



DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-4-57-63

УДК 621.385.032

Т. М. Крачковская, А. В. Сторублев, Г. В. Сахаджи, А. С. Емельянов
АО «НПП "Алмаз"»
ул. Панфилова, д. 1, Саратов, 410033, Россия

Исследование характеристик металлопористого катода, модифицированного наноуглеродом

Аннотация. Представлены характеристики металлопористых катодов (МПК) с добавкой наноуглеродных частиц – сульфоаддукта нанокластеров углерода (Углерон®) в состав активного вещества и полиэдральных многослойных углеродных наноструктур фуллероидного типа тороидальной формы (Астралены®) в состав вольфрамовой матрицы. Катоды рассматриваются в качестве источников электронов для современных СВЧ-приборов, в частности ламп бегущей волны. Описаны результаты их ускоренных испытаний на долговечность. Приведены результаты замеров на эмиссионную способность. Проведен сравнительный рентгеноструктурный анализ эмитирующих поверхностей модифицированного и типового катодов и соответствующих им анодов. Отмечены особенности морфологии металлической матрицы МПК с добавкой углеродных наночастиц. Кроме того, исследована устойчивость модифицированных наноуглеродом катодов к работе в условиях недостаточного вакуума. Сделаны выводы о целесообразности дальнейшего изучения параметров модифицированных наноуглеродом термокатодов, таких как работа выхода электронов и скорость испарения активного вещества с Углероном®. Даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию технологии изготовления МПК с добавкой наноуглеродных частиц.

Ключевые слова: наноуглерод, металлопористый катод, Астралены®, Углерон®, эмиссия, долговечность

Для цитирования: Исследование характеристик металлопористого катода, модифицированного наноуглеродом / Т. М. Крачковская, А. В. Сторублев, Г. В. Сахаджи, А. С. Емельянов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 4. С. 57–63. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-4-57-63

Tatyana M. Krachkovskaya, Anton V. Storublev, Georgy V. Sakhadji, Andrey N. Emelyanov
JSC RPE "Almaz"

1, Panfilova str., 410033, Saratov, Russia

Performance Investigation for Nanocarbon Modified Dispenser Cathode

Abstract: The article provides characteristics of dispenser cathodes with admixture of nanocarbon particles, i.e. sulfo-adduct of carbon nanoclusters (Ugleron®), into active material and polyhedral multilayer carbon nanostructures of the fuleroid type and toroidal shape (Astralenes®) into tungsten matrix. The emitters are considered as electron sources for modern microwave devices, in particular travelling wave tube. The results of their accelerated life tests. Emission capacity measurement results are provided. A comparative x-ray analysis of modified and typical cathode emitting surfaces and respective anodes is presented. The morphology features of DC metal matrix with admixture of carbon nanoparticles are mentioned. Moreover, resistance of nanocarbon modified cathodes to operation under insufficient vacuum conditions is investigated. It is concluded that the further study of nanocarbon modified thermal cathode parameters, e.g. electron work function and active substance evaporation rate with Ugleron®, is reasonable. Recommendations on further improvement of dispenser cathodes manufacturing technology with admixture of nanocarbonic particles.

Keywords: nanocarbon, dispenser cathode, Astralen®, Ugleron®, emission, durability

For citation: Krachkovskaya T. M., Storublev A. V., Sahadji G. V., Emelyanov A. N. Performance Investigation for Nanocarbon Modified Dispenser Cathode. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 4, pp. 57–63. doi:10.32603/1993-8985-2018-21-4-57-63 (In Russian)

Введение. В настоящее время существует много разновидностей углеродных нанокласте- ров. Это одностенные и многостенные нанотрубки, графен, пористый наноуглерод, наноалмаз, а

также фуллероиды (астралены). Многие из указанных частиц все больше используются в современных электронных устройствах, в частности в источниках электронов для СВЧ-приборов. Существует ряд применений данных структур для изготовления и улучшения параметров автоэмиссионных эмиттеров [1]–[5].

В настоящее время основным источником электронов в СВЧ-приборах, в частности лампах бегущей волны, является термокатод. В настоящей статье предложено применение углеродных наночастиц для изготовления металлопористого катода (МПК) и представлено исследование его основных характеристик. Актуальность указанной работы обусловлена необходимостью создания эмиттеров с улучшенными эмиссионными свойствами с учетом тенденций развития современных СВЧ-приборов [6].

Предполагалось, что модификация МПК наноуглеродными кластерами, учитывая их механические и электронные свойства [7]–[15], позволит улучшить характеристики источника электронов, такие как плотность токоотбора, долговечность, а также устойчивость к работе в условиях недостаточного вакуума.

Изготовление МПК с добавкой наноуглерода. Используя традиционный путь модификации подобного катода, наноуглерод был добавлен в его состав. В [16] описана технология внедрения в МПК выбранных углеродных наночастиц, которые представляют собой сульфоаддукт нанокластеров углерода – Углерон® [17] и полиздральные многослойные углеродные наноструктуры фуллероидного типа – Астралены® [18]. На рис. 1 представлено электронное изображение порошка Углерона®, которое имеет характерный вид чешуйчатой графеноподобной структуры, а на рис. 2 – полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения типичное изображение частицы Астралена®, представляющую многогранную, многослойную структуру, полую внутри [12].

Поскольку Углерон® растворим, его добавляли в состав активного вещества для пропитки МПК – алюмината бария–кальция. Указанным составом были пропитаны два вида катодов: типовой вольфрамовый катод, спрессованный из порошка фракции А (ТУ 48-19-70-84), и изготовленный по новой технологии катод, за основу матрицы которого был взят вольфрамовый порошок более мелкой фракции Б (ТУ 48-19-70-84) с добавкой Астраленов®. Кроме того, для сравне-

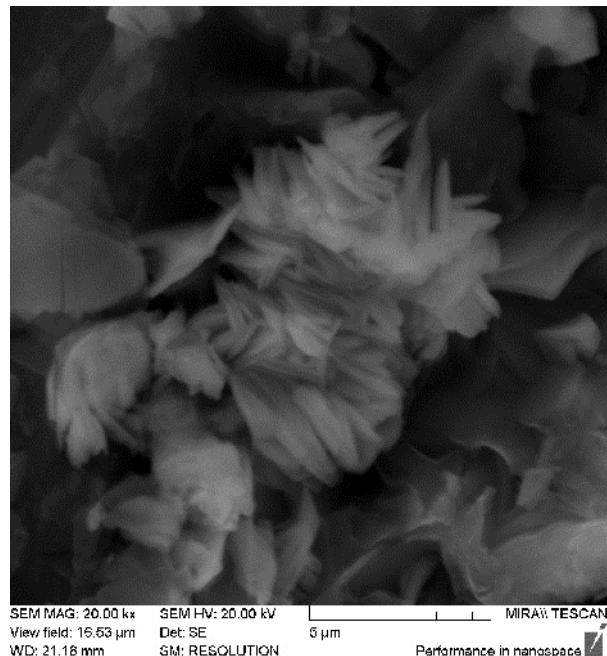


Рис. 1

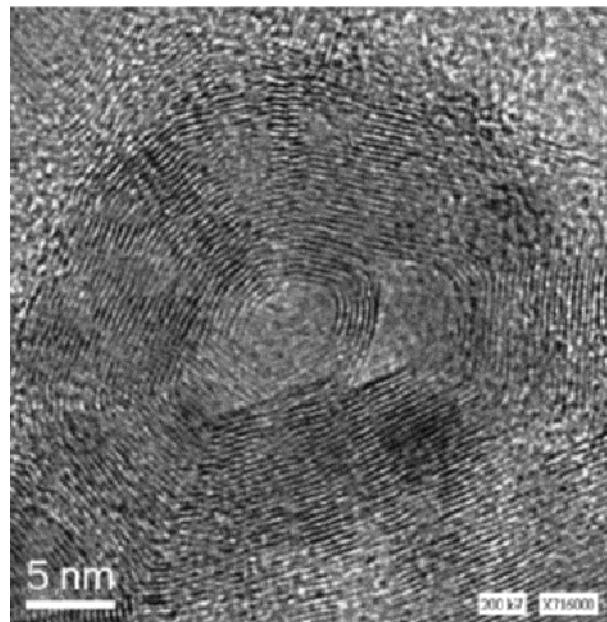


Рис. 2

ния эмиссионных характеристик были изготовлены и типовые катоды, пропитанные активным веществом без добавки Углерона®.

Исследование модифицированных наноуглеродом МПК. Все катоды испытывались в составе экспериментальных макетов с двумя электродами. Макеты были откачаны до давления около $2.7 \cdot 10^{-5}$ Па. Согласно первичным испытаниям эмиссионной способности с токоотбором $1 \text{ A}/\text{cm}^2$ параметры всех катодов находились в допустимых пределах, и они пригодны для дальнейших исследований. Лучшие характеристики

показали макеты с катодами, прошедшими операции вакуумного отжига, глубокого ионного травления и ионно-плазменного покрытия пленкой состава Os + Ir + Al. Поэтому указанные макеты были выбраны для испытаний на максимальную эмиссионную способность и долговечность, а остальные было решено испытать при работе в условиях недостаточного вакуума.

По существующей на предприятии методике [19] на макетах с катодом, пропитанным модифицированным составом с Углероном®, и с типовым катодом в настоящее время проводятся ускоренные испытания на долговечность. Для типового катода данной конструкции исследованная ранее ресурсная долговечность составляет не менее 50 тыс. ч. Прогнозируемая ресурсная долговечность для катода с Углероном® составляет не менее 100 тыс. ч. На сегодняшний день исследуемые макеты показали наработку 45 тыс. ч и испытания успешно продолжаются. В процессе испытаний катод с добавкой Углерона® в активное вещество сохраняет температурный запас на 50 °С выше, чем у типового катода, зафиксированный при первоначальном замере, что говорит о потенциально большей его долговечности. Это может быть связано с тем, что модифицированный состав пропитки имеет более низкую скорость испарения по сравнению с типовым. В пользу данного предположения свидетельствуют результаты рентгеноструктурного анализа поверхностей катодов и соответствующих им анодов, представленные в таблице. При анализе отмечено небольшое снижение количества активного бария на эмиссионной поверхности модифицированного катода, а также (в значительно меньшем количестве, чем для типового катода) миграция напыленных активных элементов бария и кислорода с катода на поверхность анода.

Другую пару макетов с типовым катодом с покрытием Os + Ir + Al и с катодом, модифицированным Астраленами® и Углероном® и изготовленным по новой технологии и также с пленкой Os + Ir + Al, испытывали на эмиссионную способность. Показатели эмиссии находятся примерно на одном уровне. На обоих макетах удалось получить плотность тока 20 A/cm^2 при яркост-

ной температуре 1070 °С для типового и при 1100 °С для модифицированного катодов. По этим результатам сделано предположение, что при малых концентрациях (как в данном эксперименте) примененные углеродные наночастицы не вносят значительный вклад в эмиссию. Однако после изучения подобного катодного диска с помощью сканирующей электронной микроскопии вывод был изменен. Исследованный катод был изготовлен по экспериментальной технологии, в связи с чем параметры структуры полученного диска далеки от идеальных, считающихся годными для получения необходимых значений эмиссии в серийном производстве.

На рис. 3 представлено изображение эмитирующей поверхности катода с добавкой наноструктур, на рис. 4 – изображение поверхности диска типового катода. Прежде всего, следует отметить различие в размерах пор: на поверхности типового катода они гораздо больше, чем у модифицированного катода, что определяется различиями в технологии изготовления. Во-первых, у типового катода за основу взят вольфрамовый порошок фракции А, которая крупнее фракции Б, из которой состоит матрица модифицированного катода. Фракция А при спекании дает более высокую открытую пористость $25 \pm 2 \%$. Во-вторых, давление прессования у модифицированного катода выше в 2–3 раза по сравнению с типовым в зависимости от свойств исходного порошка вольфрама. Поэтому плотность дисков и процент пропитки активным веществом у катодов сильно отличаются. У модифицированного катода диск более плотный (порядка 14 g/cm^3 против $13.1 \dots 13.5 \text{ g/cm}^3$ у типового катода) и имеет более низкую концентрацию пропитки активным веществом (4.4–7.5 % для экспериментального против 9.3–10.8 % для типового).

На поверхности модифицированного катода на крупных зернах наблюдаются более мелкие частицы размером порядка 0.5 мкм, чего не наблюдается у типового катода. Предположительно это могут быть добавленные нанокластеры. Типовой катод без Астраленов® и Углерона® с подобной структурой не мог бы обеспечить указанные ранее значения токоотбора. Следовательно, даже при малых концентрациях нанокластеры положительно влияют на эмиссионную характеристику.

Далее типовые и модифицированные катоды испытывались в условиях работы при низком вакууме. Испытания проходили две пары макетов: 1) с прошедшими только операцию вакуумного отжига типовым катодом и катодом, модифици-

Исследуемая поверхность	Средняя массовая доля, %	
	кислорода	бария
Типовой МПК	7.36	10.52
Модифицированный МПК	7.2	9.02
Анод типового МПК	20.73	36.8
Анод модифицированного МПК	13.77	34.5

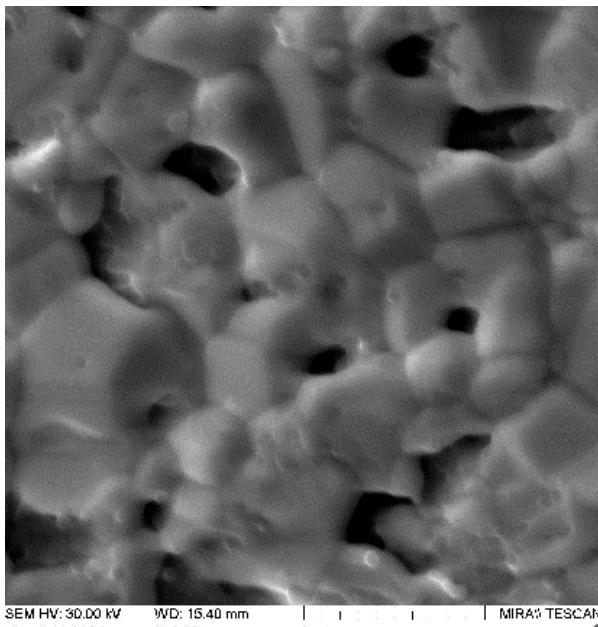


Рис. 3

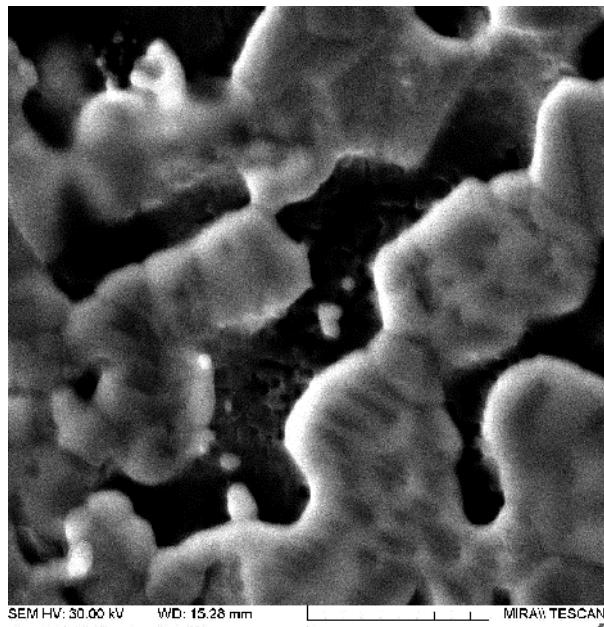


Рис. 4

рованным Астраленами® и Углероном® и изготовленным по новой технологии; 2) с прошедшиими операции вакуумного отжига и глубокого ионного травления поверхности типовым катодом и катодом, пропитанным модифицированным активным веществом с Углероном®.

Описанный эксперимент проводился на уникальной установке обработки катодно-сеточных узлов, выполненной по спецзаказу и предназначеннной для откачки экспериментальных макетов и испытания их на эмиссионную способность. Установка оснащена вакуумной камерой, низковольтным и высоковольтным источниками питания, вольтметром, средствами откачки и измерения вакуума.

Перед испытаниями макеты демонтировались из стеклянных колб и устанавливались в вакуумную камеру с последующей откачкой до давления $1.9 \cdot 10^{-5}$ Па и дальнейшим поочередным обезгаживанием катодов и анодов по разработанной методике.

Далее атмосферный воздух постепенно впускался в камеру. При этом регистрировалась зависимость анодного тока от давления при постоянном анодном напряжении.

Ожидания повышенной устойчивости поверхности МПК к отравляющему воздействию атмосферы у модифицированных катодов не оправдались. Они показали худшие параметры по сравнению с типовыми катодами. Все четыре испытанных катода восстановили первоначальное значение анодного тока 31 мА (плотность 0.5 A/cm^2) при откачке камеры до давления около $2.7 \cdot 10^{-5}$ Па. В

процессе испытаний установлено, что снижение эмиссии до контрольного значения (падение тока на 20 %) для модифицированных катодов происходит при давлении около $3.9 \cdot 10^{-4}$ Па, тогда как для типовых такое снижение тока наблюдается при давлении около $3.9 \cdot 10^{-3}$ Па.

Кроме того, как и предполагалось, с ухудшением вакуума режим ограничения тока пространственным зарядом у всех катодов уменьшается, а потом исчезает, что отчетливо наблюдалось с помощью осциллографа.

Заключение. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- модификация активного вещества Углероном® увеличивает температурный запас МПК предположительно за счет снижения скорости его испарения, что положительно влияет на долговечность МПК;

- малые массовые доли Астраленов® в матрице (0.2–0.7 %) и Углерона® (0.1–0.2 %), добавленного в активное вещество, вносят положительный вклад в эмиссию катода и обеспечивают стабильный токоотбор в условиях технологических отклонений при изготовления МПК;

- добавка указанных наноуглеродных частиц повышает чувствительность катода к условиям вакуума. Возможно, повышение чувствительности к отравлению происходит за счет абсорбционных свойств Углерона®, являющегося графеноподобной структурой, для которой известны такие свойства [8]. Поэтому планируется прове-

сти испытания катодов, модифицированных только Астраленами®, так как из теоретических предпосылок [13]–[15] именно они должны дать положительный эффект.

Остается еще ряд вопросов, связанных с пониманием механизма влияния Астраленов® и Углерона® на работу МПК. Поэтому планируется также провести эксперимент по определению скорости испарения активного вещества с Углероном® с поверхности катода, а также рассчитать среднюю работу выхода электронов с поверхно-

сти модифицированных катодов. Кроме того, необходима отработка экспериментальной технологии изготовления МПК с Астраленами® и Углероном® с целью получения равномерной объемной пористости для достижения повышенных значений эмиссии МПК и повышения повторяемости результатов, так как экспериментальные предпосылки для этого уже достаточно убедительны. Далее планируется проведение дальнейших испытаний на долговечность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елецкий А. В. Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 9. С. 897–930. doi: 10.3367/UFNr.0180.201009a.0897
2. Field-induced electron emission from nanoporous carbon of various types / A. V. Arkhipov, P. G. Gabdullin, N. M. Gnuchev, S. N. Davydov, S. I. Krel, B. A. Loginov // Saint Petersburg Polytechnic University J. Physics and Mathematics. 2015. № 1. Р. 47–55. doi: 10.1016/j.spjpm.2015.03.011
3. Фурсей Г. Н., Петрик В. И., Новиков Д. В. Низкопороговая автоэлектронная эмиссия из углеродных нанокластеров, полученных методом холодной деструкции графита // ЖТФ. 2009. Т. 79, № 7. С. 122–126.
4. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур / Г. Н. Фурсей, М. А. Поляков, А. А. Кантонистов, А. М. Яфясов, Б. С. Павлов, В. Б. Божевольнов // ЖТФ. 2013. Т. 83, № 6. С. 71–77.
5. Бернацкий Д. П., Павлов В. Г. Полевая электронная эмиссия с иридиевого острия, покрытого углеродом // ЖТФ. 2017. Т. 87, № 11. С. 1729–1733. doi: 10.21883/jtf.2017.11.45138.2260
6. Krachkovskaya T. M., Sahadji G. V., Zhuravlev S. D. Modern electron sources for TWTs in millimeter and sub-millimeter ranges // Journal of Radio Electronics (Zhurnal Radioelektroniki) 2017. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/5/text.pdf> (дата обращения 20.08.2018).
7. Елецкий А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 233–274. doi: 10.3367/UFNr.0177.200703a.0233
8. The electronic properties of graphene / A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, A. K. Geim // Review of Modern Physics. 2007. Oct. Р. 1–55. doi: 10.1103/RevModPhys.81.109
9. Харламова М. В. Электронные свойства одностенных углеродных нанотрубок и их производных // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 11. С. 1145–1174. doi: 10.3367/UFNr.0183.201311a.1145
10. Magnetic Properties of Multiwall Carbon Nanotubes and Astralenes in Strong Electric Fields / A. N. Brozdnichenko, A. N. Ponomarev, V. P. Pronin, V. V. Rybalko // J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2007. Vol. 1, № 1. Р. 110–112. doi: 10.1134/S1027451007010223
11. Structural and magnetic resonance study of astralene nanoparticles / A. I. Shames, E. A. Katz, A. M. Panich, D. Mogilyansky, E. Mogilko, J. Grinblat, V. P. Belousov, I. M. Be- lousova, A. N. Ponomarev // Diamond & Related Materials. 2009. Vol. 18. № 2–3. Р. 505–510. doi.org/10.1016/j.diamond. 2008.10.056
12. Closed π -Electron Network in Large Polyhedral Multi-Shell Carbon Nanoparticles / A. I. Shames, I. Felner, V. Yu. Osipov, E. A. Katz, E. Mogilko, J. Grinblat, A. M. Panich, V. P. Belousov, I. M. Belousova, A. N. Ponomarev // Nanoscience and Nanotechnology Lett. 2011. Vol. 3. Р. 41–48. doi:10.1166/nnl.2011.1111
13. Активированные потоком ионов калия полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями в сильных электрических полях / Т. А. Тумарева, Г. Г. Соминский, И. А. Светлов, А. Н. Морозов // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 11. С. 119–122.
14. Тумарева Т. А., Соминский Г. Г. Работа полевых эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в техническом вакууме // ЖТФ. 2013. Т. 83, № 7. С. 121–124.
15. Полевая эмиссия многоострийных кремниевых структур с защитными покрытиями / Г. Г. Соминский, Е. П. Тарадаев, Т. А. Тумарева, М. Е. Гиваргизов, А. Н. Степанова // ЖТФ. 2016. Т. 86, № 11. С. 108–111. doi: 10.21883/jtf.2016.11.43823.1781
16. Металлопористый катод, модифицированный наноуглеродом / Т. М. Крачковская, Л. А. Мельников, Г. В. Сахаджи, А. Н. Пономарев, А. С. Емельянов // Журн. радиоэлектроники. 2017. № 11. С. 1–11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/16/text.pdf> (дата обращения 20.08.2018).
17. Пат. RU 2 478 117 С2 МПК C10C 3/04, C04B 24/16, C04B 24/36, A61K 31/095, A61P 31/12 (2006.01), B82Y 5/00, B82Y 30/00, B82Y 40/00 (2011.01). Сульфо-аддукт нанокластеров углерода и способ его получения / А. Н. Пономарев, М. Е. Юдович, А. А. Козеев; опубл. 27.03.2013. Бюл. № 23.
18. Пат. RU 2 196 731 С2 МПК C01B 31/02 (2000.01). Полиэдальные многослойные углеродные наноструктуры фуллероидного типа / А. Н. Пономарев, В. А. Никитин; опубл. 20.01.2003. Бюл. № 2.
19. Пат. RU 1 447 192 С. МПК H01J 9/42 (2000.01). Способ оценки долговечности термокатода/ В. Г. Ворожейкин, В. Н. Дудкин, Ю. И. Набоков, В. В. Свинцов; опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16.

Статья поступила в редакцию 9 июня 2018 г.

Крачковская Татьяна Михайловна – магистр техники и технологии по направлению "Приборостроение" (2011). Начальник сектора катодного комплекса АО «НПП "Алмаз"», аспирантка кафедры приборостроения Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А. Автор 21 научной публикации. Сфера научных интересов – катодная техника.

E-mail: electron.t@bk.ru, krachkovskayatm@almaz-rpe.ru

Сторублев Антон Вячеславович – начальник сектора катодного комплекса АО «НПП "Алмаз"», аспирант кафедры физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. Окончил Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского (2011) по специальности "Медицинская физика". Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – катодная техника; лампы бегущей волны; вакуумная электроника.

E-mail: anton.storublev@mail.ru, storublevav@almaz-rpe.ru

Сахаджи Георгий Владиславович – кандидат технических наук (2013), начальник научно-производственного комплекса АО «НПП "Алмаз"». Автор 32 научных публикаций. Сфера научных интересов – катодная техника.

E-mail: sahadjigv@almaz-rpe.ru, sahadj@yandex.ru

Емельянов Андрей Сергеевич – бакалавр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2016), студент магистратуры Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А., инженер-технолог катодного комплекса АО «НПП "Алмаз"». Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – катодная техника.

E-mail: emelyanovas@almaz-rpe.ru

REFERENCES

1. Eletskiy A. V. Cold Field Emitters Based on Carbon Nanotubes. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Physics - Uspekhi]. 2010, vol. 180, no. 9, pp. 897–930. doi: 10.3367/UFNr.0180.201009a.0897 (In Russian)
2. Arkhipov A. V., Gabdullin P. G., Gnuchev N. M., Davydov S. N., Krel S. I., Loginov B. A. Field-Induced Electron Emission From Nanoporous Carbon of Various Types. *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*. 2015, no. 1, pp. 47–55. doi: 10.1016/j.spjpm.2015.03.011
3. Fursay G. N., Petrik V. I., Novikov D. V. Low-Threshold Field Emission From Carbon Nanoclusters Obtained by the Method of Cold Destruction of Graphite. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 2009, vol. 79, no. 7, pp. 122–126. (In Russian)
4. Fursay G. N., Polyakov M. A., Kantonistov A. A., Yafyasov A. M., Pavlov B. S., Bozhevolnov V. B. Autoelectronic and Explosive Emission from Graphene-Like Structures. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 2013, vol. 83, no. 6, pp. 71–77. (In Russian)
5. Bernatsky D. P., Pavlov V. G. Field Electron Emission from an Iridium Tip Coated with Carbon. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 2017, vol. 87, no. 11, pp. 1729–1733. doi: 10.21883 /JTF.2017.11.45138.2260 (In Russian)
6. Krachkovskaya T. M., Sakhadji G. V., Zhuravlev S. D. Modern Electron Sources For Twts in Millimeter and Submillimeter Ranges. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics]. 2017, no. 12. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/5/text.pdf> (accessed 20.08.2018).
7. Eletskiy A. V. Mechanical Properties of Carbon Nanostructures and Materials Based on them. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Physics - Uspekhi]. 2007, vol.177, no. 3, pp. 233–274. doi: 10.3367/UFNr.0177.200703a.0233 (In Russian)
8. Castro Neto A. H., Guinea F., Peres N. M. R., Novoselov K. S., and Geim A. K. The Electronic Properties of Graphene. *Review of Modern Physics*, Oct. 2007, pp. 1–55. doi: 10.1103/RevModPhys.81.109
9. Kharlamova M. V. Electronic Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes and Their Derivatives. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Physics - Uspekhi]. 2013, vol. 183, no. 11, pp. 1145–1174. doi: 10.3367/UFNr.0183.201311a.1145 (In Russian)
10. Brozdnichenko A. N., Ponomarev A. N., Pronin V. P., Rybalko V. V. Magnetic Properties of Multiwall Carbon Nanotubes and Astralenes in Strong Electric Fields. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2007, vol. 1, no. 1, pp. 110–112. doi: 10.1134/S1027451007010223
11. Shames A. I., Katz E. A., Panich A. M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V. P., Belousova I. M., Ponomarev A. N. Structural and Magnetic Resonance Study of Astralen Nanoparticles. *Diamond & Related Materials*. 2009, vol. 18, no. 2–3, pp. 505–510. doi.org/10.1016/j.diamond.2008.10.056
12. Shames A. I., Felner I., Osipov V. Yu., Katz E. A., Mogilko E., Grinblat J., Panich A. M., Belousov V. P., Belousova I. M., and Ponomarev A. N. Closed π -Electron Network in Large Polyhedral Multi-Shell Carbon Nanoparticles. *Nanoscience and Nanotechnology Lett.* 2011, vol. 3, pp. 41–48. doi:10.1166/nnl.2011.1117
13. Tumareva T. A., Sominskiy G. G., Svetlov I. A., Morozov A. N. Field Emitters Activated by Flow of Potassium Ions with Fullerene Coatings in Strong Electric Fields. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 2008, vol. 78, no. 11, pp. 119–122. (In Russian)
14. Tumareva T. A., Sominskiy G. G. The Work of Field Emitters with Activated Fullerene Coatings in Vacuum. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 2013, vol. 83, no. 7, pp. 121–124. (In Russian)
15. Sominskiy G. G., Taradaev E. P., Tumareva T. A., Givargizov M. E., Stepanova A. N. Field Emission of Multi-Tip Silicon Structures with Protective Coatings. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 2016, vol. 86, no. 11, pp. 108–111. doi: 10.21883/jtf.2016.11.43823.1781 (In Russian)

-
16. Krachkovskaya T. M., Melnikov L. A., Sahadji G. V., Ponomarev A. N., Emelyanov A. S. Metal Porous Cathode Modified by Nanocarbon. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics]. 2017, no. 11. Available at <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/16/text.pdf> (accessed 20.08.2018) (In Russian)
17. Ponomarev A. N., Yudovich M. E., Kozeev A. A. *Sulfoaddukt nanoklasterov ugleroda i sposob ego polucheniya* [Sulfo-Adduct of Carbon Nanoclusters and Method of Its Production]. Patent RF, no. 2478117, 2013.
18. Ponomarev A. N., Nikitin V. A. *Poliedral'nye mnogosloinye uglerodnye nanostruktury fulleroidnogo tipa* [Polyhedral Multilayer Carbon Nanostructures Fulleroid Type]. Patent RF, no. 2196731, 2003.
19. Vorozheykin V. G., Dudkin V. N., Nabokov U. I., Sintsov V. V. *Sposob ocenki dolgovechnosti termokatoda* [Method for Estimating Life of Thermal Cathode]. Patent RF, no. 1447192, 1986.

Received, 09 June 2018

Tatyana M. Krachkovskaya – Master's Degree in Instrumentation in Gagarin Saratov State Technical University (2011). Postgraduate student and Chief of Section at SC "RPE "Almaz". The author of more than 21 scientific publications. Area of expertise: cathode technique.

E-mail: elektron.t@bk.ru

Anton V. Storublev – Master's Degree in Medical Physics in Chernyshevsky Saratov State National Research University. Postgraduate student and Chief of Section at SC "RPE "Almaz". The author of 5 scientific publications. Area of expertise: cathode technique, TWT, vacuum electronics.

E-mail: anton.storublev@mail.ru, storublevav@almaz-rpe.ru

Georgy V. Sakhadji – Ph.D. in Engineering (2013), Chief of Research and Production Complex at SC "RPE "Almaz". The author of more than 32 scientific publications. Area of expertise: cathode technique.

E-mail: sahadjigv@almaz-rpe.ru, sahadj@yandex.ru

Andrey S. Emelyanov – Bachelor's Degree in Electronics and Nanoelectronics in Gagarin Saratov State Technical University (2016). Graduate student and engineer at SC "RPE "Almaz". The author of 3 scientific publications. Area of expertise: cathode technique.

E-mail: emelyanovas@almaz-rpe.ru
