



ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 69–79
Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics, 2021, vol. 21, iss. 1, pp. 69–79

Научная статья
УДК 537.533.2
<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-1-69-79>

Вакуумно-плазменные процессы при экстремальной полевой эмиссии в алмазграфитовых источниках электронов

Р. К. Яфаров¹✉, Д. В. Нефедов¹, А. В. Сторублев²

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

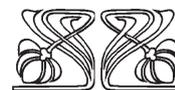
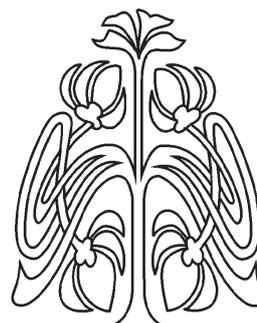
²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, заведующий лабораторией субмикронной электронно-ионной технологии, pirpc@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6678-511X>

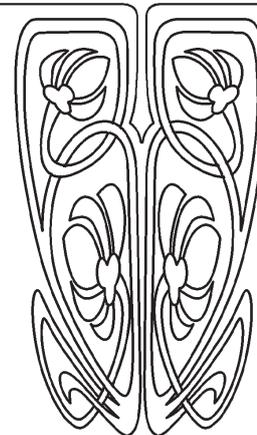
Нефедов Денис Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории субмикронной электронно-ионной технологии, nefedov_dv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8695-5777>

Сторублев Антон Вячеславович, младший научный сотрудник кафедры физики твердого тела, storublevav@almaz-rpe.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5376-2859>

Аннотация. Для создания элементной базы вакуумной микроэлектроники и высоко-точных автоэмиссионных катодов, применяемых для устройств генерации сигналов СВЧ и субтерагерцового диапазонов, одним из перспективных материалов являются наногуглеродные пленочные структуры. Известно, что функционирование высоко-точных автоэмиссионных катодов сопровождается рядом сопутствующих явлений, которые влияют на стабильность и долговечность их работы, в частности приводят к возникновению неуправляемых режимов эксплуатации. Поэтому исследование причин, приводящих к возникновению данных режимов, и возможности создания более стабильных и долговечных полевых источников электронов на основе таких катодов является актуальной задачей. Цель – исследование: а) возможности создания высоко-точных полевых источников электронов на основе тонкопленочных планарно-торцевых наноалмазграфитовых структур, удовлетворяющих различным схемотехническим требованиям; б) причин возникновения неуправляемых режимов эксплуатации, приводящих к изменению вольт-амперных характеристик. В результате проведенных исследований был установлен различный характер вакуумно-плазменных процессов при экстремальной полевой эмиссии в алмазграфитовых источниках электронов с различным поверхностным сопротивлением используемых углеродных пленочных структур. В случае низкоомных высоко-точных планарно-торцевых автоэмиссионных структур основным характером разрушения является возникновение на катоде «сетки» электротепловых пробоев, характерных для тонких диэлектрических покрытий при протекании скользящего поверхностного электрического разряда. В случае высокоомных алмазграфитовых пленочных структур основным характером разрушения при экстремальных режимах эксплуатации является эрозия той



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





области, откуда происходит эмиссия электронов. Установлено, что при превышении напряженности поля в зазоре между катодом и анодом определенной величины возникают катодное свечение и самопроизвольные увеличения полевого тока. Процесс сопровождается напылением атомов углерода на анод и в межэлектродный промежуток. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования долговечности и стабильности сильноточных полевых источников электронов на основе алмазографитовых пленочных структур в зависимости от их конструкции, электрофизических характеристик и вакуумных условий эксплуатации.

Ключевые слова: сильноточная полевая эмиссия электронов, наноуглеродный композит, алмазные кристаллиты, катодный факел, катодное распыление

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10033) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-38-90216).

Для цитирования: Яфаров Р. К., Нефедов Д. В., Сторублев А. В. Вакуумно-плазменные процессы при экстремальной полевой эмиссии в алмазографитовых источниках электронов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 69–79. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-1-69-79>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Article

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-1-69-79>

Vacuum-plasma processes at extreme field emission in diamond electron sources

R. K. Yafarov¹✉, D. V. Nefedov¹, A. V. Storublev²

¹Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya St., Saratov 410019, Russia

²Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Ravil K. Yafarov, pirpc@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6678-511X>

Denis V. Nefedov, nefedov_dv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8695-5777>

Anton V. Storublev, storublevav@almaz-rpe.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5376-2859>

Abstract. Background and Objectives: The use of high-current field electron sources that satisfy various circuitry requirements as a part of electronic devices for various purposes suggests the possibility of matching their operation modes with the operating characteristics of the devices, as well as high reproducibility of emission parameters, stability and the necessary resource of reliability and durability. The stability and durability of field electron sources are extremely sensitive to the changes in the geometry of emission centers and to the state of their surface, which undergoes various destructive influences during operation. These changes are especially important in the case of high-current field-emission cathodes, which, as a rule, work under conditions of technical vacuum and high electric field intensities. The aim of the work was to study the possibility of creating field sources of electrons based on thin-film planar-end nanodiamond-graphite structures that satisfy various circuit requirements, as well as to study fundamental factors that lead to a change in their I–V characteristics and limit the maximum value of their field emission currents, stability and durability of high-current field emission. **Materials and Methods:** Emission structures were made of carbon films deposited in a microwave plasma of a low pressure gas discharge. The surface resistance of the films was 120 kOhm/□ and 1.2 mOhm/□. In the first type of emission structure, diamond-graphite films were mechanically separated into two parts. One part of the film was the cathode, the second served as the anode. Measurement of field emission characteristics in vacuum $(2-4) \cdot 10^{-3}$ Pa. Between the cathode and the anode, voltage pulses with a duration of 10 μs and an amplitude of 0 to 3000 V were applied. In the second type of emission structure, field emission was carried out from the end face of a diamond-graphite film deposited on a polycor substrate. Field emission-voltage characteristics were measured in constant electric fields. Determination of the elemental composition of the surfaces of field emission structures after electrical tests was carried out using an energy dispersive microanalysis system. **Results:** It is shown that the steepness of the current-voltage characteristics, as well as the stability and durability in extreme operating conditions of high-current field electron sources based on film diamond-graphite nanocomposites, is determined by their surface resistance. Electron field sources based on low-resistance diamond-graphite structures, in comparison with high-resistance, have a high slope of the I–V characteristic, a lower threshold for the field intensity at the beginning of field emission, and the maximum field emission current is achieved at a lower electric field strength. The range of operating voltages providing the same maximum field emission current is many times higher for high-impedance electron sources than for low-impedance ones. The various nature of vacuum-plasma processes is established for extreme field emission in diamond-graphite electron sources with different surface resistance. In the case of low-resistance diamond-graphite composite film structures under extreme operating conditions of high-current planar-face autoemission structures, the main reasons for the instability of the emission and destruction parameters are the appearance of electrothermal breakdowns at the cathode of the “grid” characteristic of thin dielectric coatings during a sliding surface electric discharge. In the case of high-resistance diamond-graphite film structures, there is no branched network of electrothermal electrical breakdowns. In this case, as well as for high-current end field emission structures, the main nature of destruction under extreme operating conditions is erosion of the cathode part of the film. Erosion is caused by the processes of explosive electron emission, which is carried out from the nanodiamond emission centers of the composite carbon film structure with the appearance of a cathode plasma plume and the graphite component of the cathode material is sprayed onto the anode and into the interelectrode gap. **Conclusion:** The results can be used to predict the durability and stability of high-current field electron sources based on diamond-graphite film structures depending on their design, electrophysical characteristics, and vacuum operating conditions.

Keywords: high-current field emission of electrons, nanocarbon composite, diamond crystallites, cathode torch, cathode sputtering



Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 16-19-10033) and the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-38-90216).

For citation: Yafarov R. K., Nefedov D. V., Storublev A. V. Vacuum-plasma processes at extreme field emission in diamond electron sources. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics*, 2021, vol. 21, iss. 1, pp. 69–79 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-1-69-79>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Введение

Создание элементной базы вакуумной микроэлектроники и сильноточных автоэмиссионных катодов для устройств генерации сигналов СВЧ и субтерагерцового диапазонов является в настоящее время актуальной задачей [1], поскольку устройства, работающие на принципах автоэлектронной эмиссии, являются радиационно стойкими и обладают сверхвысоким быстродействием [2]. Одним из наиболее перспективных материалов для создания подобного типа устройств являются нанокремниевые пленочные структуры [3–7]. В работах [8, 9] с использованием неравновесной микроволновой плазмы паров этанола низкого давления определены области режимов для получения нанокремниевых пленочных покрытий, содержащих нанокремниевую и графитовую фазы в различных объемных соотношениях. Показано, что выбором режимов неравновесной конденсации алмазографитовых нанокремниевых композитов может быть получено снижение порога полевой эмиссии электронов с 15–17 до 4–6 В/мкм и увеличение плотности автоэмиссионного тока в импульсе микросекундной длительности свыше 100 А/см².

Использование полевых источников электронов в составе электронных устройств различного назначения предполагает возможность согласования режимов их эксплуатации с рабочими характеристиками устройств. Такими характеристиками, как правило, являются входное сопротивление, интервалы рабочих напряжений и величины автоэмиссионных токов. В связи с этим является актуальным создание сильноточных полевых источников электронов, удовлетворяющих различным схемотехническим требованиям.

Работа автоэмиссионных катодов (АЭК) сопровождается ионной бомбардировкой их поверхностей, адсорбцией и десорбцией ионов и молекул остаточных газов, поверхностной миграцией атомов и др. Стабильность и долговечность работы чрезвычайно чувствительна к изменению геометрии эмиссионных центров и к состоянию их поверхности [10]. В зависимости от конкретной конструкции и режима эксплуатации АЭК перечисленные процессы, порознь

или в некоторой совокупности, приводят к ряду эффектов, изменяющих режим его работы. К ним относятся: катодное распыление материала эмиттера, изменение количества и расположения эмиссионных микровыступов, изменение работы выхода электронов, разогрев катода и электромеханические напряжения [11]. Особенно важными эти изменения являются в случае сильноточных АЭК, которые, как правило, работают в условиях технического вакуума и высоких напряженностей электрических полей.

Как показывает практика, особенностью сильноточной автоэмиссии нанокремниевых автокатодов является высокая крутизна ее вольт-амперной характеристики (ВАХ) [8, 9]. Вследствие этого при изменении режима работы полевого источника электронов, функционирующего в составе электронного устройства, а также в результате флуктуации амплитуды напряженности внешнего электрического поля возможен переход устойчивой сильноточной эмиссии в кратковременный неуправляемый режим эксплуатации [12], который, как правило, сопровождается прекращением автоэмиссии. При повторном включении данного электронного устройства автоэмиссионные характеристики полевого источника и режим работы устройства могут кардинально изменяться. В ряде случаев это делает невозможным дальнейшее использование данного электронного устройства [13, 14].

Целью работы являлось исследование возможности создания сильноточных полевых источников электронов на основе тонкопленочных планарно-торцевых нанокремниевых структур, удовлетворяющих различным схемотехническим требованиям, а также исследование причин возникновения неуправляемых режимов эксплуатации, приводящих к изменению их ВАХ и ограничивающих максимальную величину их автоэмиссионных токов.

Материалы и методы

Изготовление эмиссионных структур производилось путем осаждения углеродных пленок на стеклянные и поликорковые подложки при разложении паров этанола в СВЧ плазме газового



разряда низкого давления (рис 1). Параметры осаждения пленок приведены в [15]. Поверхностное сопротивление пленок составляло 120 кОм/□ и 1.2 мОм/□, их толщина – около 100 нм. В одной конструкции эмиссионной структуры алмазграфитовые пленки механическим образом разделялись на две части. Зазор между частями пленки составлял 40–50 мкм. Одна часть пленки являлась катодом, на вторую часть подавался положительный потенциал, и она выполняла роль анода (рис. 1, а). Измерение автоэмиссионных характеристик таких структур производилось в условиях технического вакуума $(2-4) \cdot 10^{-3}$ Па. Между

катодом и анодом с высоковольтного характеристографа Эрбий-7176 (ООО «Эрбий», Россия) подавались импульсы напряжения длительностью 10 мкс и амплитудой от 0 до 3000 В. Порог начала эмиссии определялся напряженностью поля, при которой фиксировался автоэмиссионный ток величиной 8 мкА.

В другой конструкции эмиссионной структуры автоэмиссия производилась с торца алмазграфитовой пленки, осажденной на поликоробовую подложку по той же технологии (рис. 1, б). Измерения автоэмиссионных ВАХ проводились в стационарных электрических полях.

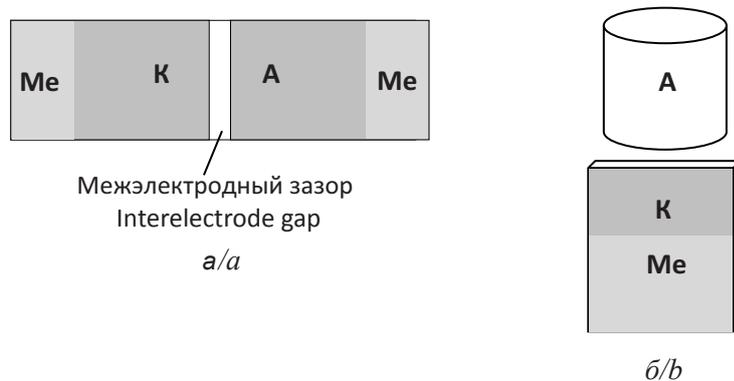


Рис. 1. Схемы планарно-торцевой (а) и торцевой (б) эмиссионных структур на основе алмазграфитовых пленочных композитов: К – катод, А – анод, Ме – металлический контакт

Fig. 1. Schemes of planar-end (a) and end (b) diamond-graphite film structures: К – cathode, А – anode, Ме – metal contact

Определение элементного состава поверхностей планарно-торцевых автоэмиссионных структур после электрических испытаний проведено в лаборатории диагностики наноматериалов и структур Образовательного-научного института наноструктур и биосистем Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского. Использовался автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп MIRA 2 LMU (Tescan, Чехия), оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350. Чувствительность детектора INCA Energy составляла 133 эВ/10 мм², что позволяет анализировать химические элементы от бериллия до плутония.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) планарно-торцевых автоэмиссионных структур на основе алмазграфитовых пленочных структур с различными поверхност-

ными сопротивлениями. Можно видеть, что для полевых источников электронов, изготовленных на основе низкоомных алмазграфитовых пленочных структур, напряженность поля начала автоэмиссии составляет около 10 В/мкм. Максимальный допробойный ток I_{\max} достигает 4 мА при напряженности электрического поля 12 В/мкм. Диапазон рабочих напряжений ΔU , который определялся как разность между напряжением, при котором был получен I_{\max} , и напряжением поля начала автоэмиссии, составляет около 350 В. В этом диапазоне напряжений эмиссионная структура показывает стабильную автоэмиссию.

Для полевых источников электронов, изготовленных на основе высокоомных алмазграфитовых пленочных структур, напряженность поля начала автоэмиссии составляет около 24 В/мкм. I_{\max} достигает 4 мА при напряженности порядка 70 В/мкм. Дальнейшее увеличение напряженности поля не приводит к существенному росту тока, но приводит к видимым искровым пробоям

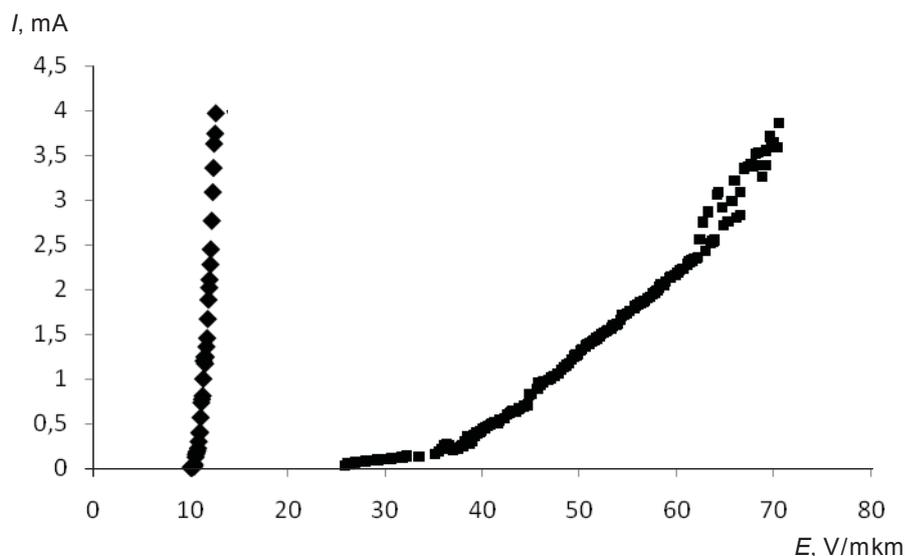


Рис. 2. Зависимость тока эмиссии от напряженности электрического поля для планарно-торцевых алмазграфитовых автоэмиссионных пленочных структур с различными поверхностными сопротивлениями: ◆ – 120 кОм/□; ■ – 1,2 мОм/□

Fig. 2. Dependence of the emission current on the electric field strength for planar-end diamond-graphite field-emission film structures with various surface resistances: ◆ – 120 kOhm/□; ■ – 1.2 mOhm/□

между катодом и анодом. Для высокоомных источников электронов ΔU , в которых структура обеспечивает устойчивую автоэмиссию, составляет 1500 В.

На рис. 3 приведены типичные картины разрушений сплошности катодных частей планарно-торцевых эмиссионных структур, изготовленных на основе наноалмазграфитовых тонкопленочных композитов с различным поверхностным сопротивлением. Изображения получены после возникновения нескольких неустойчивостей

полевой эмиссии, вызванных приложением импульсов анодных напряжений с возрастающей амплитудой. Установлено, что для низкоомного образца после каждого возникновения режима неустойчивости характерно появление на катодной части пленки «сетки» (см. рис. 3, а), которая напоминает фигуры Лихтенберга. Последние возникают на поверхности диэлектрика в ходе протекания скользящего поверхностного электрического разряда [16] и, как правило, наблюдаются при электротепловом пробое тонких диэлектри-

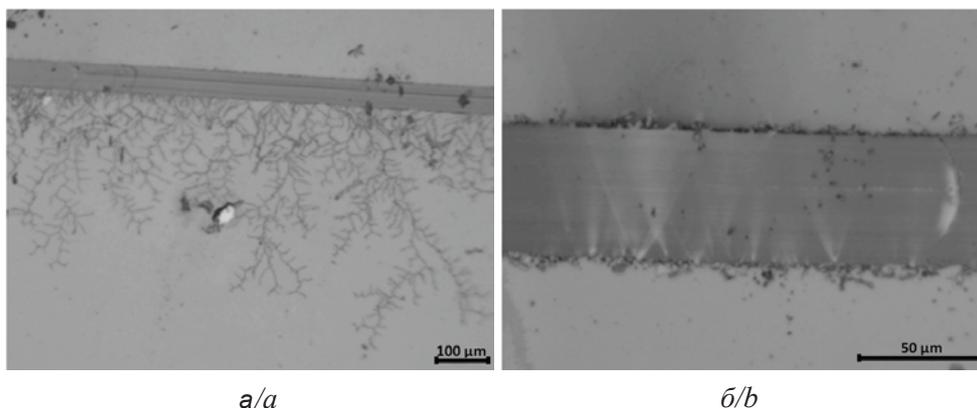


Рис. 3. Изображения участков разрушений катодных областей низкоомной (а) и высокоомной (б) алмазграфитовых пленочных структур при возникновении режимов неустойчивой автоэмиссии

Fig. 3. Images of areas of destruction of the cathode regions of low-resistance (a) and high-resistance (b) diamond-graphite film structures during the occurrence of unstable field emission modes



ческих покрытий. При каждом последующем возникновении неустойчивой автоэмиссии фактическое расстояние между эмитирующими выступами катода и анодом увеличивается, что является результатом разрушения эмитирующих выступов и потери токоподводов к частям катодной пленки, которые расположены вблизи

межэлектродного промежутка при возникновении сетки каналов электротепловых пробоев. Это приводит к уменьшению напряженности электрического поля в зазоре между анодной и катодной частями пленочной структуры и, как следствие, увеличению напряженностей полей начала автоэмиссии (рис. 4).

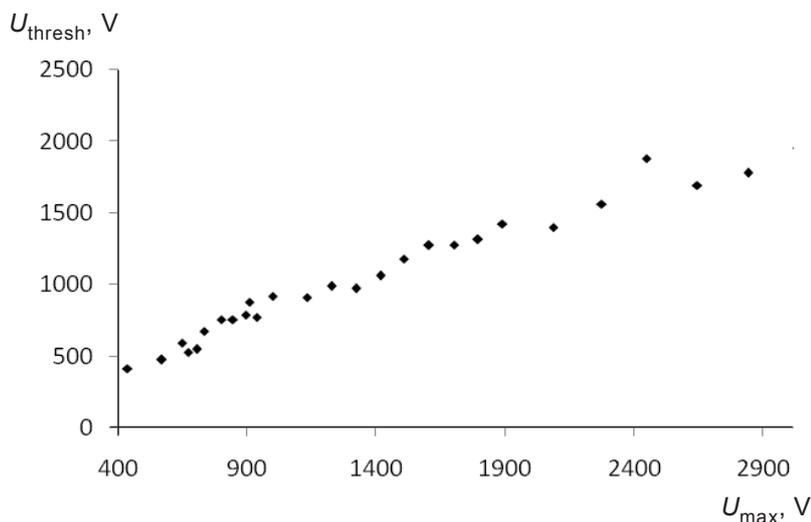


Рис. 4. Зависимость пороговых напряжений от максимального напряжения, приложенного к автоэмиссионной структуре после возникновений электротепловых пробоев

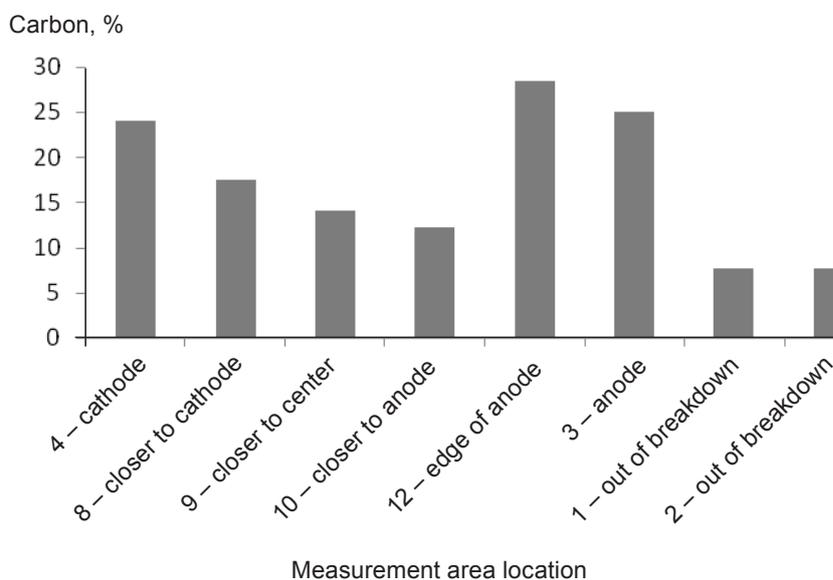
Fig. 4. Dependence of the threshold voltage on the maximum voltage applied to the structure

В случае высокоомных образцов разветвленная сетка электротепловых электрических пробоев отсутствует (см. рис. 3, б). В них при импульсном воздействии сильным электрическим полем в результате возникновения кратковременной неустойчивости с резким выбросом автоэмиссионного тока и последующим прекращением автоэмиссии наблюдается появление следов эрозии в виде конусов (рис. 5, а). Вершины конусов находятся в катодной части пленки. Образующиеся конусы различаются величиной угла при их вершинах и интенсивностью эрозионного воздействия по высоте. Было сделано предположение, что появление следов эрозии обусловлено процессами взрывной эмиссии электронов с возникновением факелов катодной плазмы [17, 18] и адсорбцией материала катода в межэлектродном промежутке. Для подтверждения гипотезы, представляющей большой практический и фундаментальный интерес, проведено исследование элементного состава частей эмиссионной планарно-торцевой структуры, который позволил установить распределение углеродной компоненты по ее поверхности.

На рис. 5, б показано распределение содержания углерода по высоте одного из эрозионных конусов, приведенных на рис. 5, а для планарно-торцевой структуры на основе высокоомной алмазграфитовой пленки. Данное распределение получено после измерения ВАХ в импульсном режиме, завершившегося возникновением кратковременной неустойчивости с резким выбросом автоэмиссионного тока и последующим прекращением автоэмиссии. Можно видеть, что при одинаковом содержании углеродной фазы на катодной и анодной частях пленки (области 3, 4 на рис. 5, а и фиг. 3, 4 на рис. 5, б) наблюдается ее уменьшение в диэлектрическом зазоре на стекле в направлении от катода к аноду (области 8–10 на рис. 5, а и фиг. 8–10 на рис. 5, б). На краю анодной части содержание углеродной компоненты выше, чем в исходной пленке (фиг. 12, рис. 5, б). Вне эрозионных конусов содержания углеродных фаз в диэлектрическом зазоре имеют минимальные значения (области 1, 2 на рис. 5, а и элементы гистограммы 1, 2 на рис. 5, б).



a/a



b/b

Рис. 5. Участок высокоомной планарно-торцевой алмазграфитовой автоэмиссионной структуры с указанием областей проведения элементного анализа (а); гистограмма распределения углеродной фазы в различных областях автоэмиссионной структуры (б)

Fig. 5. Plot of a high-resistance planar-end diamond-graphite field emission structure indicating the areas of elemental analysis (a); histogram of the distribution of the carbon phase in various areas of the field emission structure (b)

Исследования сильноточной полевой эмиссии электронов в торцевых автокатодах на основе нанокompозитных алмазграфитовых пленочных структур проводились в вакуумной камере при остаточном давлении $(3-4) \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. В экспериментах использовался источник питания постоянного тока с пошаговым

подъёмом напряжения и выдержкой на каждом напряжении по 5–10 мин в случаях, когда величина тока была нестабильной. Этого времени, как правило, хватало для протекания процессов формовки катода. Установлено, что при превышении напряженности электрического поля в зазоре между катодом и анодом 35 В/мкм



наблюдалось появление свечения белого цвета вдоль всего торца алмазографитовой пленки. В стационарном поле свечение поддерживается длительное время. При увеличении напряжения и тока интенсивность свечения продолжала возрастать. На рис. 6 приведено изображение свечения

при токе эмиссии 4.5 мА и напряженности поля около 43 В/мкм. Как показали расчеты, при длине торца эмитирующей пленки 5 мм и толщине около 100 нм усредненная по площади торца пленки плотность эмиссионного тока составила около 900 А/см².



Рис. 6. Катодное свечение при автоэмиссионном токоотборе 900 А/см²
Fig. 6. Cathode luminescence at field emission current sampling 900 А/см²

При дальнейшем увеличении напряженности поля и достижения величины автоэмиссионного тока 5.8 мА наблюдался самопроизвольный его рост при неизменном напряжении источника питания. В начальный момент ток возрастал медленно, со временем скорость роста увеличивалась. За 5–7 мин ток достигал величины около 10 мА. Одновременно с самопроизвольным ростом тока отмечалось повышение остаточного давления в

измерительном вакуумном устройстве. При росте тока от 5.8 до 10 мА давление увеличилось с $3 \cdot 10^{-7}$ до $7 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.

Во избежание возникновения в измерительном устройстве дугового вакуумно-плазменного разряда и возможного разрушения автокатода путем поэтапного снижения напряжения была замерена вольт-амперная характеристика источника электронов (рис. 7, а).

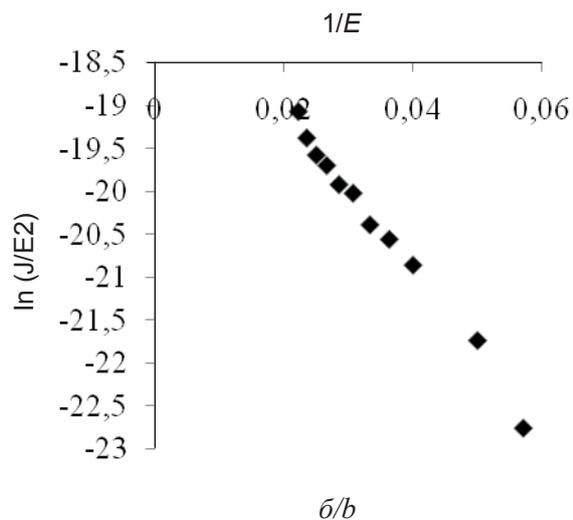
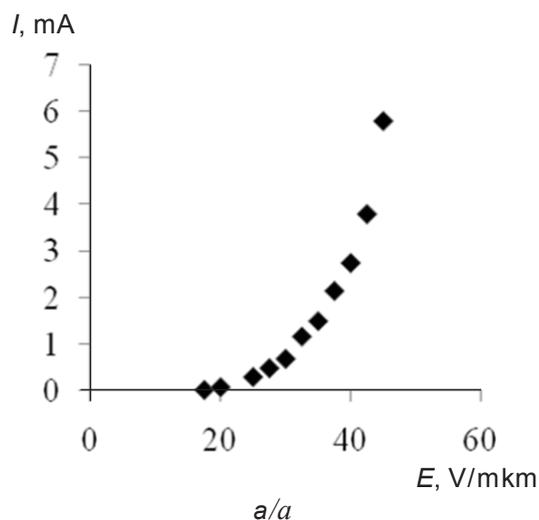


Рис. 7. Зависимость тока от напряженности электрического поля торцевого автоэмиссионного катода на основе наноалмазографитовой пленочной структуры: а – в линейных координатах; б – в координатах Фаулера – Нордгейма
Fig. 7. Current dependence on the electric field strength of the end field emission cathode based on a nanodiamond graphite film structure: a – in linear coordinates; b – in Fowler – Nordheim coordinates



Линейный характер ВАХ в координатах Фаулера и Нордгейма (рис. 7, б) позволяет заключить, что в исследованном диапазоне напряженностей электрических полей ток между катодом и анодом является автоэмиссионным [19]. Термоэмиссия, несмотря на появление катодного свечения, не вносит значимого вклада в измеренную токовую характеристику.

С целью выяснения природы свечения после экспериментов и демонтажа вакуумного измерительного устройства проведены исследования поверхности металлического анода (рис. 8 – полоса чистого металла на поверхности анода соответствовала расположению торца поликоровой подложки, слева от нее, где наблюдалось наибольшее потемнение поверхности анода, располагалась сторона подложки с нанесенной пленкой алмазографита). Изучение элементного состава в областях потемнения поверхности анода показало наличие в них углеродной фазы.

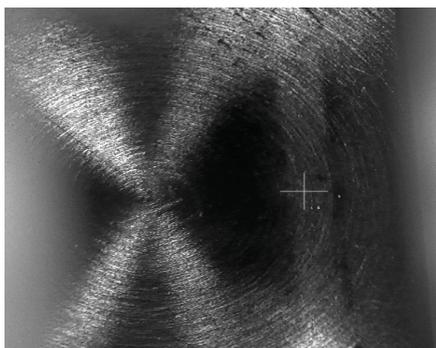


Рис. 8. Изображение поверхности анода после проведения эксперимента по сильноточной автоэмиссии

Fig. 8. Image of the surface of the anode after the experiment on high-current field emission

Полученные результаты могут быть интерпретированы следующим образом. Как показано в работах [8, 9], алмазографитовые пленочные композиты представляют собой графитовые матрицы с погруженными в них алмазными нанокристаллитами. Последние имеют размеры не только меньше длины дебаевского экранирования, что способствует улучшению поверхностной проводимости наноалмазов, но и обеспечивают их квантово-размерными свойствами. Возникающее квантовое ограничение в алмазных нанокристаллах увеличивает собственные (нулевые) энергии электронов и прозрачности потенциального барьера для их туннелирования при автоэлектронной эмиссии. Вместе с тем алмазные

нанокристаллиты на поверхности графитовой матрицы устойчивы к разогреву и имеют очень малый радиус кривизны. Вследствие этого они являются естественными элементами, усиливающими напряженность электрического поля. Перепад между средним минимальным и максимальным радиусами кривизны эмитирующих выступов, полученных в одном технологическом цикле, не велик. Поэтому эффективная эмитирующая поверхность занимает большую часть поверхности пленки. Благодаря этим свойствам, в соответствии с представлениями Фаулера – Нордгейма обеспечиваются высокие плотности токов автоэмиссии и их устойчивость, последняя из которых реализуется, как уже говорилось, в условиях интенсивных ионной бомбардировки и тепловыделений.

Наличие углеродной фазы на поверхности анода свидетельствует о распылении атомов углерода с поверхности алмазографитового катода. Вероятнее всего, распылению подвергается графитовая компонента алмазографитовой матрицы. Об этом может свидетельствовать высокая устойчивость и непрерывность измеренной ВАХ, которая в предположении автоэмиссии не только с алмазных нанокристаллитов, но и графитовых микровыступов, могла бы претерпевать существенные трансформации. Преимущественное распыление графитовой фазы, находящейся в окружении алмазных нанокристаллитов, обусловлено более низкой теплопроводностью графита и, как следствие, более высокими температурой нагрева и коэффициентом ионного распыления. Распыленные атомы углерода ионизируются в сильном электрическом поле, образуя при рекомбинации в потоке полевых электронов светящиеся вакуумно-плазменные катодные факелы, вершинами которых являются наноалмазные эмиссионные центры [20].

Заключение

Крутизна ВАХ, а также характер разрушений в экстремальных режимах эксплуатации сильноточных полевых источников электронов на основе пленочных алмазографитовых наноконкомпозитов определяется их поверхностным сопротивлением. Полевые источники электронов на основе низкоомных алмазографитовых структур, по сравнению с высокоомными, имеют высокую крутизну ВАХ, более низкий порог напряженности поля начала автоэмиссии, а максимальный автоэмиссионный ток достигается при меньшей напряженности электрического поля. Диапазон



рабочих напряжений, обеспечивающий одинаковый максимальный автоэмиссионный ток, у высокоомных источников электронов в разы больше, чем у низкоомных. Эти различия позволяют использовать алмазграфитовые пленочные структуры при конструировании электронных устройств с различными схемотехническими требованиями к применяемым в них автоэмиссионным катодам.

Установлен различный характер вакуумно-плазменных процессов при экстремальной полевой эмиссии в алмазграфитовых источниках электронов с различным поверхностным сопротивлением используемых углеродных пленочных структур. В случае низкоомных алмазграфитовых композитных пленочных структур в экстремальных режимах эксплуатации сильноточных планарно-торцевых автоэмиссионных структур основным характером разрушения является возникновение на катоде «сетки» электротепловых пробоев, характерных для тонких диэлектрических покрытий при протекании скользящего поверхностного электрического разряда.

В случае высокоомных алмазграфитовых пленочных структур сильноточных планарно-торцевых полевых источников электронов разветвленная сетка электротепловых электрических пробоев отсутствует. В этом случае, так же как для сильноточных торцевых автоэмиссионных структур, основным характером разрушения при экстремальных режимах их эксплуатации является эрозия катодной части пленки в той области, откуда происходит эмиссия электронов. Эрозия обусловлено процессами взрывной эмиссии электронов, которая осуществляется с наноалмазных эмиссионных центров композитной углеродной пленочной структуры с возникновением факела катодной плазмы и распылением графитовой компоненты материала катода на анод и в межэлектродный промежуток.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования долговечности и стабильности сильноточных полевых источников электронов на основе алмазграфитовых пленочных структур в зависимости от их конструкции, электрофизических характеристик и вакуумных условий эксплуатации.

Список литературы

1. Jun Zhang, Dian Zhanga, Yuwei Fan, Juntao He, Xingjun Ge, Xiaoping Zhang, Jinchuan Ju, Tao Xun. Progress in narrowband high-power microwave sources featured // *Physics of Plasmas*. 2020. Vol. 27. P. 010501. DOI: 10.1063/1.5126271
2. Mittal G., Lahiri I. Recent progress in nanostructured next-generation field emission devices // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2014. Vol. 47. P. 323001. DOI: 10.1088/0022-3727/47/32/323001
3. Фурсей Г. Н., Поляков М. А., Кантонистов А. А., Яфясов А. М., Павлов Б. С., Божевольнов В. Б. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур // *ЖТФ*. 2013. Т. 83, вып. 6. С. 71–77.
4. Panda K., Hyeok J. J., Park J. Y., Sankaran K. J., Balakrishnan S., Lin I. N. Nanoscale investigation of enhanced electron field emission for silver ion implanted/post-annealed ultrananocrystalline diamond films // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. 16325. DOI: 10.1038/s41598-017-16395-1
5. Sobaszek M., Siuzdak K., Ryl J., Sawczak M., Gupta S., Carrizosa S. B., Ficek M., Dec B., Darowicki K., Bogdanowicz R. Diamond Phase (sp³-C) Rich Boron-Doped Carbon Nanowalls (sp²-C) : Physicochemical and Electrochemical Properties // *J. Phys. Chem. C*. 2017. Vol. 121, № 38. P. 20821. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b06365
6. Яфаров П. К., Новиков П. Е., Еремин В. П., Кочнев Д. О. Исследование возможности создания автоэмиссионного катода для безнакального магнетрона на основе алмазграфитового нанокompозита // *Вопр. электро-технологии*. 2018. № 2. С. 62–71.
7. Гуляев Ю. В., Абаньшин Н. П., Горфинкель Б. И., Морев С. П., Резчиков А. Ф., Сеницын Н. И., Якунин А. Н. Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39, вып. 11. С. 63–70.
8. Яфаров П. К., Шаныгин В. Я., Нефедов Д. В. Алмазграфитовый нанокompозит для сильноточной полевой эмиссии электронов // *Докл. VI Всерос. микроволновой конф. М.*, 2018. С. 142–146.
9. Яфаров П. К., Шаныгин В. Я., Нефедов Д. В. Углеродный пленочный нанокompозит для сильноточных полевых источников электронов // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика*. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 68–75. DOI: 10.18500/1817-3020-2019-19-1-68-75
10. Ye Hua, Hong Wan, Xingyu Chen, Bin Chen, Ping Wu, Shuxin Bai. Influence of Surface Microstructures on Explosive Electron Emission Properties for Graphite Cathodes // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45, iss. 6. P. 959–968. DOI: 10.1109/TPS.2017.2703139
11. Filip V., Filip L. D., Hei Wong. Review on peculiar issues of field emission in vacuum nanoelectronic devices // *Solid-State Electronics*. 2017. Vol. 138. P. 3–15. DOI: 10.1016/j.sse.2017.09.010
12. Amitava Roy, Ankur Patel, Rakhee Menon, Archana Sharma, Chakravarthy D. P., Patil D. S. Emission properties of explosive field emission cathodes // *Physics of Plasmas*. 2011. Vol. 18. P. 103108. DOI: 10.1063/1.3646361
13. Jun Bing Chuan, Hong Wan, Jie Yang, Fan Zhou. Microstructure Characterization of Graphite Cathodes for Explosive Field-Emission // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 248. P. 268–273. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.248.268
14. Guozhi Liu, Jun Sun, Hao Shao, Changhua Chen, Xiaowei Zhang. Research on an improved explosive emission cathode // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42. P. 125204. DOI: 10.1088/0022-3727/42/12/125204



15. Суздальцев С. Ю., Шаныгин В. Я., Яфаров Р. К. Исследования автоэмиссионного диода с тангенциальным токоотбором из тонкопленочного наноалмазграфитового эмиттера // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 11. С. 84–91.
16. Катцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. 2-е изд. М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950. 836 с.
17. Shiffler D., Ruebush M. Emission uniformity and emission area of explosive field emission cathodes // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 79. P. 2871. DOI: 10.1063/1.1415408
18. Fan Zhou, Hong Wan, Junbing Chuan, Shuxin Bai, Jie Yang. Explosive electron emission from a surface-modified carbon/carbon composite cathode // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. Vol. 46. P. 305203. DOI: 10.1088/0022-3727/46/30/305203
19. Fowler R. H., Nordheim L. W. Electron emission in intense electric fields // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1928. Vol. 119. P. 173–181.
20. Месля Г. А. Взрывная электронная эмиссия. М.: Физматлит, 2011. 280 с.
- New solutions for designing promising devices based on low-voltage field emission from carbon nanostructures. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, pp. 525–528. DOI: 10.1134/S1063785013060035
8. Yafarov R. K., Shanygin V. Ya., Nefedov D. V. Diamond-graphite nanocomposite for high-current field emission of electrons. *Doklady VI Vserossiyskoy mikrovolnovoy konferentsii* [Papers of the VI All-Russian Microwave Conference]. Moscow, 2018, pp. 142–146 (in Russian).
9. Yafarov R. K., Shanygin V. Y., Nefedov D. V. Carbon film nanocomposite for high-current field sources of electrons. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics*, 2019, vol. 19, iss. 1, pp. 68–75 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2019-19-1-68-75
10. Ye Hua, Hong Wan, Xingyu Chen, Bin Chen, Ping Wu, Shuxin Bai. Influence of Surface Microstructures on Explosive Electron Emission Properties for Graphite Cathodes. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, iss. 6, pp. 959–968. DOI: 10.1109/TPS.2017.2703139
11. Filip V., Filip L. D., Hei Wong. Review on peculiar issues of field emission in vacuum nanoelectronic devices. *Solid-State Electronics*, 2017, vol. 138, pp. 3–15. DOI: 10.1016/j.sse.2017.09.010
12. Amitava Roy, Ankur Patel, Rakhee Menon, Archana Sharma, Chakravarthy D. P., Patil D. S. Emission properties of explosive field emission cathodes. *Physics of Plasmas*, 2011, vol. 18, pp. 103108. DOI: 10.1063/1.3646361
13. Jun Bing Chuan, Hong Wan, Jie Yang, Fan Zhou. Microstructure Characterization of Graphite Cathodes for Explosive Field-Emission. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 248, pp. 268–273. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.248.268
14. Guozhi Liu, Jun Sun, Hao Shao, Changhua Chen, Xiaowei Zhang. Research on an improved explosive emission cathode. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, vol. 42, pp. 125204. DOI: 10.1088/0022-3727/42/12/125204
15. Suzdal'tsev S. Yu., Shanygin V. Ya., Yafarov R. K. Field-emission diode with tangential current takeoff from thin-film nanodiamond/graphite emitter. *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, iss. 11, pp. 534–537.
16. Kaptsov N. A. *Elektricheskiye yavleniya v gazakh i vakuume* [Electrical phenomena in gases and vacuum]. Moscow, Leningrad, Gos. izd-vo tekhn.-teoret. lit., 1950. 836 p. (in Russian).
17. Shiffler D., Ruebush M. Emission uniformity and emission area of explosive field emission cathodes. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, vol. 79, pp. 2871. DOI: 10.1063/1.1415408
18. Fan Zhou, Hong Wan, Junbing Chuan, Shuxin Bai, Jie Yang. Explosive electron emission from a surface-modified carbon/carbon composite cathode. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2013, vol. 46, pp. 305203. DOI: 10.1088/0022-3727/46/30/305203
19. Fowler R. H., Nordheim L. W. Electron emission in intense electric fields. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1928, vol. 119, pp. 173–181.
20. Mesyats G. A. *Vzryvnaya elektronnyaya emissiya* [Explosive electron emission]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 280 p. (in Russian).

References

1. Jun Zhang, Dian Zhanga, Yuwei Fan, Juntao He, Xingjun Ge, Xiaoping Zhang, Jinchuan Ju, Tao Xun. Progress in narrowband high-power microwave sources featured. *Physics of Plasmas*, 2020, vol. 27, pp. 010501. DOI: 10.1063/1.5126271
2. Mittal G., Lahiri I. Recent progress in nanostructured next-generation field emission devices. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, vol. 47, pp. 323001. DOI: 10.1088/0022-3727/47/32/323001
3. Fursey G. N., Polyakov M. A., Cantonistov A. A., Yafarov A. M., Pavlov B. S., Bozhevolnov V. B. Auto-electronic and explosive emission from graphene-like structures. *Technical Physics*, 2013, vol. 83, iss. 6, pp. 71–77 (in Russian).
4. Panda K., Hyeok J. J., Park J. Y., Sankaran K. J., Balakrishnan S., Lin I. N. Nanoscale investigation of enhanced electron field emission for silver ion implanted/post-annealed ultrananocrystalline diamond films. *Sci. Reports*, 2017, vol. 7, pp. 16325. DOI: 10.1038/s41598-017-16395-1
5. Sobaszek M., Siuzdak K., Ryl J., Sawczak M., Gupta S., Carrizosa S. B., Ficek M., Dec B., Darowicki K., Bogdanowicz R. Diamond Phase (sp³-C) Rich Boron-Doped Carbon Nanowalls (sp²-C): Physicochemical and Electrochemical Properties. *J. Phys. Chem. C*, 2017, vol. 121, no. 38, pp. 20821. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b06365
6. Yafarov R. K., Novikov P. E., Eremin V. P., Kochnev D. O. Investigation of the possibility of creating an field emission cathode for a non-incised magnetron based on a diamond graphite nanocomposite. *Voprosyi yelektrotekhnologii* [Questions of Electrotechnology], 2018, no. 2, pp. 62–71 (in Russian).
7. Gulyaev Yu. V., Aban'shin N. P., Gorfinkel' B. I., Morav S. P., Rezchikov A. F., Sinitsyn N. I., Yakunin A. N.

Поступила в редакцию 17.06.2020, после рецензирования 10.09.2020, принята к публикации 30.09.2020
 Received 17.06.2020, revised 10.09.2020, accepted 30.09.2020