—— ДИАГНОСТИКА —

УДК 537.533.2

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК В ХОДЕ АКТИВАЦИИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

© 2024 г. Д. В. Нефедов^{а,} *, Н. О. Шабунин^b, Д. Н. Браташов^b

^аСаратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия ^bСаратовский национальный исследовательский государственный университет

> им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия *E-mail: nefedov_dv@rambler.ru Поступила в редакцию 25.10.2023 г. После доработки 10.11.2023 г. Принята к публикации 10.11.2023 г.

Изучено влияние токовой активации электрическим импульсным пробоем на изменения морфологии поверхности и эмиссионные характеристики автоэмиссионного катода, выполненного на основе углеродных пленок, полученных осаждением в СВЧ-плазме газового разряда. Была проведена токовая активация данных пленок при приложении импульсов напряжения микросекундной длительности до возникновения электрического пробоя. Показано, что в ходе активации происходит изменение морфологии поверхности пленки в области пробоя с образованием микроразмерной эмитирующей структуры, которая значительно улучшает автоэмиссионные характеристики катодов на основе углеродных пленок.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, тонкопленочные автоэмиссионные катоды, углеродные пленки, активация пробоем

DOI: 10.31857/S0544126924010026

1. ВВЕДЕНИЕ

Автоэмиссионные катоды на основе углерода являются одним из типов источников электронов. применяемых в различных устройствах, включая электронную микроскопию, источники рентгеновского излучения и плоские дисплеи. Одной из основных проблем при использовании углеродных материалов в качестве катодов является сложность в достижении высокой плотности тока автоэмиссии при сохранении длительного срока службы. Катоды на основе углеродных материалов имеют ряд преимуществ и могут широко применяться в вакуумной и твердотельной электронной промышленности [1]. Перспективность этих материалов обусловлена высокой стойкостью к ионной бомбардировке, которая имеет место в условиях технического вакуума, механической прочностью, технологичностью и доступностью получения [2], а также способностью к низковольтной эмиссии электронов [3].

В ряде случаев для старта автоэмиссии требуется проводить активацию поверхности углеродного катода с последующей ее тренировкой для достижения максимальных величин токов [4]. В частности,

для углеродных нанотрубок процесс активации может заключаться в частичном механическом улалении или полнятии с помошью клейкой ленты верхнего слоя разупорядочено ориентированных трубок, их резистивном нагреве, выпрямлении под лействием электрического тока или ионном облучении [5-8]. Способами активации других углеродных автоэмиссионных материалов могут являться термический отжиг, ионная бомбардировка, лазерное облучение и т.д. [9]. Например, в [10] было показано, что активация углеродных пленок отжигом при температуре до 800°С приводит к снижению порога начала эмиссии с 15 до 6 В/мкм. В алмазоподобных пленках необходимость первоначальной активации зависит от концентрации *sp*²-связей. Так, в пленках с низким значением sp^2 связанного углерода автоэмиссия возможна только после проведения активации, заключающейся в резком увеличении тока, при котором происходит вакуумный дуговой разряд между катодом и анодом [11]. В результате этой процедуры изменяется морфология пленки с образованием "бугорков" и проводящих *sp*²-каналов. Для пленок с высоким содержанием sp^2 -связей активации не требуется, а возможным способом увеличения автоэмиссионного тока



Рис. 1. Возникновение экстремального первоначального тока на образце с сопротивлением 29 кОм (a), начало протекания тока, точки — экспериментальные данные, сплошная линия — аппроксимация экспоненциальной зависимостью (δ).

является воздействие повышенным электрическим полем в течение продолжительного времени [12]. Также возможно проведение активационных процедур, направленных на формирование проводящих каналов, позволяющих локально усилить электрическое поле [13, 14].

Как правило, активация углеродных пленок для автоэмиссионных применений заключается в воздействии на углеродный материал сильных электрических полей, что приводит к первоначальному электрическому пробою, в результате которого происходит образование дефектов и функциональных групп на поверхности материала, после чего наблюдается уменьшение порога начала эмиссии и существенное увеличение автоэмиссионного тока [11]. Образование дефектов и функциональных групп приводит к улучшению автоэмиссионных свойств материала за счет снижения работы выхода и увеличения коэффициента усиления поля, т.е. токовая активация приводит к изменению морфологии и структуры эмитирующей поверхности, делая ее более развитой и обладающей пониженной работой выхода [12].

Наиболее эффективным является метод активации импульсным напряжением [15]. В данном случае процесс активации заключается в приложении к материалу катода коротких, продолжительностью от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд, импульсов высокого напряжения. В результате таких активационных процедур образуется эмитирующая микроструктура. Нестабильность автоэмиссионного тока, как правило, связана с разрушением эмитирующих элементов при воздействии критических пондеромоторных нагрузок и интенсивной ионной бомбардировки, ускоряющей разрушение поверхности катода. После включения микровыступа в работу начинается его постепенное разрушение ионами и полем, а его

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 № 1 2024

выход из строя возможен в результате постепенной усадки, либо после отрыва от катода или при возникновении взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ), что приводит к образованию и включению в работу новых микровыступов.

Целью работы являлось выявление влияния токовой активации электрическим импульсным пробоем на изменение морфологии поверхности и эмиссионные характеристики тонкопленочного углеродного катода.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс получения углеродных пленочных структур, использованных в данной работе, основан на разложении углеродосодержащего вещества (пары C_2H_5OH) в СВЧ-плазме с электронно-циклотронным резонансом. Осаждение осуществлялось на стеклянные подложки, давление паров рабочего вещества составляло 2.5×10^{-2} Па. Нагрев подложек производился до температуры (300 ± 10)°С. Толщина пленок уменьшалась в диапазоне от (200 ± 20) до (150 ± 10) нм при соответствующем росте поверхностного сопротивления, которое составляло 29, 72 и 230 кОм. Напряжение смещения на подложкодержателе в процессах плазмохимического осаждения составляло 300 В.

Экспериментальные исследования эмиссионных свойств углеродных пленочных структур производились на высоковакуумной установке УСУ-4 с непрерывной системой откачки. Образцы размещались в держателе карусельного типа, помещенного в установку, который через вакуумный ввод вращения позиционировался относительно молибденового анода диаметром 3 мм. Линейные перемещения анода производились через сильфонное соединение с помощью микрометрической

(a) (b)

Рис. 2. Оптическая микроскопия области первоначального пробоя (*a*) и электронная микроскопия участка первоначального пробоя с фокусировкой на поверхностных образованиях (*б*). Образец с сопротивлением 29 кОм.

подвижки с точностью до 1 мкм. В данной работе расстояние между катодом и анодом устанавливалось равным 40 мкм. Безмасляная система откачки осуществлялась с помощью магниторазрядного насоса, что позволяло получать внутри установки вакуум до 1×10^{-6} Па.

Измерение автоэмиссионных характеристик производилось в импульсном режиме с помощью характериографа Эрбий-7176 с источником питания Fug HCP 5000-3500, обеспечивающим амплитуду импульсов до 3500 В. Длительность импульсов была фиксированной и составляла 10 мкс, время между импульсами — 400 мс.

Исследование морфологии поверхности производилась с помощью оптического микроскопа "Биолам-М1" и автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU, производство фирмы Tescan в лаборатории диагностики наноматериалов и структур Образовательно-научного института наноструктур и биосистем Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Разрешающая способность микроскопа достигает 1 нм. Исследования проводились при уровне вакуума порядка 10⁻² Па.

Исследование спектров комбинационного рассеяния света производилось с помощью конфокального микроскопа комбинационного рассеяния света Renishaw inVia на длине волны лазера 785 нм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Токовая активация автоэмиссионного катода на основе углеродных пленок происходила в результате мгновенного возникновения экстремально высокого первоначального тока (рис. 1, *a*). При последующих измерениях ток катод—анод начинается



Рис. 3. Оптическая микроскопия области первоначального пробоя (*a*) и электронная микроскопия участка первоначального пробоя с фокусировкой на поверхностных образованиях (*б*). Образец с сопротивлением 230 кОм.

при меньшем напряжении и имеет характер близкий к экспоненциальному (рис. 1, δ).

В ходе оптической микроскопии было установлено, что при протекании первоначального тока экстремальной величины происходит нарушение целостности пленки (рис. 2, *a* и рис. 3, *a*) с появлением поверхностных образований, сформированных из исходной пленки (рис. 2, *б* и рис. 3, *б*).

Исследования структурных особенностей исходных пленок, проведенные методом Рамановской спектроскопии, и график отношения интенсивностей полос D и G показаны на рис. 4.

В ходе дальнейших измерений автоэмиссионных вольт-амперных характеристик (ВАХ) в каждой из исследуемых пленок при некотором критическом напряжении происходили электрические пробои, после которых снижался порог начала эмиссии (рис. 5, *a*), а максимальный ток существенно увеличивался по сравнению со структурой после активации (рис. 5, δ).

Вместе с этим существенно увеличивался размер области пробоя с соотвествующим увеличением числа поверхностных образований (рис. 6).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения исследований было обнаружено, что при токовой активации происходит пробой вакуумного промежутка с возникновением дугового разряда. Это явление можно наблюдать при первом измерении ВАХ (см. рис. 1, а), когда по мере увеличения напряжения анодный ток отсутствует, а при некотором критическом напряжении происходит мгновенное возникновение экстремально высокого первоначального тока со значениями, которые впоследствии не достигаются при нормальном режиме функционирования. В момент первоначального возникновения пробойного тока в месте расположения анода отмечались небольшие вспышки света. При этом имело место падение напряжения, что характерно для дугового разряда, для которого также свойственны высокая плотность тока и высокая концентрация заряженных частиц в прикатодной области, что и выразилось в мгновенном возникновении тока.

Как показывает оптическая микроскопия, возникновение дугового разряда приводит к нарушению целостности углеродной пленки (см. рис. 2, *a* и рис. 3, *a*) с возникновением поверхностных образований (см. рис. 2, *б* и рис. 3, *б*), которые выполняют роль эмиссионных центров (ЭЦ). Характер углеродных образований тесно связан с толщиной пленки. Так, для пленок относительно большой толщины и, как следствие, с низким сопротивлением (29 и 72 кОм) наблюдается образование лент с протяженными торцами, толщина которых лимитируется толщиной исходной пленки, а длина определяется прохождением дугового



Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния света для трех образцов с сопротивлениями: 1 - 29 кОм, 2 - 72 кОм, 3 - 230 кОм (*a*); отношение интенсивностей полос *D* и *G* (δ).

разряда (см. рис. 2, δ). В этом случаем эмиссия, по всей видимости, идет с торца ленты, обращенной к аноду. На пленке минимальной толщины наблюдается появление коротких, изрезанных торцов пленки, образовавшихся после возникновения электрического пробоя (см. рис. 3, δ).

Структурные исследования, проведенные с помощью Рамановской спектроскопии, показали, что спектры исследованных углеродных пленок имеют вид, характерный для углеродных материалов, содержащих включения нанокристаллического графита, как, например, описано в [16]. Отличия пленок различной толщины отражаются только в интенсивности *D*-полосы, отвечающей за разупорядоченность структуры. С ростом толщины пленки степень разупорядоченности снижается, а *G*-полоса имеет интенсивность, практически не зависящую от толщины пленки (см. рис. 4, *a*). Согласно отношению интенсивностей *I* полос *D* и *G* [17] продольный размер графитового нанокристаллита L_a снижается по мере роста отношения НЕФЕДОВ и др.



Рис. 5. ВАХ образцов различных сопротивлений до возникновения пробоев: 1 - 29 кОм, 3 - 72 кОм, 5 - 230 кОм, и после: 2 - 29 кОм, 4 - 72 кОм, 6 - 230 кОм (*a*); изменение максимального тока после пробоя в зависимости от сопротивления образца (*б*).

 $I_{\rm D}/I_{\rm G}$. В нашем случае с ростом сопротивления, т.е. с уменьшением толщины пленки, мы имеем увеличение $I_{\rm D}/I_{\rm G}$ (см. рис. 4, δ). Таким образом, для более тонкой пленки характерны менее протяженные графитовые кристаллиты. Это приводит к снижению эффекта усиления поля на элементах внутренней структуры [18], что ведет к росту порога начала эмиссии.

Как было отмечено ранее, при приложении напряжения к активированной структуре ток начинается при меньшем его значении, чем в момент активации, а рост тока имеет характер близкий к экспоненциальному (см. рис. 1, δ). Это свидетельствует о том, что в ходе активационной процедуры происходит локальное формирование ЭЦ, а сама углеродная пленка в этой области приобретает эмиссионную способность. В ходе дальнейших измерений с увеличением амплитуды импульсов при некотором критическом напряжении возникает токовая нестабильность, в ходе которой происходит ВЭЭ с последующим вакуумным пробоем, приводящим к повторному изменению морфологии поверхности [19]. В результате произошедшего пробоя размеры пробойного пятна увеличиваются (см. рис. 6, *a*), и как следствие, становится больше поверхностных образований в месте пробоя (см. рис. 6, *б*).



Рис. 6. Оптическая микроскопия поверхности пленки после пробоя (*a*), электронная микроскопия массива поверхностных образований (*б*). Образец с сопротивлением 29 кОм.

Вместе с этим по результатам измерения автоэмиссионных ВАХ видно (см. рис. 5, a), что по мере роста сопротивления пленки увеличивается и величина максимального тока. Это связано, в первую очередь, с видом сформировавшихся ЭЦ. Так, ленты обеспечивают максимальную крутизну ВАХ при относительно небольшом пороговом напряжении, которое отчасти снижается благодаря уменьшению расстояния катод-анод, но имеют невысокую электрическую прочность и термическую стабильность ввиду малого сечения и удаленности от подложки. Для этого вида ЭЦ наиболее характерно возникновение ВЭЭ с последующим дуговым разрядом, что инициирует очередной этап изменения морфологии поверхности. В свою очередь, более тонкая пленка, в которой формируются торцевые ЭЦ, обеспечивает максимальное значение автоэмиссионного тока при более высоких напряжениях, но характер ВАХ становится более пологим. Уменьшение крутизны ВАХ, по всей видимости, связано с появлением термоэмиссии и переходом ЭЦ к работе в режиме термоавтоэлектронной эмиссии (см. кривые 5, 6, рис. 5, a). Вместе с тем торцевые ЭШ более устойчивы к нагреву благодаря оптимальному режиму теплоотвода за счет максимальной приближенности ЭЦ к подложке. Также в устойчивости торцевых ЭЦ немалую роль играет собственное сопротивление пленки, которое является балластным сопротивлением, гасящим токи критической величины.

По результатам электронной микроскопии было установлено, что в ходе активации формируется первоначальная эмиссионная структура, состоящая из относительно небольшого числа поверхностных образований. Эта первоначальная структура является в каком-то смысле "затравочной". Она обеспечивает появление первоначального тока и выходит из строя в результате последующего пробоя с образованием поверхностных образований лент, направленных к аноду в случае низкоомных пленок, и увеличивает количество и протяженность эмитирующих торцов для случая высокоомных пленок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было установлено, что для углеродных пленок с включениями нанокристаллического графита в результате токовой активации возникает дуговой вакуумный пробой, при котором формируются различные виды ЭЦ. Для более толстых пленок характерно появление поверхностных образований — лент и протяженных торцов пленки. С уменьшением толщины происходит преимущественное образование торцов пленки относительно небольшой протяженности. Вместе с этим на эмиссионные характеристики существенным образом влияет вид ЭЦ и продольные размеры нанографитовых включений: ленты и протяженные торцы

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 № 1 2024

в совокупности с более протяженными кристаллитами обеспечивают более низкий порог начала эмиссии и крутую ВАХ, а торцевые ЭЦ дают максимальный ток. Первоначальные ЭЦ, образовавшиеся после активации в ходе измерений, создают условия для возникновения ВЭЭ, при которой происходит дуговой разряд, приводящий к изменению морфологии поверхности пленки и выделению новых ЭЦ. Таким образом, ЭЦ, возникшие после активации, являются своего рода "затравкой", создающей условия для образования новых ЭЦ в ходе повторного (формирующего) пробоя.

Полученные результаты могут быть использованы при создании источников электронов для элементов тонкопленочных вакуумных интегральных микросхем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Egorov N.V., Sheshin E.P.* Carbon-Based Field Emitters: Properties and Applications // Topics in Applied Physics. 2020. V. 135. P. 449–528. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47291-7 10.
- 2. Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд-во МФТИ, 2001. 288 с.
- Образцов А.Н., Павловский И.Ю., Волков А.П. Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 11. С. 89–95.
- 4. Wächter R., Cordery A., Proffitt S., Foord J. Influence of film deposition parameters on the field emission properties of diamond-like carbon films // Diamond and Related Materials. 1998. V. 7. № 5. P. 687–691. https://doi.org/10.1016/S0925-9635(97)00279-3.
- Xiomara C., Huaizhi G., Bo G., Lei A., Guohua C., Otto Z. A carbon nanotube field emission cathode with high current density and long-term stability // Nanotechnology. 2009. V. 20. № 32. P. 325–707. https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/32/325707.
- Vink J., Gillies M., Kriege J.C. Enhanced field emission from printed carbon nanotubes by mechanical surface modification // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 17. P. 3552–3554. https://doi.org/10.1063/1.1622789.
- Weihua L., Xin L., Changchun Zh. Improving the emission characteristics of a carbon nanotube cathode in an aging process // Ultramicroscopy. 2007. V. 107. № 9. P. 833–837.

https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2007.02.015.

 Guo P.S., Chen T., Chen Y.W., Zhang Z.J., Feng T., Wang L.L., Lin L.F, Sun Z., Zheng Z.H. Fabrication of field emission display prototype utilizing printed carbon nanotubes/nanofibers emitters // Solid-State Electronics. 2008. V. 52. № 6. P. 877–881. https://doi.org/10.1016/j.sse.2008.01.023.

13

 Bobkov A.F., Davidov E.V., Zaitsev S.V., Karpov A.V., Kozodaev M.A., Nikolaeva I.N., Popov M.O., Skorokhodov E.N., Suvorov A.L., Cheblukov Yu.N. Some aspects of the use of carbon materials in field electron emission cathodes // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 2001. V. 19. № 32. P. 32–38. https://doi.org/10.1116/1.1240017

https://doi.org/10.1116/1.1340017.

- Li J.J., Gu C.Z., Peng H.Y., Wu H.H., Zheng W.T., Jin Z.S. Field emission properties of diamond-like carbon films annealed at different temperatures // Applied Surface Science. 2005. V. 251. № 1–4. P. 236–241. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.03.102.
- 11. Gröning O., Küttel O. M., Schaller E., Gröning P., Schlapbach L. Vacuum arc discharges preceding high electron field emission from carbon films // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. № 4. P. 476–478. https://doi.org/10.1063/1.118145.
- Gröning O., Küttel O.M., Schaller E., Gröning P., Schlapbach L. Field emission from DLC films // Applied Surface Science. 1997. V. 111. P. 135–139. https://doi.org/10.1016/S0169-4332(96)00713-1.
- Evtukh A., Litovchenko V.G., Semenenko M., Yilmazoglu O., Mutamba K., Hartnagel H., Pavlidis D. Formation of conducting nanochannels in diamond-like carbon films // Semiconductor science and technology. 2006. V. 21. P. 1326–1330. https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/9/018.

14. Semenenko M., Okrepka G., Yilmazoglu O., Hartnagel H.,

Pavlidis D. Electrical conditioning of diamond-like

carbon films for the formation of coated field emission cathodes // Applied Surface Science. 2010. V. 257. № 2. P. 388–392.

https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.06.089.

- Jarvisa J.D., Andrews H.L., Brau C.A., Choi B.K., Davidson J., Kang W.P., Wong Y.M. Uniformity conditioning of diamond field emitter arrays // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 2009. V. 27. P. 2264. https://doi.org/10.1116/1.3212915.
- Dennison J.R., Holtz M., Swain G. Raman Spectroscopy of Carbon Materials // Journal Articles. 1996. V. 11. № 8. P. 38–45.
- 17. Cançado L.G., Takai K., Enoki T., Endo M., Kim Y.A., Mizusaki H. et al. General equation for the determination of the crystallite size L a of nanographite by Raman spectroscopy // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. № 16. P. 163106.
- 18. Эйдельман Е.Д., Архипов А.В. Полевая эмиссия из углеродных наноструктур: модели и эксперимент // Успехи физических наук. 2020. Т. 190. № 7. С. 693–714. https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038576
- 19. Нефедов Д.В., Яфаров Р.К. Импульсный вакуумно-плазменный пробой при сильноточной автоэмиссии планарно-торцевых наноалмазографитовых катодов // Тезисы докладов XV Всероссийской конференции молодых ученых "Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика". СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова. РАН. Саратов, 2020. С. 184–185.

STRUCTURING OF THE SURFACE OF THIN CARBON FILMS DURING ACTIVATION BY MICROSECOND CURRENT PULSES

D. V. Nefedov^{*a*}, N. O. Shabunin^{*a*}, D. N. Bratashov^{*b*}

^a Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

^bSaratov State University, Saratov, Russia

The influence of current activation by electric pulse breakdown on changes in surface morphology and emission characteristics of a field emission cathode made on the basis of carbon films obtained by deposition in a microwave gas discharge plasma was studied. Current activation of these films was carried out by applying voltage pulses of microsecond duration until an electrical breakdown occurred. It is shown that during activation, the morphology of the film surface in the breakdown region changes with the formation of a micro-sized emitting structure, which significantly improves the field emission characteristics of cathodes based on carbon films.

Keywords: field emission, thin film field emission cathodes, carbon films, activation by breakdown

REFERENCES

- 1. *Egorov N.V., Sheshin E.P.* Carbon-Based Field Emitters: Properties and Applications // Topics in Applied Physics. 2020. V. 135. P. 449–528. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47291-7_10.
- 2. *Sheshin E.P.* Surface structure and field emission properties of carbon materials. M.: Publishing house. MIPT, 2001. 288 p. (in Russian).
- 3. *Obraztsov A.N., Pavlovskii I.Y., Volkov A.P.* Field electron emission in graphite-like films // Tech. Phys. 46, 1437– 1443 (2001). https://doi.org/10.1134/1.1418509
- 4. Wächter R., Cordery A., Proffitt S., Foord J. Influence of film deposition parameters on the field emission properties of diamond-like carbon films // Diamond and Related Materials. 1998. V. 7. № 5. P. 687–691. https://doi.org/10.1016/S0925-9635(97)00279-3.

- 5. Xiomara C., Huaizhi G., Bo G., Lei A., Guohua C., Otto Z. A carbon nanotube field emission cathode with high current density and long-term stability // Nanotechnology. 2009. V. 20. № 32. P. 325-707. https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/32/325707.
- 6. Vink J., Gillies M., Kriege J. Enhanced field emission from printed carbon nanotubes by mechanical surface modification // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 17. P. 3552–3554. https://doi.org/10.1063/1.1622789.
- 7. Weihua L., Xin L., Changchun Zh. Improving the emission characteristics of a carbon nanotube cathode in an aging process // Ultramicroscopy. 2007. V. 107. № 9. P. 833-837.
 - https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2007.02.015.
- 8. Guo P., Chen T., Chen Y., Zhang Z., Feng T., Wang L., Lin L., Sun Z., Zheng Z. Fabrication of field emission display prototype utilizing printed carbon nanotubes/ nanofibers emitters // Solid-State Electronics. 2008. V. 52. № 6. P. 877-881. https://doi.org/10.1016/j.sse.2008.01.023.
- 9. Bobkov A.F., Davidov E.V., Zaitsev S.V., Karpov A.V., Kozodaev M.A., Nikolaeva I.N., Popov M.O., Skorokhodov E.N., Suvorov A.L., Cheblukov Yu.N. Some aspects of the use of carbon materials in field electron emission cathodes // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 2001. V. 19. № 32. P. 32–38.

https://doi.org/10.1116/1.1340017.

- 10. Li J.J., Gu C.Z., Peng H.Y., Wu H.H., Zheng W.T., Jin Z.S. Field emission properties of diamond-like carbon films annealed at different temperatures // Applied Surface Science. 2005. V. 251. № 1-4. P. 236-241. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.03.102.
- 11. Gröning O., Küttel O., Schaller E., Gröning P., Schlapbach L. Vacuum arc discharges preceding high electron field emission from carbon films // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. № 4. P. 476–478. https://doi.org/10.1063/1.118145.

- 12. Gröning O., Küttel O., Schaller E., Gröning P., Schlapbach L. Field emission from DLC films // Applied Surface Science. 1997. V. 111. P. 135-139. https://doi.org/10.1016/S0169-4332(96)00713-1.
- 13. Evtukh A., Litovchenko V., Semenenko M., Yilmazoglu O., Mutamba K., Hartnagel H., Pavlidis D. Formation of conducting nanochannels in diamond-like carbon films // Semiconductor science and technology. 2006. V. 21. P. 1326–1330. https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/9/018.
- 14. Semenenko M., Okrepka G., Yilmazoglu O., Hartnagel H., Pavlidis D. Electrical conditioning of diamond-like carbon films for the formation of coated field emission cathodes // Applied Surface Science. 2010. V. 257. № 2. P. 388-392. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.06.089.
- 15. Jarvisa J., Andrews H., Brau C., Choi B., Davidson J., Kang W., Wong Y. Uniformity conditioning of diamond field emitter arrays // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 2009. V. 27. P. 2264. https://doi.org/10.1116/1.3212915.
- 16. Dennison J., Holtz M., Swain G. Raman Spectroscopy of Carbon Materials // Journal Articles. 1996. V. 11. № 8. P. 38-45.
- 17. Cançado L., Takai K., Enoki T., Endo M., Kim Y. Mizusaki H. et al. General equation for the determination of the crystallite size L a of nanographite by Raman spectroscopy // Appl. Phys. Lett. 2006Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. № 16. P. 163106.
- 18. Eidelman E.D., Arkhipov A.V. Field emission from carbon nanostructures: models and experiment // Phys. Usp. 63648-667 (2020); https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.06.038576.
- 19. Nefedov D.V., Yafarov R.K. Pulsed vacuum-plasma breakdown during high-current field emission of planar-end nanodiamond-graphite cathodes. Abstracts of the XV All-Russian Conference of Young Scientists "Nanoelectronics, Nanophotonics and Nonlinear Physics". SF IRE. V. A. Kotelnikov RAS. Saratov, 2020. P. 184–185.