывания. В связи с этим, миллисекундные импульсы, поступающие на разрядный промежуток, разбиваются на микросекундные с крутым наносекундным фронтом (рис. 3) [5].

Основные характеристики электрического импульса. Рабочее напряжение 5—10 кВ. Частота следования первичных импульсов 100 Гц, амплитуда импульса тока 0,5—5 кА.

Исследования свойств наночастиц и примеры практической реализации в настоящее время и в перспективе

Химический состав полученных коллоидных растворов серебра и железа определялся методом рентгеноспектрального анализа на приборе Zeiss Evo 40. Исследования показали отсутствие сколько-нибудь существенного содержания случайных примесей в этих растворах (рис. 4) [5—7].

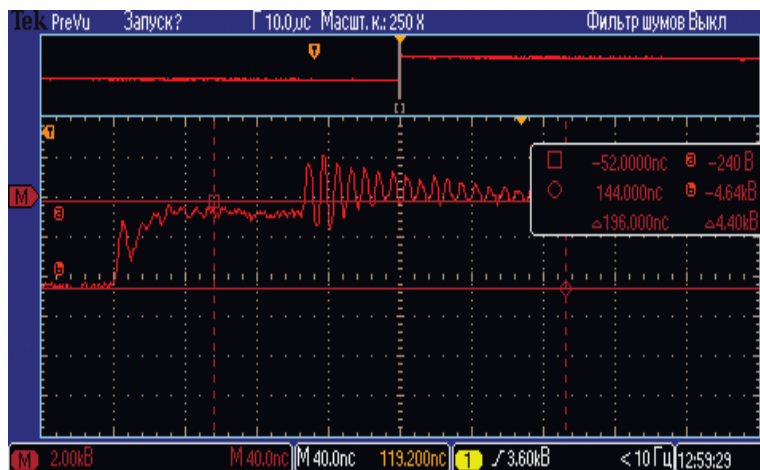


Рис. 3. Осциллограмма импульса напряжения, формируемого при срабатывании воздушного разрядника

Fig. 3. Oscillogram of the voltage pulse formed when the air discharger operates

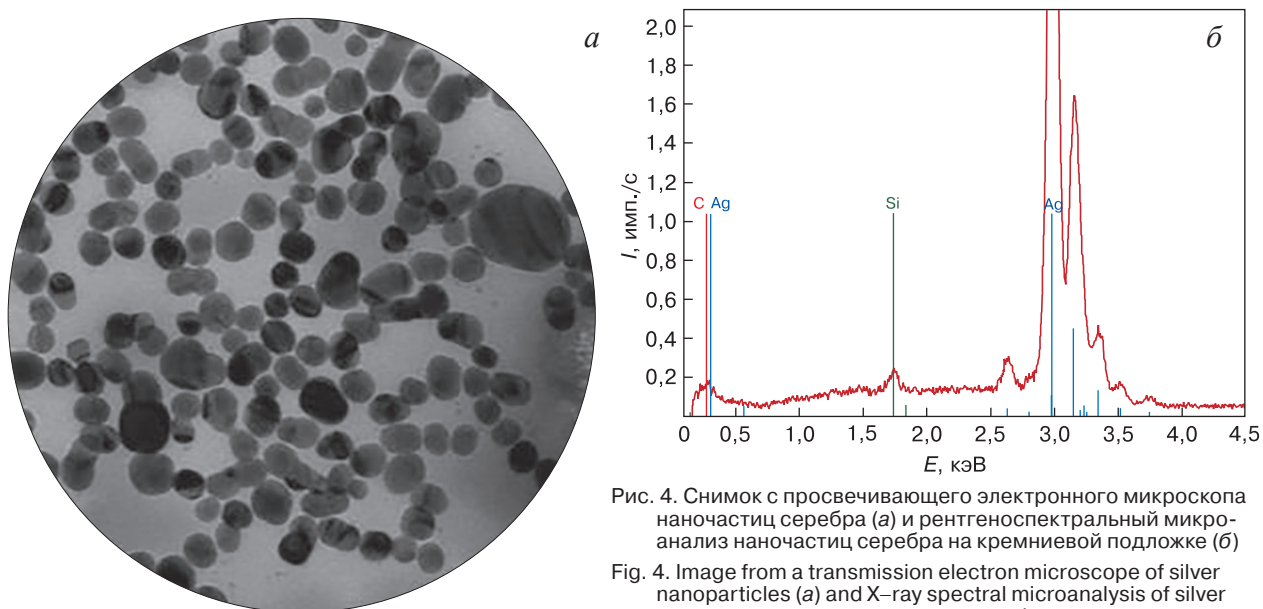


Рис. 4. Снимок с просвечивающего электронного микроскопа наночастиц серебра (а) и рентгеноспектральный микроанализ наночастиц серебра на кремниевой подложке (б)

Fig. 4. Image from a transmission electron microscope of silver nanoparticles (a) and X-ray spectral microanalysis of silver nanoparticles on a silicon substrate (b)

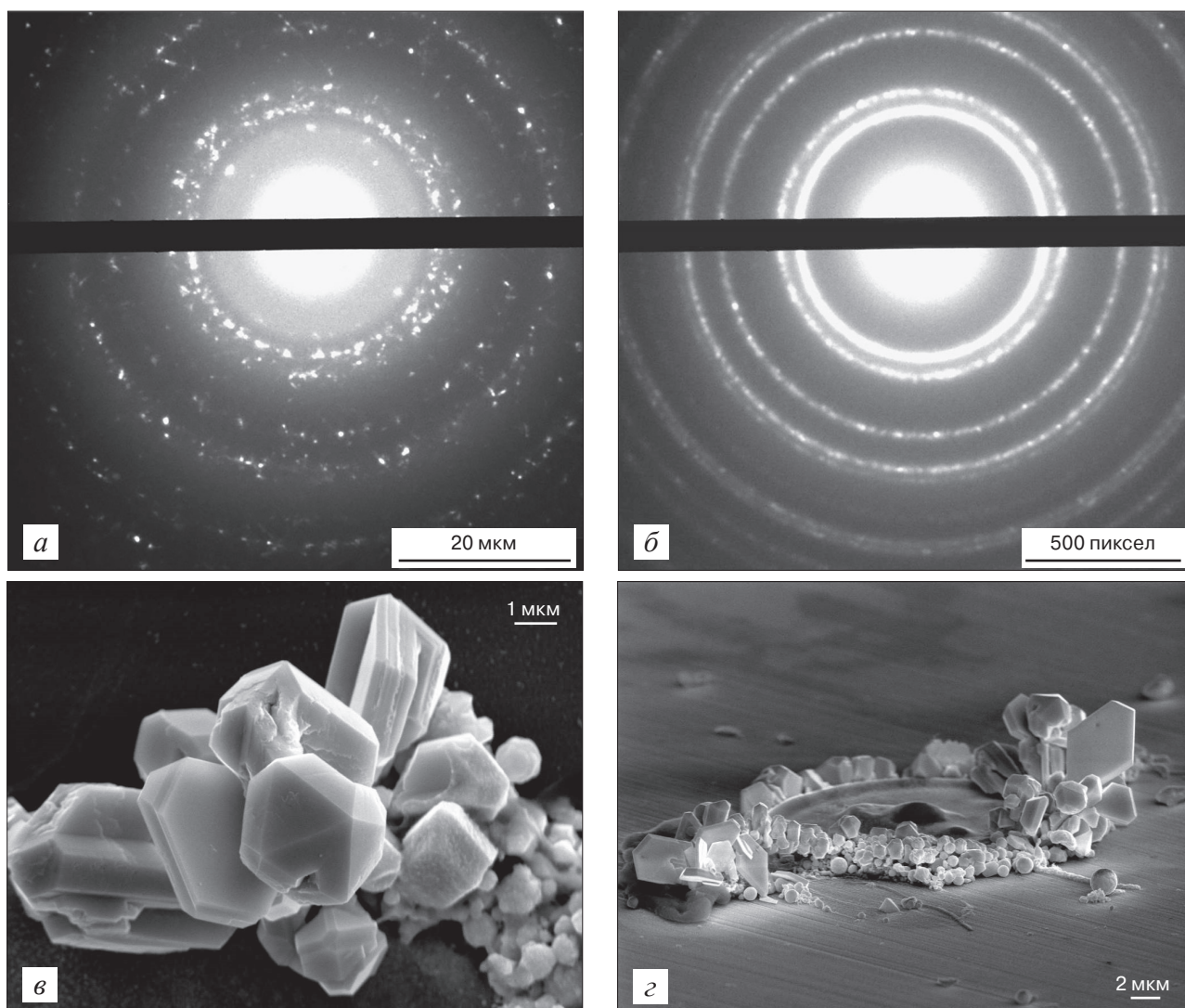


Рис. 5. Электронограммы исходных наночастиц серебра (а) и массивного образца кристаллического серебра (б); в, г — изображение с электронного микроскопа монокристаллов серебра, выращенных на монокристаллическом кремнии на границе с пленкой меди

Fig. 5. Electron diffraction patterns of the initial silver nanoparticles (a) and a bulk sample of crystalline silver (б); (в, г) electron microscope image of silver single crystals grown on single crystal silicon at the interface with a copper film

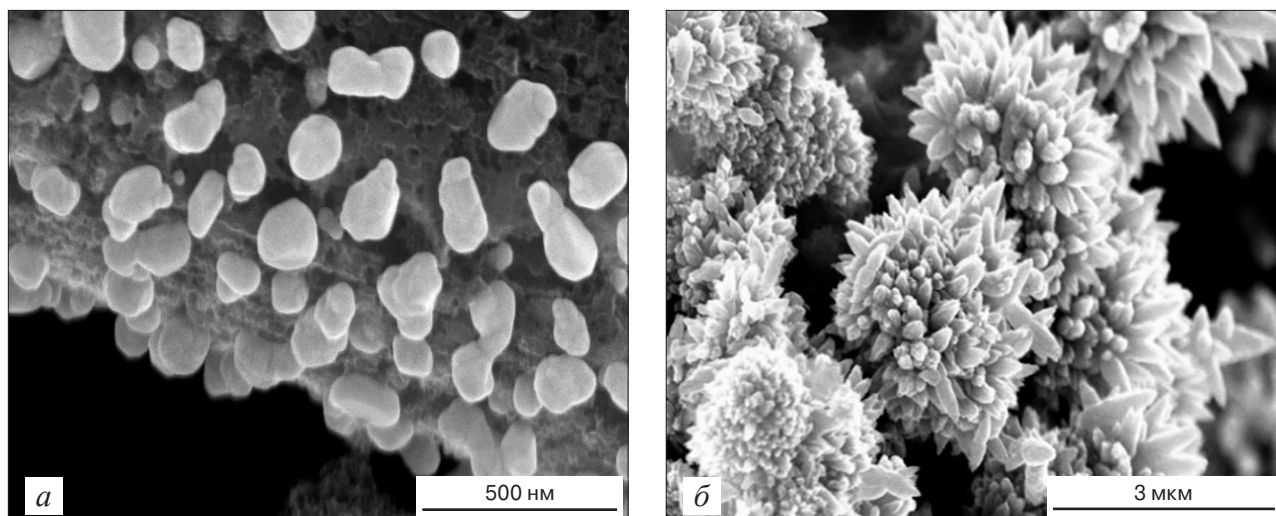


Рис. 6. Покрывание из наночастиц серебра (а) и цинка (б) на поверхности углеродной матрицы
Fig. 6. Coating of (a) silver and (b) zinc nanoparticles on the surface of a carbon matrix

Из микрофотографий следует, что частицы имеют форму, близкую к сферической. Из электронограммы, представленной на рис. 5, а и б и ее сопоставления с электронограммой массивного образца кристаллического серебра следует, что наночастицы состоят из кристаллического серебра, без заметной примеси оксидов солей. Фотографии кристаллов, образующихся на поверхности кремниевых подложек, помещенных в гидрозоль серебра, в том числе зарождающихся на границе «кремний — металл» представлены на рис. 5, в и г. Для этого образцы, представленные ниже, выдерживались в растворе серебра 10 ч, после чего отдавались на рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию и элементный анализ (см. рис. 5) [5, 6].

Приведенные результаты позволяют говорить о принципиальной возможности формирования монокристаллов серебра на монокристалле кремния при комнатной температуре, что может най-

ти применение в технологии наноэлектроники и фотоники.

Следующая технология основана на эффекте кавитации, который возникает в зоне формирования наночастиц в процессе схлопывания парогазового пузырька [8]. В результате возникает мощный электрогидравлический импульс, который обеспечивает направленное движение наночастиц, что обеспечивает создание технологии получения наночастиц и позиционирование их на поверхность твердого тела в едином технологическом цикле. Под воздействием акустических волн, содержащиеся в растворе наночастицы проникают в материал и закрепляются в нем за счет ударно-волновой природы кавитации. На рис. 6, а представлен результат нанесения островковых пленок серебра на углеродную ткань с высоко удельной поверхностью (более $1000 \text{ м}^2/\text{г}$). Помимо островковых пленок серебра, тонких гладких

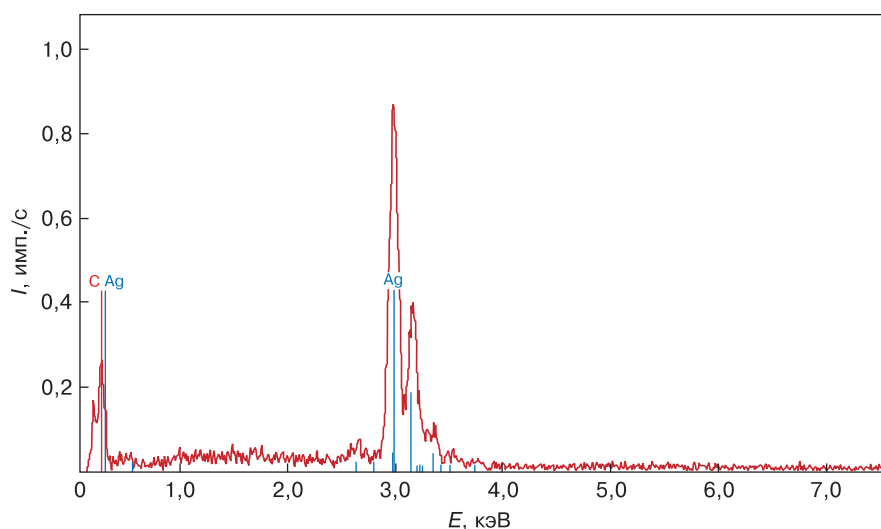


Рис. 7. Рентгеноспектральный микроанализ модифицированной наночастицами серебра углеродной нити материала типа «Бусофит»

Fig. 7. X-ray spectral microanalysis of a carbon fiber modified with silver nanoparticles of a material of the Busofit type

покрытий никеля данная технология позволяет получать покрытия с высокой удельной поверхностью из наночастиц цинка, что показано на рис. 6, б.

Исследование состава осаждаемых покрытий позволяет сделать вывод о отсутствии посторонних примесей в процессе формирования покрытия (рис. 7).

Достоинством данного метода является возможность получения особо чистых наночастиц различных металлов и позиционирование их на поверхность пористых материалов и изделий сложной конфигурации, а также резкое сокращение потерь материала, повышение скорости процесса и его автоматизация. Принципиальным достоинством рассмотренных методов нанесения тонких слоев является возможность промышленной реализации их в виде рулонных технологий.

Следует также обратить внимание на то, реактор в котором протекает процесс генерации наночастиц появляется в момент проведения процесса и затем формируется новый. Это означает, что при проведении процесса отсутствует проблема надежности и стабильности характеристик реакционного объема. При предварительной оценке температуры в пузырьке мы получили результат, который позволяет сделать предположение о значительной энерго насыщенности пузырька в сравнении с окружающей средой. Температур в пузырьке в начальный момент времени достигает 10^7 К, а при долговременной работе в течении более 5 мин начинает заметно снижаться. Было предположено, что это связано с тем, что уменьшается электрическое сопротивление воды в результате насыщения ее ионами и нано частицами металла. Экспериментальная проверка этого предположения подтвердила эту гипотезу. Поэтому с целью

дальнейшего роста энергоемкости локализованной энергетической неоднородности необходимо совершенствовать оборудование с целью получения первичного электрического импульса с более высокими характеристиками.

Заключение

Получены принципиальные результаты исследования процесса формирования наночастиц металлов в жидкой диэлектрической фазе и осаждения их на поверхность твердого тела. Показано, что монокристаллы серебра из наночастиц размером 5—15 нм можно выращивать на монокристаллической поверхности кремния при комнатной температуре осаждением их раствора. Механизм формирования четко не установлен, но можно сделать предположение, что в значительной степени это связано с большой внутренней энергией наночастиц, которые получают при температурах выше 10^6 К и затем мгновенно попадают в жидкость при комнатной температуре.

Исследованы два метода позиционирования наночастиц металлов на поверхность углеродной матрицы, которая имеет удельную поверхность $1000\text{—}1200\text{ м}^2/\text{г}$. Показана принципиальная возможность формирования покрытий на пористых материалах, которые одновременно могут существенно увеличивать поверхность исходного материала. Принципиальным достоинством рассмотренных методов является возможность их реализации в промышленных масштабах в виде рулонных технологий.

Показана перспектива развития электроимпульсной технологии в плане проведения высокоэнергетических процессов в локализованных микрообъемах.

Библиографический список

1. Щука А.А. Электроника / под ред. проф. А.С. Сигова. СПб.: БХВ-Петербург; 2005. 800 с.
2. Месяц Г.А., Проскуровский Д.Л. Импульсный электрический разряд. Новосибирск: Наука; 1984. 256 с.
3. Месяц Г.А. Эктонны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука; 2000. 424 с.
4. Мельников П.И., Макаренко В.Г., Макаренко М.Г. Достижение высоких температур при сжатии газового пузырька. Прикладная механика и техническая физика. 2004; 45(4): 13—25. <https://elibrary.ru/onmbwh>
5. Кукушкин Д.Ю. Разработка физико-технических основ электроимпульсного метода синтеза наночастиц металлов и сплавов в жидкой диэлектрической среде: дисс. канд. техн. наук. М., 2019. 149 с.
6. Криставчук О.В., Сохацкий А.С., Козловский В.И., Ской В.В., Куклин А.И., В.В. Трофимов, Слепцов В.В., Не-
чаев, А.Н., Апелъ П.Ю. Структурные характеристики и ионный состав коллоидного раствора наночастиц серебра, полученного методом электроискрового разряда в воде. Коллоидный журнал. 2021; 83(4): 423—435. <https://doi.org/10.31857/S0023291221040042>
7. Ostroukhov N.N., Tyanginskii A.Yu., Sleptsov V.V., Tserulev M.V. Electric discharge technology of production and diagnosis of metallic hydrosols with nanosized particles. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2014; 5(3): 284—288. <https://doi.org/10.1134/S2075113314030113>
8. Гоффман В. Г., Гороховский А.В., Бурте Э.П., Слепцов В.В., Горшков Н.В., Ковынева Н.Н., Викулова М.А., Никитина Н.В. Модифицированные титановые электроды для накопителей энергии. *Электрохимическая энергетика*. 2017; 17(4): 225—234. <http://doi.org/10.18500/1608-4039-2017-17-4-225-234>

References

1. Shchuka A.A. Electronics / ed. prof. A.S. Sigov. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2005. 800 p. (In Russ.)
2. Mesyats G.A., Proskurovsky D.L. Impulse electric discharge. Novosibirsk: Nauka; 1984. 256 p. (In Russ.)
3. Month G.A. Ectons in a vacuum discharge: break-down, spark, arc. M.: Nauka; 2000. 424 p. (In Russ.)
4. Mel'nikov P.I., Makarenko V.G., Makarenko M.G. Reaching high temperatures by compressing a vapor bubble. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2004; 45(4): 466—476. <https://elibrary.ru/fovool>
5. Kukushkin D.Yu. Development of physical and technical foundations of the electropulse method for the synthesis of nanoparticles of metals and alloys in a liquid dielectric medium: Diss. Cand. Sci. (Eng.). Moscow, 2019. 149 p. (In Russ.)
6. Kristavchuk O.V., Sohatsky A.S., Kozlovskiy V.I., Skoi V.V., Kuklin A.I., Trofimov V.V., Sleptsov V.V., Nechaev A.N., Apel' P.Yu. Structural characteristics and ionic composition of a colloidal solution of silver nanoparticles obtained by electrical-spark discharge in water. *Colloid Journal*. 2021; 83(4): 448—460. <https://doi.org/10.1134/S1061933X21040049>
7. Ostroukhov N.N., Tyanginskii A.Yu., Sleptsov V.V., Tserulev M.V. Electric discharge technology of production and diagnosis of metallic hydrosols with nanosized particles. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2014; 5(3): 284—288. <https://doi.org/10.1134/S2075113314030113>
8. Goffman V.G., Gorokhovskiy A.V., Burte E.P., Sleptsov V.V., Gorshkov N.V., Kovynova N.N., Vikulova M.A., Nikitina N.V. Modified titanium electrodes for energy storage. *Elektrokhimicheskaya energetika = Electrochemical Energetics*. 2017; 17(4): 225—234. (In Russ.). <http://doi.org/10.18500/1608-4039-2017-17-4-225-234>

Информация об авторах / Information about the authors

Слепцов Владимир Владимирович — доктор техн. наук, профессор, зав кафедрой радиоэлектроники, телекоммуникации и нанотехнологии; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1171-336X>; e-mail: 08fraktal@inbox.ru

Дителева Анна Олеговна — старший преподаватель, кафедра радиоэлектроники, телекоммуникации и нанотехнологии; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0819-6517>; e-mail: anna.diteleva@mail.ru

Кукушкин Дмитрий Юрьевич — канд. техн. наук, доцент, кафедра радиоэлектроники, телекоммуникации и нанотехнологии; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6968-1495>; e-mail: Skyline34@nxt.ru

Цырков Роман Александрович — ассистент, кафедра радиоэлектроники, телекоммуникации и нанотехнологии; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Российская Федерация

Дителева Елизавета Олеговна — студент, кафедра радиоэлектроники, телекоммуникации и нанотехнологии; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Российская Федерация

Vladimir V. Sleptsov — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Radio Electronics, Telecommunications and Nanotechnology; Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Highway, Moscow 125993, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1171-336X>; e-mail: 08fraktal@inbox.ru

Anna O. Diteleva — Senior Lecturer, Department of Radio Electronics, Telecommunications and Nanotechnology; Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Highway, Moscow 125993, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0819-6517>; e-mail: anna.diteleva@mail.ru

Dmitry Yu. Kukushkin — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Electronics, Telecommunications and Nanotechnology; Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Highway, Moscow 125993, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6968-1495>; e-mail: Skyline34@nxt.ru

Roman A. Tsyrov — Assistant, Department of Radio Electronics, Telecommunications and Nanotechnology; Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Highway, Moscow 125993, Russian Federation

Elizaveta O. Diteleva — Student, Department of Radio Electronics, Telecommunications and Nanotechnology; Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Highway, Moscow 125993, Russian Federation

Поступила в редакцию 28.04.2022; поступила после доработки 29.06.2022; принята к публикации 08.07.2022
Received 28 April 2022; Revised 29 June 2022; Accepted 8 July 2022

* * *