

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-147-168>

Лазерно- и магнетронно-модифицированные инжектирующие поверхности электродов для ЭГД-преобразователей

А. Е. Кузько¹ ✉, А. И. Жакин¹, А. П. Кузьменко¹, А. В. Кузько¹,
А. А. Прибылов¹, В. В. Юшин¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: kuzko@mail.ru

Резюме

Цель – изучить электрогидродинамические процессы зарядообразования в полиметилсилоксановом жидком теплоносителе между парой проволочных электродов с микро- и наноразмерно структурированными поверхностями после лазерного скрайбирования и магнетронного напыления.

Задачи. Установить режимы лазерного облучения и магнетронного напыления и создания развитых микро- и наноструктур на поверхности медных проволочных электродов и исследовать влияние морфологии поверхности электродов на вольт-амперные характеристики и электрогидродинамические процессы с парой проволочных электродов в диэлектрическом в полиметилсилоксановом жидком теплоносителе.

Методология. Методом лазерного скрайбирования проволочных медных электродов и последующего магнетронного нанесения на них магнетронных покрытий из Al, Cr, Ni, Pt, резистивной мишени и TiN создавалась развитая поверхность с микро- и наноразмерной структурой. Полученные поверхности электродов изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии до и после применения в специальной ячейке для исследования электрогидродинамических процессов. Особенности зарядообразования в низковольтном режиме анализировались по вольт-амперным характеристикам, измеренным с помощью пикоамперметра.

Результаты. Для катодов из медных проволочных электродов, скрайбированных лазерным излучением и покрытых магнетронным напылением, вольт-амперные характеристики обнаруживают нелинейный рост, описываемый косвенно в высоковольтной части автоэмиссионным механизмом электропроводности. Нелинейный рост начинается с начального участка.

Вывод. Электрические поля, локализованные на вершинах структур, дополнительно возникающих при магнетронном напылении на микро- и наноструктурах, аблированной лазерным излучением поверхности электродов, приводит к преобладающей униполярной инжекции электронов с катода подобно автоэмиссионному, что может использоваться в разработке электроконвективных систем высокой производительности.

Ключевые слова: инжекция зарядов; лазерное скрайбирование; наноструктурирование; электроды; электрическое поле; вольт-амперные характеристики.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (з/з 2020 № 0851-2020-0035) в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213).

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Лазерно- и магнетронно-модифицированные инжектирующие поверхности электродов для ЭГД-преобразователей / А. Е. Кузько, А. И. Жакин, А. П. Кузьменко, А. В. Кузько, А. А. Прибылов, В. В. Юшин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 3. С. 147–168. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-147-168>

Поступила в редакцию 23.06.2021

Подписана в печать 26.08.2022

Опубликована 28.09.2022

Laser- and Magnetron-Modified Injecting Surfaces of Electrodes for EHD Transducers

Andrey E. Kuzko¹ ✉, Anatoly I. Zhakin¹, Alexander P. Kuzmenko¹,
Anna V. Kuzko¹, Alexander A. Pribylov¹, Vasily V. Yushin¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: kuzko@mail.ru

Abstract

The purpose. The experimental detection of the effect of laser scribing and magnetron sputtering on the sign of charge formation of wire electrohydrodynamic electrode pairs immersed in a PMS-50 (polymethylsiloxane liquid coolant).

Objectives. Determination of laser irradiation modes leading to the most developed microstructures on the surface of copper wire electrodes. Investigation of the presence and distribution density of self-organized structures into groups of nanostructures under irradiation. Obtaining anisotropy of current-voltage characteristics for different variants of cathode-anode pairs.

Methodology. The surface of wire copper electrodes was modified by laser scribing on the FMark-20RL marking complex with a power density in a laser beam pulse of about $4,8 \cdot 10^9 \text{ W / cm}^2$ (with a pulse frequency of 100 kHz, a wavelength of 1060 nm). The surface structures of electrodes after treatment with a laser beam with a diameter of $\sim 80 \text{ }\mu\text{m}$ with a propagation step of 50–80 μm and obtained additionally by magnetron sputtering on a MVU TM Magna T setup were studied by scanning electron microscopy on a JEOL 6610V SEM. The peculiarities of charge formation from the obtained modified electrodes were investigated by the method of current-voltage characteristics (I-V) using a Keithley 6487 picoammeter and a high voltage source Mantigora NT-6000R.

Results. For cathodes made of copper wire electrodes scribbled by laser radiation and coated with magnetron sputtering, the current-voltage characteristics reveal a nonlinear growth, which is described indirectly in the high-voltage part by the field emission mechanism of electrical conductivity. Nonlinear growth starts from the initial site.

Conclusion. Electric fields localized at the tops of structures additionally arising during magnetron sputtering on micro- and nanostructures, the surface of electrodes ablated by laser radiation, leads to a predominant unipolar injection of electrons from the cathode, similar to field emission, which can be used in the development of high-performance electroconvective systems.

Keywords: surface topography; charge injection; laser scribing; nanostructures; electric field amplification factor; electroconvection; Fowler-Nordheim dependence.

Funding: The study was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (g/z 2020 No. 0851-2020-0035), as part of the strategic academic leadership program "Priority-2030" (Agreement No. 075-15-2021-1213).

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuzko A. E., Zhakin A. I., Kuzmenko A. P., Kuzko A. V., Pribylov A. A., Yushin V. V. Laser- and Magnetron-Modified Injecting Surfaces of Electrodes for EHD Transducers. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022; 12(3): 147–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-147-168>.

Received 23.06.2021

Accepted 26.08.2022

Published 28.09.2022

Введение

Нанопористые и наноструктурные материалы, нанокомпозиты и наноустройства, создаваемые с использованием наноразмерных трубчатых, стержневых и пленочных 2D и 3D-объектов, включая отдельные частицы типа квантовых точек и ям – 0D объекты, все более активно исследуются и становятся основой многочисленных практически значимых разработок [1–4]. При переходе к микронным или наномасштабным размерам особенностью подобных объектов являются размерные эффекты в виде совокупности процессов изменений физических свойств (механических, ферромагнитных, сегнетоэлектрических и др.) [5; 6]. Такие изменения обусловлены приближением характерных размеров частицы (блоков микроструктур) к физическим величинам типа: длины волны де Бройля частицы, длины свободного пробега электронов или фотонов, критического радиуса дислокационной петли, толщины стенки доменов, роста удельного веса приповерхностных атомов (в том числе с уровнями Тамма), способствующего кристаллической ре-

конструкции и структурированию под действием электрических и магнитных полей и т. д. Ожидаемо возникающие неравновесные состояния в таких открытых системах сопровождаются процессами самоорганизации, самосборки [7–12], моделирование которых чрезвычайно затруднено, и в таких условиях возрастает роль результатов экспериментальных исследований и их эмпирический анализ.

Применительно к процессам зарядообразования, микро- и наноструктурирования на межфазных границах сред построение по опытным данным вида инжекционных функций, как правило, обеспечивает их адекватное описание [13–14]. В практическом отношении осуществление прямого преобразования энергии электрического поля в механическую энергию движения диэлектрической жидкости перспективно для реализации электрогидродинамических (ЭГД) процессов при создании устройств тепло- и массообмена, терморегуляции, прокачки углеводородов, а также в системах автоматики и по целому ряду других приложений.

Для формирования высокоразвитых поверхностей электродных пар в ЭГД системах используются электрический взрыв проводников [15–16], включая наносекундной длительности [17], получение наносистем в процессе магнетронного распыления [18], проводится интерпретация результатов, полученных методом разряда между электродами в воздухе [19], рассматриваются механизмы транспорта электронов в таких системах [20], влияние поверхностной структуры на процессы зарядообразования [21], процессы и механизмы структурирования поверхности электродов под воздействием лазерного излучения (ЛИ) наносекундной [22] и фемтосекундной длительности [23].

В работе ставится *цель* экспериментально установить влияние и зависимости на ЭГД процессы инжекционных свойств проволочных электродов с микро- и наноразмерно развитой поверхностью, формируемой последовательным лазерным скрайбированием и нанесением магнетронных нанопленок.

Материалы и методы

Проблемой, сдерживающей широкое применение и развитие технических решений, основанных на ЭГД процессах, является электрохимическое загрязнение поверхностей электродов и их деградация, вызванные окислительно-восстановительными реакциями [24]. По данным микро- и наноразмерного детального анализа изменений морфологии поверхности электродов в течение

ЭГД процесса [25] возможно формирование их состава и структуры, при которых может достигаться как существенное снижение эрозии электродов, так и усиление процессов инжекционного зарядообразования, в частности за счет туннелирования электронов сквозь специально созданную межфазную границу.

В работе использованы параллельно расположенные медные проволочные электроды (диаметром 0,9 мм). На лазерном комплексе FMark-20RL поверхность одного из электродов подвергалась лазерному скрайбированию с плотностью мощности в импульсе лазерного излучения (ЛИ) $\sim 4,8 \cdot 10^9$ Вт/см² на частоте 100 кГц. Длина волны ЛИ 1060 нм. Обработка осуществлялась только с одной стороны электрода, перпендикулярно его длине с шагом 50 или 80 мкм. Импульсное ЛИ фокусировалось на поверхности электрода в пятно диаметром порядка 40 мкм и имело мощность 20 Вт с длиной волны 1060 нм. Интенсивность ЛИ в импульсе длительностью порядка 4,2 нс при частоте 100 кГц достигала порядка $4,8 \cdot 10^6$ кВт/см².

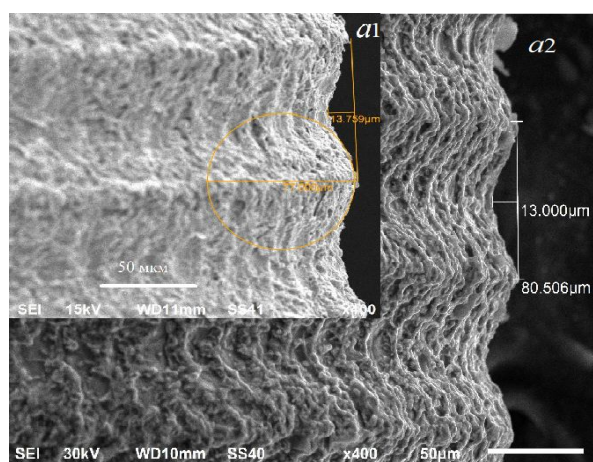
Были изучены вольт-амперные характеристики (ВАХ) как электродов после лазерной обработки, так и с нанесенной на обработанную ЛИ поверхность магнетронной нанопленки (МНП) на постоянном токе (МБУ ТМ «Магна Т»). Использовались мишени из Al, Cr, Ni, Pt и нитрида титана с образованием в атмосфере с азотом TiN. Выбор мишеней для магнетронного напыления был сделан с

учетом как проводимости формируемой нанопленки, так и стойкости к электрической коррозии. МНП имели одинаковую толщину порядка 100 нм, что достигалось заданием времени распыления соответствующих мишеней с учетом характерных скоростей осаждения [26].

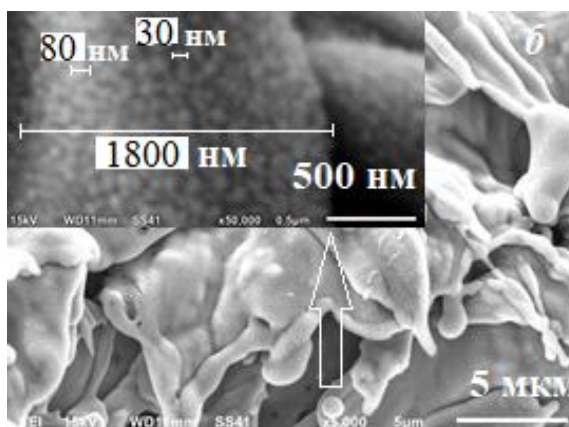
Проведены микро- и наноразмерные измерения особенностей морфологии поверхностей электрода как после лазерной обработки, так и после нанесения МНП с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM 6610LV. Типичные СЭМ-изображения показаны на рисунках 1, а, б и 2, а, б.

Период структурирования и глубина скрайбирования при шаге 80 и 50 мкм составили порядка 13 и 8 мкм со-

ответственно (рис. 1, а и 2, а). Важной характеристикой, влияющей на процессы межэлектродного зарядообразования, служит радиус закругления вершин скрайбов. После обработки ЛИ микроструктура поверхности этих вершин (с увеличением до 50000 раз) содержала застывшие продукты переплавленного металла, поверхности которых были усеяны аблированными образованиями в виде глобул с размерами до 1–3 мкм (рис. 1, а и рис. 2, а со вставками). Поверхность каждой глобулы была покрыта наночастицами, размеры которых варьировались от 30 до 80 нм, как это проиллюстрировано СЭМ-изображением ее фрагмента на вставке к рисунку 1, б.



а



б

Рис. 1. СЭМ-изображение морфологии поверхности проволочного медного электрода сразу после лазерного скрайбирования (а1) и после электрогидродинамического процесса в соответствии с ВАХ в ПМС-50 (а2); микроразмерные структуры переплава при скрайбировании с аблированными наночастицами на поверхности (б). На вставке одна из таких наночастиц меди

Fig. 1. SEM image of the surface morphology of the wire copper electrode immediately after laser scribing (a1) and after the electrohydrodynamic process in accordance with the CVC in PMS-50 (a2); microdimensional structures of remelting during scribing with ablated nanoparticles on the surface (b). The inset shows one of these copper nanoparticles

На рисунке 1 приведены СЭМ-изображения (*a1* и *a2*) поверхностей одного и того же проволочного медного электрода как сразу после лазерного скрайбирования (*a1*), так и после исследования вольт-амперных характеристик ЭГД процесса в ПМС-50 (*a2*), когда отмечено уменьшение глубины следа скрайбирования электрода на более чем 750 нм.

Для металлических нанопленок было характерно формирование наночастиц, с явно кристаллической структурой, что продемонстрировано на типичном СЭМ-изображении глобулы с аблированными медными частицами, покрытых МНП из алюминия, представленной на рисунке 2, *a*. Фактически, частицы меди выступали в роли зародышей для

роста нанокристаллов осаждаемых металлов, с характерной кубической кристаллической структурой, с размерами от 160 до 350 нм. МНП из TiN представлена наночастицами, отличающимися овальностью очертаний, с несколько меньшими размерами – от 100 до 260 нм (рис. 2, *б*). На рисунке 2, *в* продемонстрировано сглаживание поверхности структур переплава медного электрода, покрытых МНП из Pt, которые возникали после электрогидродинамических испытаний в ПМС-50. В сравнении размеров частиц на поверхности электрода (рис. 1, *a*, *б* и 2, *a*, *б*) отмечалось возрастание размеров наночастиц примерно на толщину наносимой нанопленки, что соответствует островковому (Вольмера – Вебера) механизму роста магнетронных покрытий.

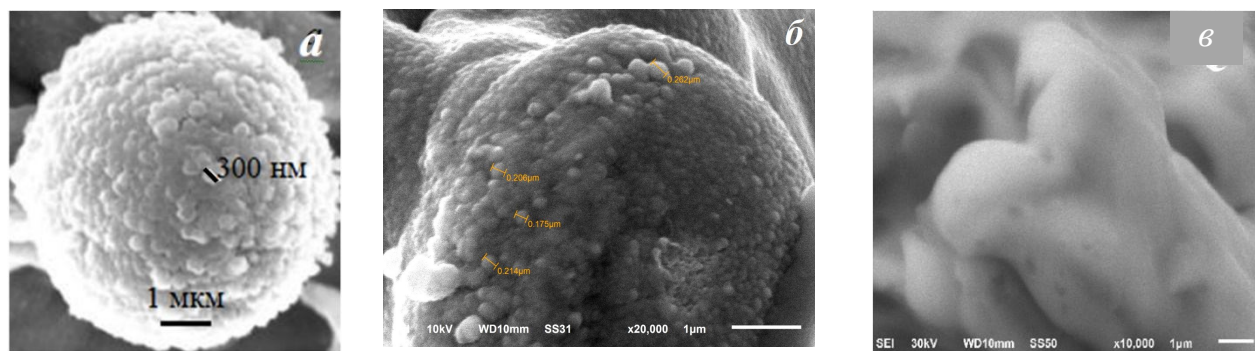


Рис. 2. СЭМ-изображения, иллюстрирующие изменения морфологии и формы поверхности продуктов лазерной обработки поверхности медного электрода с магнетронным покрытием: *a* – в виде глобулы из Al с микро- и нанокристаллами; *б* – наночастицами из TiN; *в* – сглаживание форм структур переплава медного электрода с Pt после электрогидродинамических испытаний в ПМС-50

Fig. 2. SEM images illustrating changes in the morphology and shape of the surface of the products of laser treatment of the surface of a copper electrode with a magnetron coating: *a* – in the form of an Al globule with micro and nanocrystals; *б* – TiN nanoparticles; *в* – smoothing of the shapes of the structures of remelting of the copper electrode with Pt after electrohydrodynamic tests in PMS-50

Исследования низковольтных ЭГД процессов, протекающих между этими электродами, и регистрация ВАХ были выполнены на установке, принципиальная схема которой представлена на рисунке 3. Пара проволоочных медных электродов (1 и 2), поверхность одного из которых была предварительно структурирована описанными выше способами, помещалась в специально разработанной системе, обеспечивающей строгое взаимно-параллельное расположение электродов в прозрачной измерительной ячейке с фиксированным расстоянием 4 мм. Оптически прозрачная ячейка (оргстекло, проводимость $\sim 10^{-15}$ См/м⁻¹) заполнялась полиметилсилоксановой жидкостью типа ПМС-50 (степенью полимеризации 50). Эта

жидкость благодаря высоким химической, термоокислительной (150...300°C) и тепловой (240...350°C) устойчивости широко используется в качестве теплоносителя. Электрическая проводимость ячейки с ПМС-50 составила $\sim 3 \cdot 10^{-15}$ См/м. К электродам прикладывалось постоянное напряжение от источника НТ-6000Р, величина которого плавно регулировалась от 0 до 500 В. В низковольтном режиме исключалось возбуждение электроконвективных течений. Происходящие ЭГД процессы (их отсутствие) регистрировались видеокамерой (3) по движению микропузырьков, вдуваемых через трубочку диаметром ~ 40 мкм, что проиллюстрировано на вставке к рисунку 3.

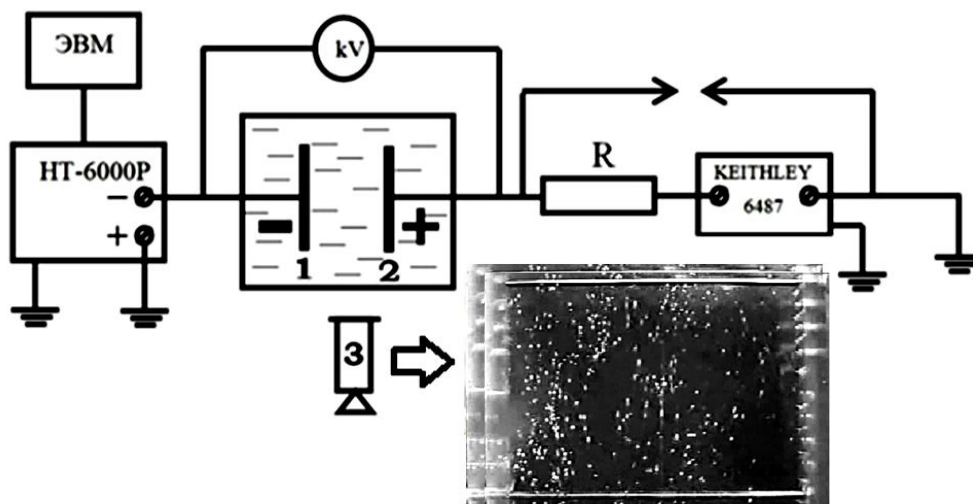


Рис. 3. Принципиальная схема используемого оборудования в установке для исследования низковольтных ВАХ: 1 и 2 – проволоочные катод и анод; 3 – видеокамера. На вставке представлено видеоизображение ЭГД течений на скорости 188 мм/с

Fig. 3. Schematic diagram of the equipment used in the installation for the study of low-voltage current-voltage characteristics: 1 and 2 – wire cathode and anode; 3 – video camera. The inset shows a video image of EHD flows at a speed of 188 mm/s

Измерения ВАХ осуществлялось высокоточным пикоамперметром Keithley 6487 (погрешность 10 фА), когда основными были случайные погрешности, обусловленные нестационарностью рождения и нейтрализации зарядов в ЭГД процессах, а также токовыми шумами. Для каждого значения напряжения в течение 3 мин статистически определялись средние значения тока. Измерения начинались по истечении времени максвелловской релаксации заряда в ПМС-50, которое составляло от 2 до 3 мин. Были изучены ВАХ ЭГД для образцов электродов после лазерного скрайбирования с шагом 50 и

80 мкм. Построенные таким образом ВАХ приведены на рисунке 4 для электрода, скрайбированного с шагом 80 мкм, когда он выступал как в роли катода, так и анода (рис. 4, а). По аналогичной схеме была изучена ВАХ для этого же электрода, но с покрытием алюминиевой магнетронной нанопленкой (рис. 4, б). Во всех случаях поверхность второго проволочного медного электрода после оптической полировки не подвергалась никакой дополнительной обработке. Все измеренные ВАХ были линейными, но характеризовались существенно отличными проводимостями.

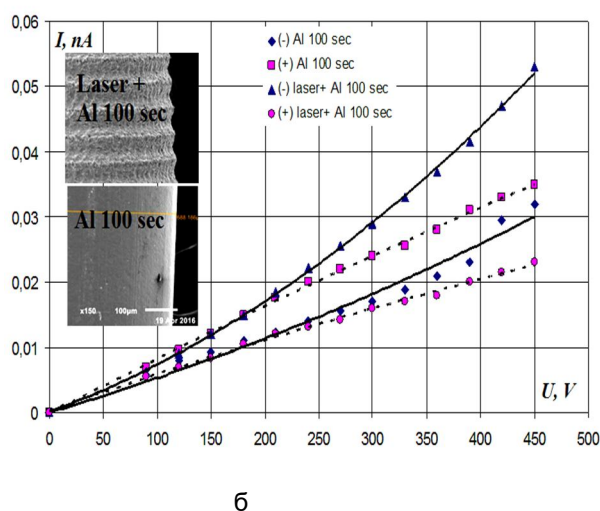
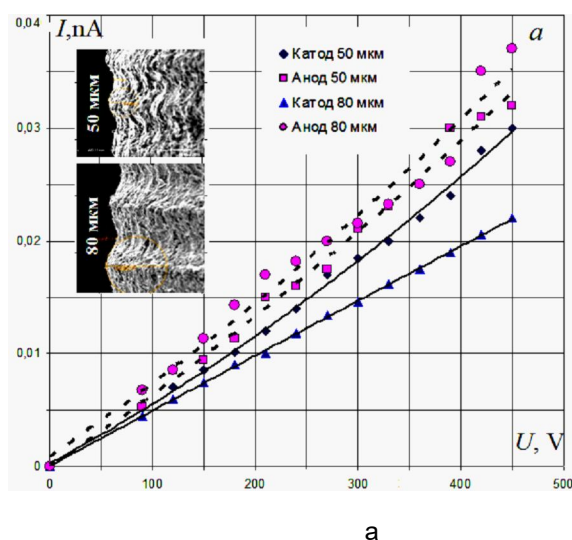


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики: а – скрайбированных медных электродов с шагом 50 и 80 мкм и необработанным противоэлектродом; б – электрода, скрайбированного с шагом 80 мкм и с напыленным Al в сравнении только с напыленным Al. Время напыления 100 с. Противоэлектрод необработанный

Fig. 4. CVC of: а – scribed copper electrodes with a pitch of 50 and 80 μm and an untreated counter electrode; б – of an electrode with a scribed with a pitch of 80 μm and with sputtered Al in comparison with sputtered Al only. Spraying time 100 sec. Unfinished counter electrode

В случае использования скрайбированных электродов в качестве анода в паре с электродом сравнения (необработанным) шаг скрайбирования мало влияет на проводимость (наклон ВАХ) системы (рис. 4, *а*). Для скрайбированных электродов в качестве катода для электрода с шагом 50 мкм наблюдается более крутая ВАХ по сравнению с шагом 80 мкм. Это объясняется более развитой поверхностью электрода с шагом скрайбирования 50 мкм (см. вставки сканов РЭМ на рис. 4, *а*). В этом случае происходило перекрытие лазерных дорожек в процессе модификации и, соответственно, большей термодформацией поверхности. Однако «катодные» ВАХ всегда ниже «анодных» в случае только скрайбированных поверхностей.

Обработка скрайбированием приводит к большому отличию в зависимостях ВАХ (см. рис. 4, *б*). Скрайбированный катод ($h = 80$ мкм) (в паре с эталонным), а затем напылённый Al (100 с) даёт ВАХ явно нелинейный характер, причём ВАХ «катода», в отличие от предыдущего случая, лежит выше ВАХ «анода». По сравнению с ВАХ «катода» просто напылённого Al токовые значения в случае скрайбирования возросли на 77%. Для напылённого Al (без скрайбирования в тех же условиях) ВАХ «катода» лежит ниже ВАХ «анода», как и в случае только скрайбированных электродов предыдущего рисунка.

В следующей серии ВАХ (рис. 5, *а*, *б*) в аналогичных условиях использова-

лись пары медных электродов с напылением металлов разной работы выхода электронов Al, Cr, Ni ($t_{\text{нап}} = 100$ с) на скрайбированную с шагом 80 мкм поверхность и сравнение с электродами с напылением Pt на необработанную медную поверхность и с медным электродом со скрайбированной с шагом 80 мкм поверхностью. Противоелектрод сравнения во всех случаях необработанный. Низковольтные ВАХ для всех электродов, используемых в качестве катода с лазерным скрайбированием шагом 80 мкм и напылением Al, Cr, Ni ($t_{\text{нап}} = 100$ с), носят нелинейный характер. По сравнению с просто скрайбированным медным электродом токовые значения ВАХ этих электродов возрастают на 120%. Зависимость характеристик от работы выхода электронов с поверхностей МНП мало заметна. Хотя для Al ($\phi_{\text{вых}} = 4,06...4,26$ эВ) ВАХ лежит выше, чем для Cr (4,5 эВ) и Ni (5,04...5,35 эВ).

Для катодов с напылением Pt (на установке нанесения металлов JEOL JFC-1600) в течение 60 с при токе 40 мА и для скрайбированного медного электрода с шагом 80 мкм носят линейный характер. Несмотря на то, что работа выхода Pt (5,3 эВ) выше, чем работа Cu (4,53... 5,1), ВАХ для скрайбированного ненапылённого электрода находится ниже. Это показывает, что наноструктурирование необработанного (гладкого) электрода платиной даёт лучшее зарядообразование, чем сильно развитая мик-

роструктурами скрайбированная поверхность медных электродов без напыления. Можно заключить, что локальные

напряжённости наноструктур платиновых МНП выше по значениям, чем на структурах скрайбированной меди.

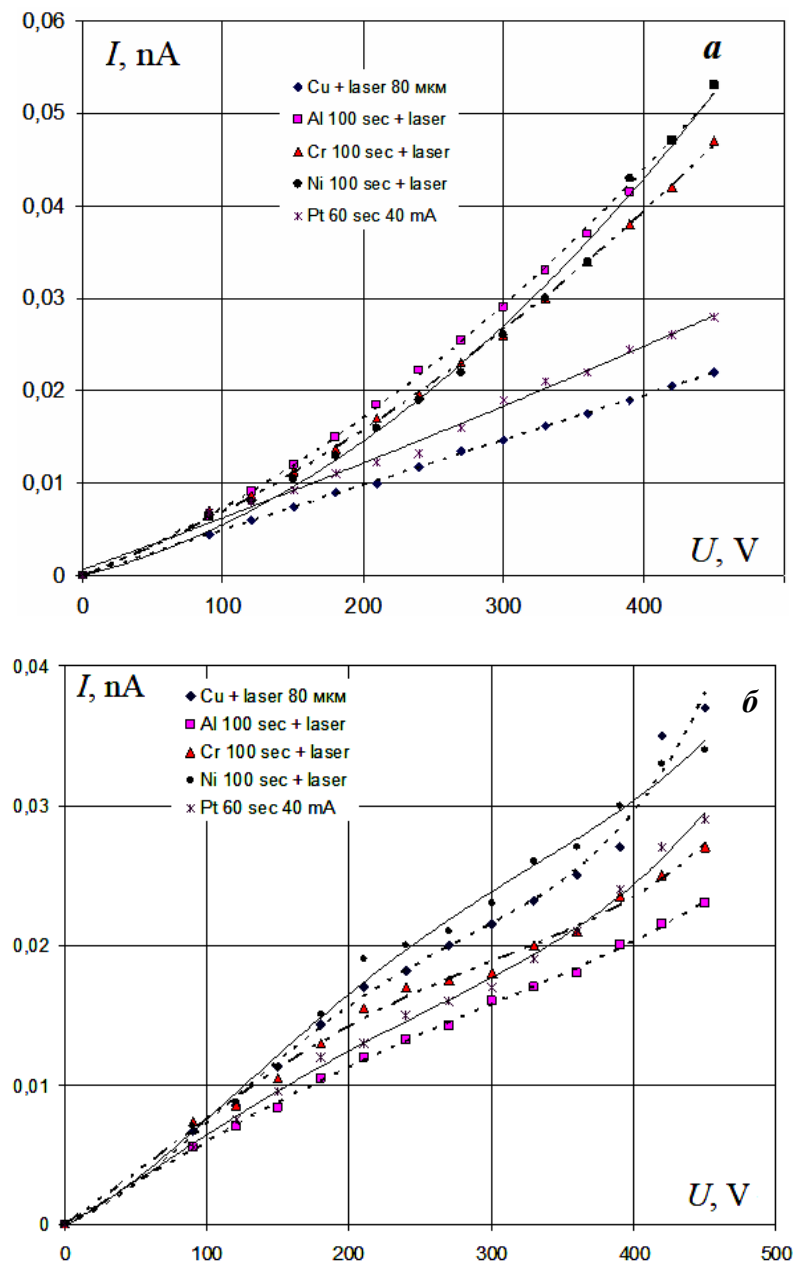


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики: а – ВАХ медных электродов в качестве катодов с напылением Al, Cr, Ni ($t_{\text{нап}} = 100$ с) на скрайбированную с шагом 80 мкм поверхность и электродов с напылением Pt ($t_{\text{нап}} = 60$ с при токе 40 мА) на необработанную медную поверхность и медным электродом со скрайбированной с шагом 80 мкм поверхностью (противозлектрод необработанный); б – тех же медных электродов, используемых в качестве анодов

Fig. 5. CVC of: a – copper electrodes as cathodes coated with Al, Cr, Ni ($t_{\text{sp}} = 100$ sec) on a surface scribed with a step of 80 μm and electrodes with Pt sputter ($t_{\text{sp}} = 60$ s at a current of 40 mA) on an untreated copper surface and copper electrode-house with a surface scribbled with a step of 80 microns (The counter electrode is raw); b – the same copper electrodes used as anodes

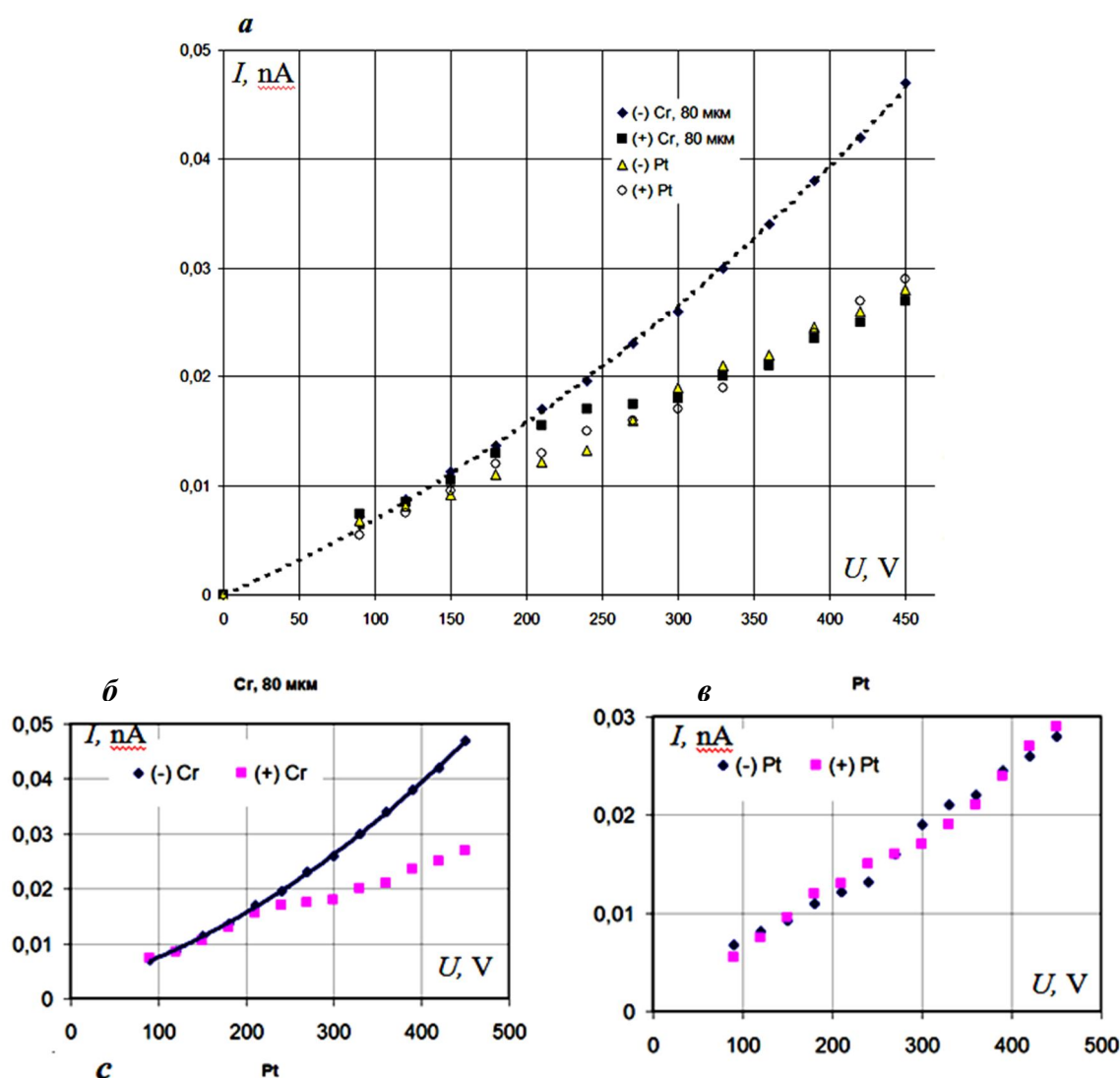


Рис. 6. Сравнительные ВАХ: *a* – для медного проволочного электрода, скрайбированного с шагом 80 мкм и покрытого Cr и необработанного медного электрода покрытого Pt; *б* – выделенные отдельно ВАХ для электрода скрайбированного с шагом 80 мкм и покрытого Cr; *в* – выделенные отдельно ВАХ для необработанного медного электрода, покрытого Pt

Fig. 6. Comparative CVCs: *a* - for a copper wire electrode scribed with a step of 80 μm and coated with Cr and an untreated copper electrode coated with Pt; *б* – separate I-V characteristics for an electrode scribed with a step of 80 μm and coated with Cr; *в* – separate I-V characteristics for an untreated copper electrode coated with Pt

Более схожий характер имеют ВАХ для тех же электродов с аналогичными измерениями в случае использования их в качестве анодов. Для электродов в качестве анодов с напылением Al, Cr, Ni

($t_{\text{нап}} = 100$ с) на скрайбированную с шагом 80 мкм поверхность и электродов с напылением Pt ($t_{\text{нап}} = 60$ с при токе 40 мА) на необработанную медную поверхность и медным электродом со

скрайбированной с шагом 80 мкм поверхностью по сравнению с катодными характеристиками можно отметить небольшое уменьшение скорости (элемент насыщения) роста ВАХ в средней части. Вероятно, это связано с замедленной разрядкой положительных ионов, инжектированных с модифицированных анодов (из-за слабой инжекции отрицательных зарядов с необработанных катодов при невысоких напряжённостях) и, соответственно, с возникшей неравновесностью диссоционно-рекомбинационных реакций в объёме диэлектрика. При дальнейшем увеличении напряжения усиление вброса отрицательных зарядов с необработанных электродов приводит к разрядке положительных и дальнейшему увеличению роста ВАХ. Обозначения точек на графиках рисунков 5, *a* и *б* для удобства сохранены. В частности, не наблюдается различия в ходе ВАХ отдельно для скрайбированных анодов по сравнению с их катодными характеристиками. Самый большой рост «катодных» ВАХ по сравнению с «анодными» наблюдается для электрода, скрайбированного и напылённого Al.

Рисунок 6, *a*, *б* (как и рисунки 4, *b* и 5, *a*) показывает, что монотонно нелинейный характер токовым зависимостям с резким возрастанием ВАХ в случае использования модифицированных поверхностей проволочных электродов в качестве катодов придаёт последовательное лазерное скрайбирование и маг-

нетронное напыление. У всех электродов, используемых в качестве анода и модифицированных любым способом (лазером, магнетроном или их сочетанием), в наличии уменьшение скорости роста ВАХ в средней части (рис. 4, *a*; 5, *б*; 6, *a*, *в*). Данный эффект зависит не столько от вида структур на поверхности анодов, сколько от электрохимических процессов в рабочей жидкости ПМС-50.

Результаты и их обсуждение

Электрофизические исследования ЭГД-системы с парой параллельных медных проволочных электродов в жидком диэлектрике ПМС-50 показали, что в случае структурирования поверхности одного из электродов, с одной стороны, только лазерным скрайбированием или магнетронным напылением (Al, Cr, Ni, Pt), с другой – лазерным скрайбированием и магнетронным напылением тех же металлов приводит как к изменению электропроводности системы, так и к ходу ВАХ при использовании структурированных электродов в качестве анода и катода. При использовании модифицированного электрода (лазер или магнетрон) в качестве анода электропроводность системы выше на 10–15%, чем при их использовании в качестве катода. В первом случае в средней части ВАХ имеется участок падения скорости возрастания тока (для любых модифицированных электродов), а во втором ВАХ в пределах погрешности токовых шумов линейна на всём участке изменения

напряжения (0...500 В) (см. рис. 4, а, б; 5, а, б; 6). Последнее соответствует классическому ходу низковольтного участка ВАХ жидкого диэлектрика. В случае структурирования лазером (с шагом 50 и 80 мкм) катода линейность ВАХ не нарушается (см. рис. 4, а). Кардинально меняется электропроводность и проявляется нелинейность ВАХ с самых низких подаваемых напряжений при подаче отрицательного потенциала на подвергнутые и лазерному скрайбированию, и магнетронному напылению (Al, Cr, Ni) электроды (см. рис. 4, б; 5, 6, а), что свидетельствует о смене механизма электропроводности и усилению катодной (электронной) инжекции за счёт дополнительного структурирования магнетронным напылением микро- и наноструктур после лазерной абляции.

По результатам исследований можно заключить, что плотность инжекционного тока заметно выше на электродах, где образованные после лазерного скрайбирования микро- и наноструктуры получают магнетронное модифицирование поверхности. Для электродов, взятых в качестве катодов с напылением Ni, Al, Cr, наблюдается нелинейный рост ВАХ в начальном участке роста напряжений. Можно предположить, что усиление инжекции за счёт локального электрического поля на вершинах возникших при магнетронном напылении добавочных наноразмерных структур приводит к зарядообразованию по механизму, аналогичному автоэмиссии.

Только электроны захватываются молекулами жидкости и примесями. О существовании экспоненциальной зависимости (подобной автоэлектронной) эмиссии электронов с вершин игольчатых металлических электродов на границе металл – жидкий диэлектрик свидетельствуют экспериментальные зависимости ВАХ, выполненные в [27]. Полученные нами ВАХ укладывались в зависимость, описываемую законом Фаулера – Нордгейма, который в приближении простого треугольного потенциального барьера на эмиттере [28], создаваемого выступающими наноструктурами на модифицированных поверхностях электродов [28]:

$$j = \frac{\alpha E^2}{\phi} \exp\left(-\frac{b\phi^{\frac{3}{2}}}{E}\right), \quad (1)$$

где j – плотность тока с вершины структуры, $\alpha = e^3/(8\pi\hbar)$; $b = 4\sqrt{2m}/(e\hbar)$; e – элементарный заряд; ϕ – работа выхода материала инжектора; m – эффективная масса электрона; $\hbar, \hbar = h/(2\pi)$ – постоянная Планка.

Дискуссионным является вопрос о целесообразности использования вышеуказанного закона для описания инжекционных процессов на структурированных поверхностях металлических электродов в диэлектрических жидкостях. В таких условиях автоэмиссионную зависимость для описания экспериментальных данных относительно полного тока J можно представить

$$\lg\left(\frac{J}{U^2}\right) = 10,188 - 0,297 \frac{\Phi^{3/2}}{\beta} f(y) \frac{1}{U} + \lg\left(\frac{S\beta^2}{\Phi t^2(y)}\right), \quad (2)$$

где $t(y)$ и $f(y)$ – затабулированные маломеняющиеся функции параметра y , которые учитывают влияние на автоэмиссионный ток понижения потенциального барьера; S – площадь инжектирующей поверхности структур; β – форм-фактор.

В координатах Фаулера – Нордгейма расчетная зависимость (2) представлена на рисунке 7. С напряжения между электродами ~ 330 В и выше участок этой зависимости можно считать линейным. Это может быть обусловлено инициацией туннелирования электронов непосредственно в жидкость и последующим захватом молекулами жидкости

(при наличии электронно-акцепторными примесями) с возникновением отрицательных ионов за счет локальных электрических полей на вершинах микро- и наноструктур. Наряду с этим молекулы диэлектрической жидкости, поляризованные в локальных полях в приповерхностной области наноструктур, дополнительно снижают потенциальный барьер для туннелирования электронов, делая его даже ниже, чем при вакуумной автоэмиссии. При напряжениях меньших ~ 330 В, кроме объёмных диссоциационно-рекомбинационных механизмов, нелинейность автоэмиссионной электропроводности может быть объяснена усилением влияния эффекта Вина на тех же структурах поверхности электродов.

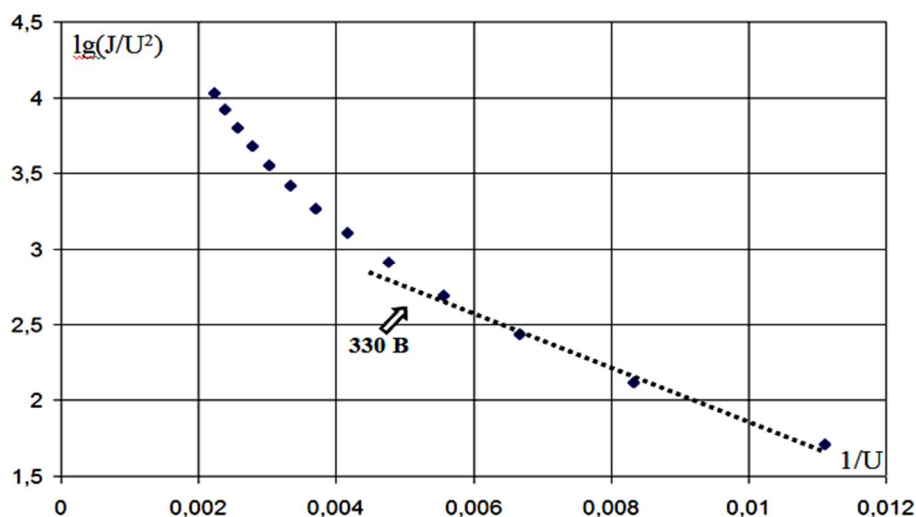
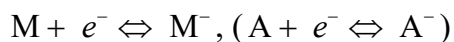


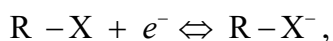
Рис. 7. Экспериментальная зависимость в координатах Фаулера – Нордгейма для медного проволочного электрода, скрайбированного с шагом 80 мкм и покрытого Al, используемого в качестве катода

Fig. 7. Experimental dependence in Fowler-Nordheim coordinates for a copper wire electrode scribed with a step of 80 μm and coated with Al used as a cathode

Зарядообразование на приповерхностных структурах, распределённых по поверхности катода, можно описать следующей восстановительной реакцией:



или для полярной среды



где М и А – молекулы соответственно неполярной жидкости и примеси, обладающей большим сродством к электрону; R – радикал (например, в спиртах это группа $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \dots$, а в нитробензоле – бензольное кольцо); X – функциональная группа электроакцептора (в спиртах – гидроксильная группа OH, а в нитробензоле – группа NO_2); (R – X) – молекула полярной жидкости. Функциональная группа X, с одной стороны, определяет высокую химическую активность на поверхности межфазной границы «металл – жидкий диэлектрик», с другой стороны, определяет смещение отрицательного заряда от радикала к группе X, сопровождаемое поляризацией молекулы (R – X).

Выводы

Лазерное скрайбирование поверхности электродов приводит к формированию многомасштабного структурирования с размерами как на микроуровне до 10 мкм, так и наноуровне – ~80...120 нм.

Последовательная модификация поверхности проволочных электродов посредством лазерного скрайбирования и магнетронного напыления металлов (Al, Ni, Cr) усиливает инжекцию отрицательных зарядов с катода за счет коэффициента усиления в локально создаваемых на вершинах наноструктур электрических полях, что приводит к нелинейному росту даже начального участка ВАХ.

Отмечен существенный рост инжекционных свойств отрицательных зарядов на электродах с комплексной обработкой (последовательное лазерное скрайбирование и магнетронное напыление), что свидетельствует о доминирующем влиянии островкового (Вольмера – Вебера) механизма роста магнетронных покрытий.

Получено соответствие ВАХ в координатах Фаулера – Нордгейма с ее расчетной зависимостью (2), начиная с напряжения ~330 В, что объяснено инициацией туннелирования электронов непосредственно в жидкость и последующим захватом молекулами жидкости (при наличии электронно-акцепторными примесями) с возникновением отрицательных ионов как за счет приповерхностных локальных электрических полей на вершинах микро- и наноструктур, так и поляризованных в этих полях молекул диэлектрической жидкости.

Список литературы

1. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2005. 336 с.
2. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. 416 с.
3. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / Дж. Уайтсайде, Д. Эйглер, Р. Андерс [и др.]; под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002. 292 с.
4. Суздальев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: Либроком, 2009. 592 с.
5. Структура и свойства твёрдых и сверхтвёрдых нанокompозитных покрытий / А. Д. Погребняк, А. П. Шпак, Н. А. Азаренков, В. М. Береснев // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 1. С. 35–64.
6. Головин Ю. И. Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
7. Ролдугин В. И. Самоорганизация наночастиц на межфазных поверхностях // Успехи химии. 2004. Т. 73, № 2. С. 123–156.
8. Третьяков Ю. Д. Процессы самоорганизации в химии материалов // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 8. С. 731–763.
9. DNA Assisted Assembly of Multisegmented Nanowires / J. Lee, A. A. Wang, Y. Rheem, B. Yoo, A. Mulchandani, W. Chen, N. V. Myung // Electroanalysis. 2007. Vol. 19, is. 22. P. 2287–2293.
10. Влияние электрических полей на процессы самоорганизации в ультрадисперсном растворе многостенных углеродных нанотрубок / А. П. Кузьменко, Т. П. Наинг, А. Е. Кузько, М. М. Тан // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, № 2. С. 268–277.
11. Магнито- и электродинамическое структурирование в магнитореологических жидкостях на основе магнетита / А. П. Кузьменко, Тан, А. И. Жакин, А. Е. Кузько, Н. Ю. Гранкин, О. Ю. Черных // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10, № 4. С. 59–78.
12. Самоорганизация квазирезонансных систем плазма-конденсат / В. И. Перекрестов, В. И. Перекрестов, А. И. Олемский, А. С. Корнющенко, Ю. А. Косминская // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, № 5. С. 1003–1009.
13. Жакин А. И. Электрогидродинамика заряженных поверхностей // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 2. С. 153–177.
14. Изучение переходных процессов и влияние поверхностной структуры электродов на теплоотдачу в проволочном ЭГД теплообменнике / А. И. Жакин, А. Е. Кузько, П. А. Белов, А. Н. Лазарев // Электронная обработка материалов. 2011. № 47 (3). С. 54–60.

15. Механизмы генерации наноразмерных металлических частиц при электрическом взрыве проводников / Н. Б. Волков, А. Е. Майер, В. С. Седой, Е. Л. Фенько, А. П. Яловец // Журнал теоретической физики. 2010. Т. 80, вып. 4. С. 77–80.
16. Sedoi V. S., Ivanov Y. F. Particles and crystallites under electrical explosion of wires // Nanotechnology. 2008. Vol. 19, no. 14. <http://iopscience.iop.org/0957-4484/19/14/145710>.
17. Наносекундный электрический взрыв тонких проволок / А. Е. Тер-Оганесян, С. И. Ткаченко, В. М. Романова, А. Р. Мингалеев, Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз // Физика плазмы. 2005. Т. 31, вып. 10. С. 919–926.
18. Образование островковых структур при осаждении слабопересыщенных паров алюминия / В. И. Перекрестов, А. В. Коропов, С. Н. Кравченко, В. И. Перекрестов // Физика твердого тела. 2002. Т. 44, вып. 6. С. 1131–1136.
19. Интерпретация экспериментальных данных по электрическому взрыву тонких проволок в воздухе / С. А. Пикуз, С. И. Ткаченко, Д. А. Баришпольцев, Г. В. Иваненков, А. Р. Мингалеев, В. М. Романова, А. Е. Тер-Оганесян, Т. А. Шелковенко // Письма в Журнал технической физики. 2007. Т. 33, вып. 15. С. 47–55.
20. Транспорт электронов в моносферных структурах металлов / В. И. Козуб, В. М. Кожевин, Д. А. Явсин, С. А. Гуревич // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т. 81, вып. 5. С. 287–291.
21. Кузьменко А. П., Кузько А. Е., Тимаков Д. И. Влияние на зарядообразование электрических полей на поверхностях наноструктурированных электродов // Журнал теоретической физики. 2013. Т. 83, вып. 2. С. 91–96.
22. Диссипативные наноструктуры и универсальность Фейгенбаума в неравновесной нелинейной динамической системе металл – мощное поляризованное ультракороткоимпульсное излучение / В. С. Макин, Р. С. Макин, А. Я. Воробьев, Чунлей Гуо // Письма в Журнал теоретической физики. 2008. Т. 34, вып. 9. С. 55–64.
23. Фемтосекундная запись субволновых одномерных квазипериодических наноструктур на поверхности титана / Е. В. Голосов, В. И. Емельянов, А. А. Ионин, Ю. Р. Колобов, С. И. Кудряшов, А. Е. Лигачев, Ю. Н. Новоселов, Л. В. Селезнев, Д. В. Синицын // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 90, вып. 2. С. 116–120.
24. Кузько А. Е. Особенности изменения микрорельефа поверхностей электродов при электроконвекции в ПМС-50 // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Физика и химия. 2014. № 1. С. 24–30.
25. Кузько А. Е., Кузьменко А. П., Лазарев А. Н. Использование АСМ в расчёте инъекции зарядов при электроконвекции // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Физика и химия. 2013. № 2. С. 32–37.
26. Наноразмерная характеристика металлических магнетронных нанопленочных мультислоев из Cr, Cu, Al, Ni на ситалле / А. П. Кузьменко, Нау Динт, А. Е. Кузько, Мьо

Мин Тан, Тант Син Вин, А. И. Колпаков // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, № 3. С. 194–202.

27. Стишков Ю. К., Чирков В. А. Формирование электрогидродинамических течений в сильнонеоднородных электрических полях при двух механизмах зарядообразования // Журнал теоретической физики. 2012. Т. 82, вып. 1. С. 3–13.

28. Введение в физику поверхности / К. Оура, В. Г. Лифшиц, А. А. Саранин, А. В. Зотов, М. Катаяма. М.: Наука, 2006. 490 с.

References

1. Pool Ch., Owens F. Nanotekhnologii [Nanotechnology]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 336 p.

2. Gusev A. I. Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 416 p.

3. Whitesides J., Eigler D., Anders R., eds. Nanotekhnologiya v blizhaishem desyatiletii. Prognoz napravleniya issledovaniy [Nanotechnology in the next decade. Research direction forecast]; ed. by M. K. Roko, R. S. Williams, P. Alivisatos. Moscow, Mir Publ., 2002. 292 p.

4. Suzdalev I. P. Nanotekhnologiya: fiziko-khimiya nanoklasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Nanotechnology: physical chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials]. Moscow, Libro-com Publ., 2009. 592 p.

5. Pogrebnyak A. D., Shpak A. P., Azarenkov N. A., Beresnev V. M. Struktura i svoystva tverdykh i sverkhtverdykh nanokompozitnykh pokrytii [Structure and properties of solid and superhard nanocomposite coatings]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Achievements of physical science*, 2009, vol. 179, no. 1, pp. 35–64.

6. Golovin Yu. I. Vvedenie v nanotekhniku [Introduction to nanotechnics]. Moscow, Machine Building Publ., 2007. 496 p.

7. Roldugin V. I. Samoorganizatsiya nanochastits na mezhfaznykh poverkhnostyakh [Self-organization of nanoparticles on interfacial surfaces]. *Uspekhi khimii = Advances in chemistry*, 2004, vol. 73, no. 2, pp. 123–156.

8. Tretyakov Yu. D. Protsessy samoorganizatsii v khimii materialov [Self-organization processes in the chemistry of materials]. *Uspekhi khimii = Advances in chemistry*, 2003, vol. 72, no. 8, pp. 731–763.

9. Lee J., Wang A. A., Rheem Y., Yoo B., Mulchandani A., Chen W., Myung N. V. DNA Assisted Assembly of Multisegmented Nanowires. *Electroanalysis*, 2007, vol. 19, is. 22, pp. 2287–2293.

10. Kuzmenko A. P., Naing T. P., Kuzko A. E., Tan M. M. Vliyanie elektricheskikh polei na protsessy samoorganizatsii v ul'tradispersnom rastvore mnogostennykh uglirodnykh nanotrubok [Influence of electric fields on self-organization processes in ultrafine solution of

multi-walled carbon nanotubes]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 268–277.

11. Kuzmenko A. P., Tan M. M., Zhakin A. I., Kuzko A. E., Grankin N. Yu., Chernykh Yu O. Magnito- i elektrodinamicheskoe strukturirovanie v magnitoreologicheskikh zhidkostyakh na osnove magnetita [Magneto- and electrodynamic structuring in magnetite-based magnetorheological liquids]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Technics and Technologies*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 59–78.

12. Perekrestov V. I., Olemsky A. I., Kornushchenko A. S., Kosminskaya Yu. A. Samoorganizatsiya kvazirezonsnykh sistem plazma-kondensat [Self-organization of quasi-resonant plasma-condensate systems]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, 2009, vol. 51, no. 5, pp. 1003–1009.

13. Zhakin A. I. Elektrogidrodinamika zaryazhennykh poverkhnostei [Electrohydrodynamics of charged surfaces]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences*, 2013, vol. 183, no. 2, pp. 153–177.

14. Zhakin A. I., Kuzko A. E., Belov P. A., Lazarev A. N. Izuchenie perekhodnykh protsessov i vliyaniye poverkhnostnoi struktury elektrodov na teplootdachu v provolochnom EGD teploobmennike [Study of transient processes and the influence of the surface structure of electrodes on heat transfer in a wire EHD heat exchanger]. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic Processing of Materials*, 2011, no. 47 (3), pp. 54–60.

15. Volkov N. B., Mayer A. E., Sedoy V. S., Fenko E. L., Yalovets A. P. Mekhanizmy generatsii nanorazmernykh metallicheskh chastits pri elektricheskoy vzryve provodnikov [Mechanisms for the generation of nanosized metal particles in the electric explosion of conductors]. *Zhurnal teoreticheskoi fiziki = Journal of Theoretical Physics*, 2010, vol. 80, is. 4, pp. 77–80.

16. Sedoi V. S., Ivanov Y. F. Particles and crystallites under electrical explosion of wires. *Nanotechnology*, 2008, vol. 19, no. 14. <http://iopscience.iop.org/0957-4484/19/14/145710>.

17. Ter-Oganesyan A. E., Tkachenko S. I., Romanova V. M., Mingaleev A. R., Shelkovenko T. A., Pikuz S. A. Nanosekundnyi elektricheskii vzryv tonkikh provolochek [Nanosecond electric explosion of thin wires]. *Fizika plazmy = Plasma Physics*, 2005, vol. 31, is. 10, pp. 919–926.

18. Perekrestov V. I., Koropov A. V., Kravchenko S. N. Obrazovanie ostrovkovykh struktur pri osazhdenii slaboperesyshchennykh parov alyuminiya [Formation of island structures during the deposition of slightly supersaturated aluminum vapor]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, 2002, vol. 44, is. 6, pp. 1131–1136.

19. Pikuz S. A., Tkachenko S. I., Barishpoltsev D. A., Ivanenkov G. V., Mingaleev A. R., Romanova V. M., Ter-Oganesyan A. E., Shelkovenko T. A. Interpretatsiya eksperi-

mental'nykh dannykh po elektricheskomu vzryvu tonkikh provolochek v vozdukh [Interpretation of experimental data on electrical explosion of thin wires in the air]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics Letters*, 2007, vol. 33, no. 15, pp. 47–55.

20. Kozub V. I., Kozhevin V. M., Yavsin D. A., Gurevich S. A. Transport elektronov v monodispersnykh strukturakh metallov [Transport of electrons in monodisperse structures of metals]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Thechnical Physics Letters*, 2008, vol. 81, is. 5. pp. 287–291.

21. Kuzmenko A. P., Timakov D. I. Vliyanie na zaryadoobrazovanie elektricheskikh polei na poverkhnostyakh nanostrukturirovannykh elektrodov [Influence on the charge formation of electric fields on the surfaces of nanostructured electrodes]. *Zhurnal teoreticheskoi fiziki = Journal of Theoretical Physics*, 2013, vol. 83, is. 2, pp. 91–96.

22. Makin V. S., Vorobyov A. Ya., Chunlei Guo. Dissipativnye nanostrukтуры i universal'nost' Feigenbauma v neravnovesnoi nelineinoi dinamicheskoi sisteme metal – moshchnoe polyarizovannoe ul'trakorotkoimpul'snoe izluchenie [Dissipative nanostructures and Feigenbaum universality in a nonequilibrium nonlinear dynamic system of metal-powerful polarized ultrashort-pulse radiation]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Thechnical Physics Letters*, 2008, vol. 34, is. 9, pp. 55–64.

23. Golosov E. V., Emel'yanov V. I., Ionin A. A., Kolobov Yu. R., Kudryashov S. I., Ligachev A. E., Novoselov Yu. N., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V. Femtosekundnaya zapis' subvolnovykh odnomernykh kvaziperiodicheskikh nanostruktur na poverkhnosti titana [Femtosecond recording of subwavelength one-dimensional quasi-periodic nanostructures on the surface of titanium]. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoi fiziki = JETP Letters*, 2009, vol. 90, is. 2, pp. 116–120.

24. Kuzko A. E. Osobennosti izmeneniya mikrorel'efa poverkhnostei elektrodov pri elektrokonveksii v PMS-50 [Features of changes in the microrelief of electrode surfaces during electroconvection in PMS-50]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika i khimiya = Proceedings of the Southwest State University. Series: Physics and Chemistry*, 2014, no. 1, pp. 24–30.

25. Kuzko A. E., Lazarev A. N. Ispol'zovanie ASM v raschete inzheksii zaryadov pri elektrokonveksii [The use of AFM in the calculation of charge injection during electroconvection]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika i khimiya = Proceedings of the Southwest State University. Series: Physics and Chemistry*, 2013, no. 2, pp. 32–37.

26. Kuzmenko A. P., Nau Dint, Kuzko A. E., Myo Min Tan, Tant Sin Win, Kolpakov A. I. Nanorazmernaya kharakterizatsiya metallicheskh magnetronnykh nanoplenochnykh mul'tisloev iz Cr, Cu, Al, Ni na sitalle [Nanoscale characterization of metallic magnetron nanofilm multilayers of Cr, Cu, Al, Ni on glass-ceramic]. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi*

tekhniki = News of Universities. Materials of Electronic Equipmen, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 194–202.

27. Stishkov Yu. K., Chirkov V. A. Formirovanie elektrogidrodinamicheskikh techenii v sil'noneodnorodnykh elektricheskikh polyakh pri dvukh mekhanizмах zaryadoobrazovaniya [Formation of electrohydrodynamic flows in highly inhomogeneous electric fields with two mechanisms of charge formation]. *Zhurnal teoreticheskoi fiziki = Journal of Theoretical Physics*, 2012, vol. 82, is. 1, pp. 3–13.

28. Oura K., Lifshits V. G., Saranin A. A., Zotov A. V., Katayama M. Vvedenie v fiziku poverkhnosti [Introduction to surface physics]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 490 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузько Андрей Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9698-6123, Researcher ID: 7801324495

Andrey E. Kuzko, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9698-6123, Researcher ID: 7801324495

Жакин Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

Anatoly I. Zhakin, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Alexander P. Kuzmenko, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Кузько Анна Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: avkuzko@mail.ru

Anna V. Kuzko, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: avkuzko@mail.ru

Прибылов Александр Александрович, студент направления подготовки нанотехнологии и микросистемная техника, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pribylovaleksandr99@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7565-1874, Researcher ID: AAE-6228-2022

Alexander A. Pribylov, Student of the Direction of Training in Nanotechnology and Microsystem Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pribylovaleksandr99@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7565-1874, Researcher ID: AAE-6228-2022

Юшин Василий Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ushinvv@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1391-4229

Vasily V. Yushin, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Occupational Safety and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ushinvv@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1391-4229