

УДК 537.533.2

И. Е. Базанов, А. А. Алябьев, Е. П. Шешин

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Исследование флуктуаций автоэмиссионного тока современных катодов

В данной статье исследуются флуктуации автоэмиссионного тока современных катодов. Автоэмиссия является важным процессом, определяющим эффективность работы электронных приборов и устройств, таких как триоды, кинетроны и катодные лучи. В работе приведены результаты исследований, проведенных на катодах на основе ПАН углеродных волокон. Показано, что степень флуктуаций в автоэмиссионном токе может являться индикатором качества прибора, а также зависит от геометрии устройства. Для примера приведены зависимости флуктуаций от расстояния между катодом и анодом. Таким образом, данная работа имеет практическое значение для проектирования электронных приборов, а также для улучшения качества их работы.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, флуктуации, катоды, шум, искажение сигнала, электронные приборы, ПАН волокна

I. E. Bazanov, A. A. Alyabyev, E. P. Sheshin

Moscow Institute of Physics and Technology

Investigation of the field emission current fluctuations of modern cathodes

In this article, the fluctuations of the field emission current on modern cathodes is investigated. Field emission is an important process that determines the efficiency of electronic devices such as triodes, kinetrons and cathode rays. The paper presents the results of studies conducted on cathodes based on PAN carbon fibers. It is shown that the degree of fluctuations in the field emission current can be an indicator of the quality of the device, and also depends on the geometry of the device. For example, the dependencies of fluctuations on the distance between the cathode and the anode are given. Thus, this work is of practical importance for the design of electronic devices, as well as for improving the quality of their work.

Key words: field emission, fluctuations, cathodes, noise, signal distortion, electronic devices, PAN carbon fibers

1. Введение

Автоэмиссия — явление, при котором электроны могут выходить из поверхности тела без внешнего источника энергии. Это происходит благодаря эффекту туннелирования, который возникает, когда электроны преодолевают потенциальный барьер на поверхности материала [1].

Автоэмиссия играет важную роль в работе электронных устройств и используется в различных приборах для получения электронного потока, который используется в электронной оптике и электронике. Катоды, используемые в электронных устройствах, производят

электронный поток через процесс автоэмиссии. Современные технологии производства катодов позволяют достигать высокой эффективности и надежности работы электронных устройств [2, 3].

В данной статье мы рассмотрим исследование флуктуаций автоэмиссионного тока на современных катодах, а именно катодов на основе ПАН волокон, а также факторы, влияющие на величину и флуктуации автоэмиссионного тока. Результаты исследования могут помочь в разработке более эффективных и надежных катодов, а также в улучшении работы электронных приборов и устройств.

Исследование флуктуаций автоэмиссионного тока современных катодов — это важная задача в развитии электроники и электронной промышленности. Катоды из углеродных материалов, таких как ПАН углеродные волокна, нанотрубки, графен, Q-карбон и другие, являются перспективными материалами для создания высокопроизводительных электронных устройств [4, 5]. Однако углеродные материалы имеют особенности в работе, связанные с их структурой и электронными свойствами, которые влияют на флуктуации автоэмиссионного тока [6, 7, 8].

Исследования флуктуаций автоэмиссионного тока современных катодов имеют цель выявить особенности работы углеродных материалов в условиях высокой электрической поляризации. Эти исследования позволяют определить оптимальные условия работы катодов и выбрать наиболее подходящие материалы для создания электронных устройств высокой производительности [9].

В целом, исследование флуктуаций автоэмиссионного тока современных катодов является важным шагом в развитии электроники и электронной промышленности. Эти исследования позволяют улучшить работу катодов и повысить производительность электронных устройств, что в свою очередь способствует развитию новых технологий и улучшению качества жизни людей [10, 11].

2. Установка и методика эксперимента

Для измерения автоэмиссионного тока использовалась специальная установка, которая позволяет снимать ток на поверхности катода в реальном времени [12, 13]. Схема приведена на рис. 1.

Для анализа спектральной плотности мощности и автокорреляции были использованы специальные программы обработки данных. Спектральная плотность мощности была оценена путем разложения временного ряда автоэмиссионного тока на гармонические составляющие. Автокорреляция была использована для определения характерного времени, в течение которого флуктуации сохраняются на поверхности катода [14, 15]. Ниже представлены формулы вычисления среднего тока по выборке, относительного среднеквадратичного и дифференциального отклонения тока, участвующие в расчете.

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n,$$

где \bar{I} — средний по выборке ток, I_n — ток при n -м измерении, N — количество измерений.

$$\sigma = \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\frac{N}{N-1} (\bar{I}^2 - \bar{I}^2)},$$

где σ — относительное среднеквадратичное отклонение тока, \bar{I} — автоэмиссионный ток.

$$\Delta = \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} (I_{n+1} - I_n)^2},$$

где Δ — дифференциальное отклонение тока, \bar{I} — автоэмиссионный ток.

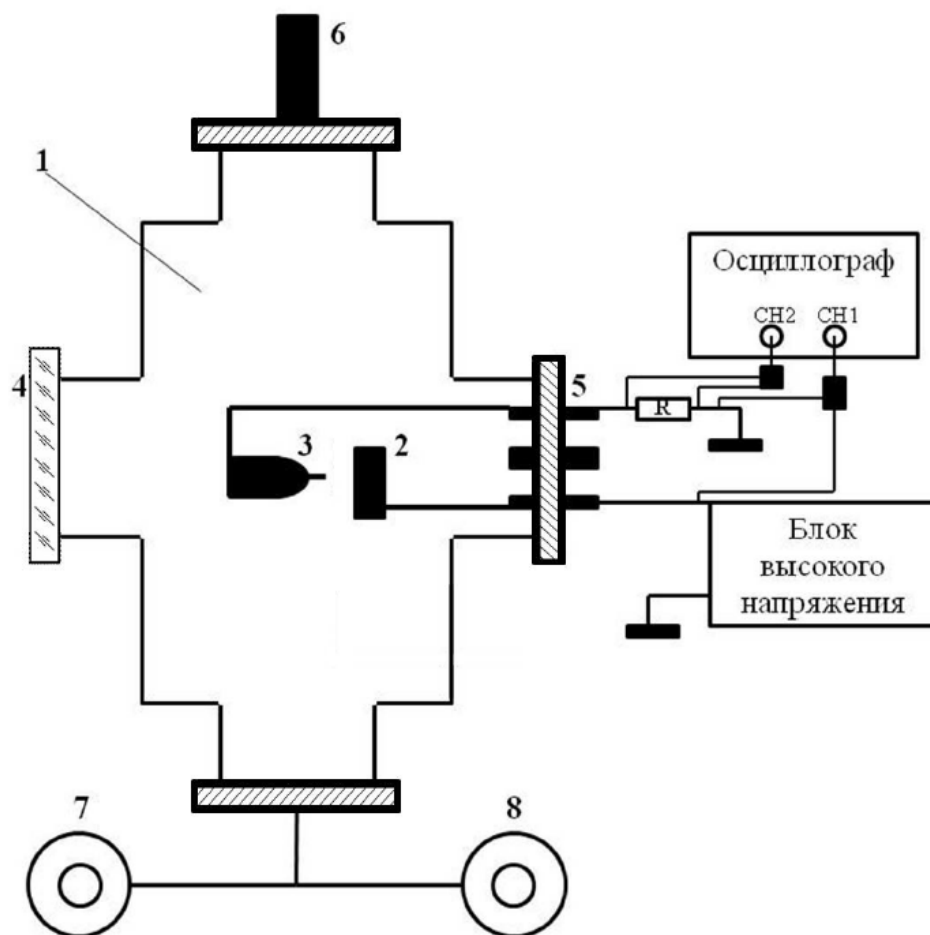


Рис. 1. Схема установки: 1 – вакуумная камера, 2 – анод, 3 – исследуемый образец, 4 – смотровое окно, 5 – фланец с высоковольтными выводами, 6 – вакуумметр, 7 – форвакуумный насос, 8 – турбомолекулярный насос

3. Материалы

ПАН углеродные волокна — это продукты пиролиза полимерных волокон на основе полиакрилонитрила и их последующей высокотемпературной обработки. Углеродные волокна имеют диаметр 6–10 мкм и представляют собой химически очень чистое вещество (они состоят на 99,9% из углерода). Полиакрилонитрильное углеродное волокно является наиболее стабильным автоэмиссионным катодом для работы в техническом вакууме [16].

Атомарные слои такого волокна образуют фибриллы, которые в зависимости от условий и температуры нагрева в процессе получения имеют размер по большой оси 250–1000 Å и диаметр 20–50 Å. Диаметр волокна около 7 мкм. Фибриллы (тетрагональные кристаллы) связаны между собой аморфными областями. Такая связь обеспечивает сохранение эластичности углеродных волокон. Эмиссионными центрами у такого автокатада являются многочисленные (около 10⁵) микровыступы, образованные выходящими на торцевую поверхность волокна фибриллами и их совокупностями [17].

При работе катода разрушение отдельных микровыступов не приводит к существенному изменению эмиссионного тока, т. к. среднее число микровыступов во время работы автокатада остается постоянным. Этот факт и определяет высокую стабильность эмиссионного тока и большой срок службы катода в условиях технического вакуума. Катоды из таких углеродных волокон без существенной деградации эмиссии выдерживают вакуумные пробой, что недопустимо для подавляющего большинства других типов автоэлектронных катодов [18]. На рис. 2 показан пучок ПАН волокон.

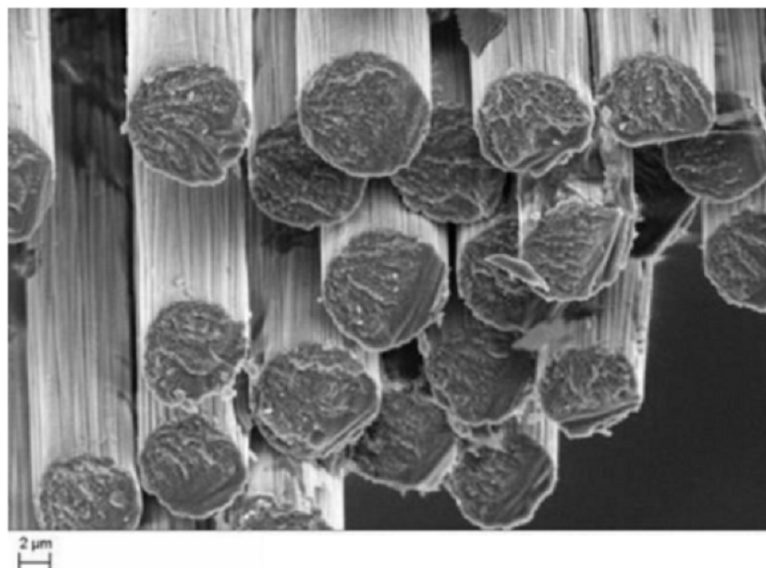


Рис. 2. Изображение пучка ПАН волокон, полученное с помощью РЭМ

4. Результаты и обсуждения

Был проведен анализ зависимости флуктуаций автоэмиссионного тока от различных параметров, таких как температура, электрическое поле и состояние поверхности материала. Для этого использовались специальные установки и методы контроля параметров.

В работе использовались различные методы исследования, которые позволили получить подробную информацию о флуктуациях автоэмиссионного тока на поверхности катодов. Примененные в настоящем исследовании методы могут быть использованы для дальнейших исследований в этой области, а также для разработки новых методов и технологий для улучшения производительности и надежности электронных устройств.

Итак, был проведен эксперимент с углеродными катодами на основе ПАН волокон, что позволило сравнить их свойства и определить, какие параметры наиболее подходят для конкретных приложений. Например, ВАХ при различных расстояниях между катодом и анодом представлены на рис. 3, а на рис. 4 приведены эти же ВАХ в координатах Фаулера – Нордгейма.

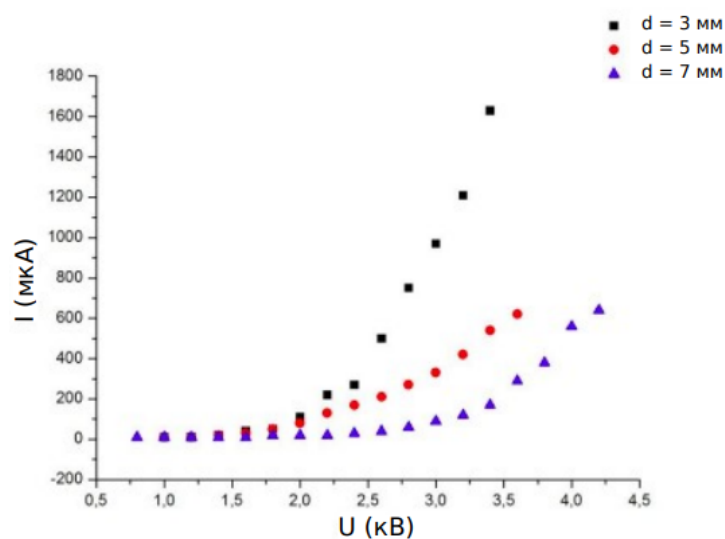


Рис. 3. ВАХ пучка ПАН волокон при различном расстоянии между катодом и анодом

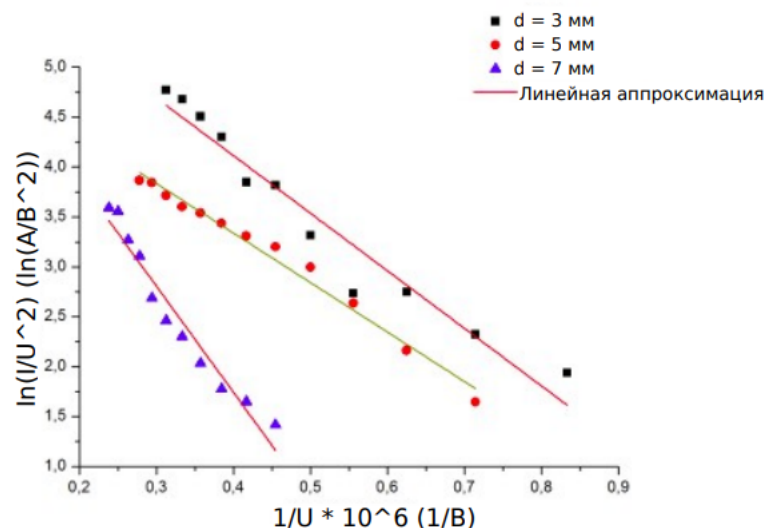


Рис. 4. ВАХ пучка ПАН волокон при различном расстоянии между катодом и анодом в координатах Фаулера – Нордгейма

Также были изучены зависимости флуктуаций автоэмиссионного тока от различных факторов, таких как расстояние от катода и анода, электрическое поле и состояние поверхности материала. Было обнаружено, что расстояние и электрическое поле оказывают значительное влияние на флуктуации автоэмиссионного тока. В частности, при уменьшении расстояния флуктуации уменьшаются, а при увеличении электрического поля — увеличиваются [19].

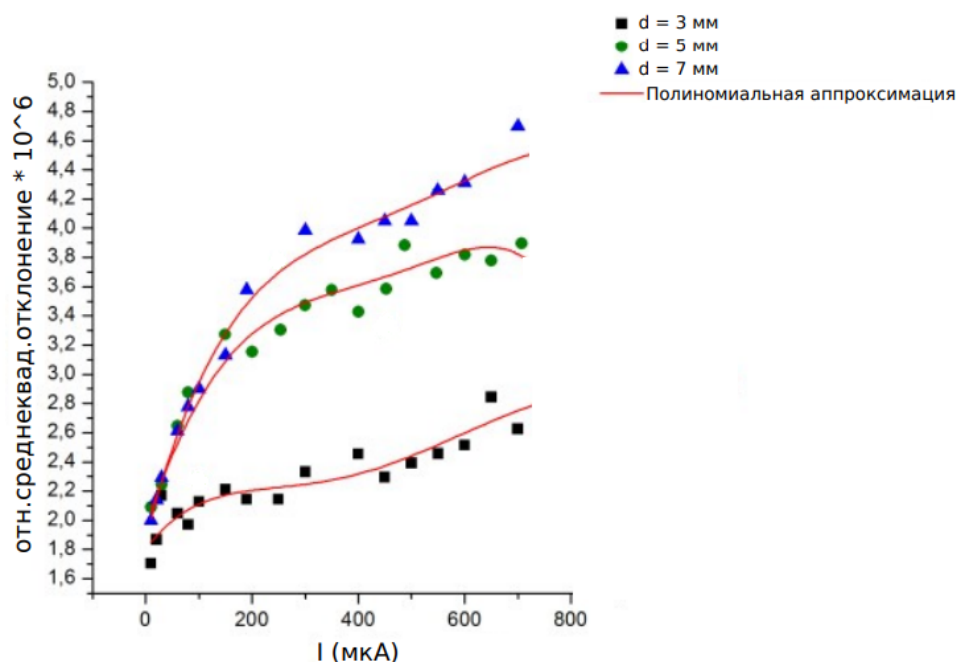


Рис. 5. Сравнительный график трех зависимостей среднеквадратичного отклонения от тока при разных расстояниях между катодом и анодом

На основе полученных результатов были предложены методы уменьшения флуктуаций автоэмиссионного тока на поверхности катодов, включая предварительное использование

травления и контроль таких параметров, как давление вакуума и температура [20, 21]. Такие методы могут быть полезны для создания более эффективных и надежных электронных устройств.

Результаты исследования флуктуаций автоэмиссионного тока на современных углеродных катодах показали, что такие флуктуации действительно существуют и могут иметь серьезное влияние на работу электронных приборов [22, 23].

В частности, было обнаружено, что амплитуда флуктуаций автоэмиссионного тока может достигать значительных значений, особенно при больших расстояниях (рис. 5). Кроме того, эти флуктуации имеют сложный спектр и обладают коррелированной структурой, что означает: флуктуации могут иметь различные временные масштабы и влиять на работу электронных приборов в разных диапазонах частот.

5. Заключение

В данном исследовании было выявлено, что флуктуации автоэмиссионного тока могут оказывать влияние на работу электронных приборов, особенно в тех случаях, когда эти приборы используются в условиях высоких частот и малых сигналов. Флуктуации могут приводить к ухудшению качества сигнала, снижению чувствительности прибора и увеличению уровня шумов.

Исследование флуктуаций автоэмиссионного тока на современных катодах позволяет более глубоко понять процессы, происходящие на поверхности электронных приборов, и способствует разработке новых методов и технологий.

Было выявлено, что частотные характеристики флуктуаций сильно зависят от типа катода. В частности, катоды с большим значением работы выхода имели меньшие амплитуды флуктуаций при высоких частотах, чем катоды с меньшим значением работы выхода. Это может быть связано с тем, что при высоких частотах электроны должны преодолеть большой энергетический барьер для выхода из катода с большим значением работы выхода, что приводит к более слабым флуктуациям.

Наконец было обнаружено, что флуктуации автоэмиссионного тока на катодах могут приводить к нежелательным эффектам при работе электронных приборов. Например, флуктуации могут приводить к шумам на выходе усилителей и искажению сигналов. Поэтому понимание физических механизмов, приводящих к флуктуациям автоэмиссионного тока, и разработка способов уменьшения этих флуктуаций являются важными задачами для дальнейшего улучшения электронных приборов и устройств.

Список литературы

1. Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. Москва : Физматгиз, 1958. С. 274.
2. Бондаренко Б.В., Макуха В.И., Шешин Е.П. Автоэлектронные эмиттеры с развитой рабочей поверхностью // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1984. Вып. 10(370). С. 44–47.
3. Бондаренко Б.В., Рыбаков Ю.Л., Шешин Е.П., Щука А.А. Автоэлектронные катоды и приборы на их основе. Москва : ЦНИИ «Электроника», 1981. С. 58.
4. Oshima C., Matsuda K., Kona T., Mogami Y., Komaki M., Murata Y., Yamashita T., Saito Y., Hata K., Takakura A. Electron Emission Sites on Carbon Nanotubes and the Energy Spectra // Jpn. J. Appl. Phys. 2001. V. 40. P. 1257.
5. Pierson O. Guide to Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications. Park Ridge, N.J. : Noyes Publications, 1992.
6. Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. Долгопрудный : МФТИ, 2001. С. 126.

7. Бондаренко Б.В., Селиверстов В.А., Шешин Е.П. Эмиссионные свойства углеродных волокон различной температуры обработки // Радиотехника и электроника, 1985. Т. 30, № 8. С. 1601–1605.
8. Lobanov S.V., Sheshin E.P. Carbonate-based field emission cathode // Materials today: Proceedings. 2018. V. 5. P. 26140–26145.
9. Colin Lee., J. Fiz. Field emission from carbon fibers // J. of Physics D: Applied Physics. 1973. V. 6. N 9. P. 1105–1114.
10. Киселев А.Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. Москва : МФТИ, 2001.
11. Никогов Б.П. Оксидный катод. Москва : Энергия, 1979.
12. Бондаренко Б.В. Проблема стабильности автоэлектронной эмиссии и некоторые пути ее решения // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1980. Вып. 9(321). С. 3–8.
13. Бондаренко Б.В. Способы повышения стабильности и срока службы автоэлектронных катодов // Электронная техника. 1973. Сер. 1, вып. 6. С. 74–82.
14. Latham R.V., Wilson D.A. The energy spectrum of electrons field emitted from carbon fibre micropoint cathodes // J. Phys. D: Appl. Phys. 1983. V. 16. P. 455–463.
15. Чупина М.С., Барсов С.В., Лазарев М.Ю., Покровский Н.Н., Антонов А.А., Григорьева И.Г., Харитонов А.В., Шипков Н.Н. и Косатиков В.И. Слоистомонолитный катод и способ его изготовления: авт. свид. СССР. № 1658756. 1991.
16. Simatunary S. Carbon fibers. Moscow : Mir, 1987.
17. Фиалков А.С. Углеродные материалы. Москва : Энергия, 1979. С. 320.
18. Шешин Е.П. Эмиссионные характеристики углеродных волокон // Физические процессы в приборах электронной техники. Москва : МФТИ, 1980. С. 6–10.
19. Бондаренко Б.В., Писаренко Ю.В., Шешин Е.П. Флуктуации автоэмиссионного тока катода из углеродного волокна // Радиотехника и электроника. 1986. Вып. 10. С. 2056–2060.
20. Баскин Л.М., Ананьев Л.Л., Борисов Д.А., Кантонистов А.А., Фурсей Г.Н. Эффект устранения ионной бомбардировки автоэлектронного катода // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 12. С. 2462–2464.
21. Шешин Е.П., Макуха В.И., Рыбаков Ю.Л. Эмиссионные свойства стержневых автокатодов из графита // Тезисы докладов 18 Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике. Москва : Наука, 1981. С. 210.
22. Sheshin E.P. Field emission of carbon fibers // Ultramicroscopy. 1999. V. 79. P. 101–108.
23. Baker F.S., Osborn A.R., Williams J. Field emission from carbon fibers // A new electron source Nature. 1972. P. 96.

References

1. Elinson M.I., Vasil'ev G.F. Field emission. Moscow : Fizmatgiz, 1958. P. 274. (in Russian).
2. Bondarenko B.V., Makuha V.I., Sheshin E.P. Autoelectronic emitters with a developed working surface. Electronic. Ser. Elektronika SVCH. 1984. I. 10(370). P. 44–47. (in Russian).
3. Bondarenko B.V., Rybakov Yu.L., Sheshin E.P., Shchuka A.A. Autoelectronic cathodes and devices based on them. Moscow : CSRII Electronic, 1981. P. 58. (in Russian).
4. Oshima C., Matsuda K., Kona T., Mogami Y., Komaki M., Murata Y., Yamashita T., Saito Y., Hata K., Takakura A. Electron Emission Sites on Carbon Nanotubes and the Energy Spectra. Jpn. J. Appl. Phys. 2001. V. 40. P. 1257.

5. *Pierson O.* Guide to Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications. Park Ridge, N.J. : Noyes Publications, 1992.
6. *Sheshin E.P.* Surface structure and field emission properties of carbon materials. Dolgoprudny : MIPT, 2001. P. 126. (in Russian).
7. *Bondarenko B.V., Seliverstov V.A., Sheshin E.P.* Emission properties of carbon fibers at different processing temperatures. Radio engineering and electronics. 1985. V. 30, N 8. P. 1601–1605. (in Russian).
8. *Lobanov S.V., Sheshin E.P.* Carbonate-based field emission cathode. Materials today: Proceedings. 2018. V. 5. P. 26140–26145.
9. *Colin Lee., J. Fiz.* Field emission from carbon fibers. J. of Physics D: Applied Physics. 1973. V. 6. N 9. P. 1105–1114.
10. *Kiselev A.B.* Metal oxide cathodes of electronic devices. Moscow : MIPT, 2001. (in Russian).
11. *Nikonov B.P.* Oxide cathode. Moscow : Energiya, 1979. (in Russian).
12. *Bondarenko B.V.* Field emission stability problems and some ways to solve it // Electronic. Ser. Elektronika SVCH. 1980. I. 9(321). P. 3–8. (in Russian).
13. *Bondarenko B.V.* Methods for increasing the stability and service life of autoelectronic cathodes. Electronic. 1973. Ser. 1, N 6. P. 74–82. (in Russian).
14. *Latham R.V., Wilson D.A.* The energy spectrum of electrons field emitted from carbon fibre micropoint cathodes. J. Phys. D: Appl. Phys. 1983. V. 16. P. 455–463.
15. *Chupina M.S., Barsov S.V., Lazarev M.Yu., Pokrovsky N.N., Antonov A.A., Grigorieva I.G., Kharitonov A.V., Shipkov N.N. and Kosatnikov V.I.* Layered-monolithic cathode and method of its manufacture: auth. view. USSR. N 1658756. 1991. (in Russian).
16. *Simamuriy S.* Carbon fibers. Moscow : Mir, 1987.
17. *Fialkov A.S.* Carbon graphite materials. Moscow : Energiya, 1979. P. 320. (in Russian).
18. *Sheshin E.P.* Emissive characteristics of carbon fibers. Physical processes in electronic devices. Moscow : MIPT, 1980. P. 6–10. (in Russian).
19. *Bondarenko B.V., Pisarenko Yu.V., Sheshin E.P.* Field emission current fluctuations of carbon fiber cathodes. Radio Engineering and Electronics. 1986. I. 10. P. 2056–2060. (in Russian).
20. *Baskin L.M., Anan'ev L.L., Borisov D.A., Kantonistov A.A., Fursey G.N.* Effect of elimination of ion bombardment of an autoelectronic cathode. Radio Engineering and Electronics. 1983. V. 28, N 12. P. 2462–2464. (in Russian).
21. *Sheshin E.P., Makukha V.I., Rybakov Yu.L.* Emission properties of graphite rod autocathodes. Abstracts of reports of the 18th all-Union conference on emission electronics, Moscow : Nauka, 1981. P. 210. (in Russian).
22. *Sheshin E.P.* Field emission of carbon fibers. Ultramicroscopy. 1999. V. 79. P. 101–108.
23. *Baker F.S., Osborn A.R., Williams J.* Field emission from carbon fibers. A new electron source Nature. 1972. P. 96.

Поступила в редакцию 18.12.2023