



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.9>

УДК: 537.533.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ АВТОЭМИССИОННОГО ТОКА КАТОДОВ ИЗ ПАН УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

И.Е. Базанов, А.В. Кудряшов, Л.С. Майорова,
Фунг Дык Мань, Е.П. Шешин

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

Статья поступила в редакцию 3 мая 2024 г.

Аннотация. В данной работе представлен процесс получения автоэлектронной эмиссии, а также исследование флуктуаций автоэмиссионного тока углеродных катодов на основе полиакрилонитрильных (ПАН) волокон. Актуальность данной статьи подтверждается тем, что технология создания автоэмиссии определяет эффективность работы электронных приборов и устройств, а показателем качества этих приборов могут выступать флуктуации тока. При этом в данном исследовании показано, что степень флуктуаций тока при автоэлектронной эмиссии зависит от геометрии устройства. Как итог, получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) при разных расстояниях между катодом и анодом.

Ключевые слова: автоэмиссия, ВАХ, углеродные катоды, ПАН-волокна, флуктуации, электронные приборы.

Автор для переписки: Кудряшов Антон Владимирович, kudriashov.av@mipt.ru

Введение

Автоэмиссия – явление, в процессе которого электроны испускаются с поверхности тела без приложения внешних сил. Это называется эффектом туннелирования. Он возникает, когда электроны на поверхности материала преодолевают потенциальный барьер [1].

Процесс автоэмиссии имеет большое значение для функционирования разнообразных электронных устройств. Катоды, применяемые в данных приборах, создают электронный поток, что является предметом исследования. Особенности в технологических процессах изготовления катодов дают возможность достигать высоких показателей эффективности и устойчивости пучка электронов [2].

В данной работе рассматривается автоэмиссия с использованием катодов на основе ПАН углеродного волокна, исследуются флуктуации тока и анализируется, как геометрия устройства влияет на шумы тока, а, следовательно, и на процесс автоэмиссии в целом.

Флуктуации автоэмиссионного тока являются индикатором качества устройства. В связи с этим исследование шумов тока представляет собой одну из ключевых задач в контексте развития электроники и электротехнической промышленности. А катоды из углеродных материалов, таких как ПАН-волокно, нанотрубки, графен, Q-углерод и другие, обладают большим потенциалом для использования в производстве высокопроизводительных электронных приборов благодаря большей стабильности тока [3, 4]. Вместе с тем углеродным материалам присущи особенности функционирования, обусловленные их структурой и электротехническими характеристиками, которые могут влиять на колебания эмиссионного тока [5, 6, 7].

1. Методика эксперимента

Для измерения параметров автоэмиссионного тока применялось специализированное оборудование, которое позволяет фиксировать ток на поверхности катода в режиме реального времени [8, 9, 10]. На Рис. 1 показана

развертка автоэмиссионного тока, полученная на цифровом осциллографе. Виден зашумленный сигнал.



Рис. 1. Развертка зашумленного сигнала тока автоэмиссии.

Для исследования спектральной плотности мощности и автокорреляционной функции использовались специализированные программные инструменты. Спектральную плотность мощности определяли, раскладывая временной ряд эмиссионного тока в гармонический ряд. Автокорреляционная функция использовалась для установления характерного временного интервала, в рамках которого флуктуации наблюдаются на поверхности катода [11, 12, 13]. Ниже приведены формулы для расчета среднего значения тока по выборке и стандартного отклонения тока, использованные при вычислении.

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

где I – средний по выборке ток,

I_n – ток при n -ом измерении,

N – количество измерений.

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

где σ – относительное среднеквадратичное отклонение тока,

I – автоэмиссионный ток.

2. Материалы

ПАН-углеродные волокна образуются в результате высокотемпературной обработки полиакрилонитрильных полимерных волокон. Они имеют диаметр от 6 до 10 мкм и на 99,9% состоят из углерода. Полиакрилонитрильные углеродные волокна считаются самыми стабильными катодами для работы в техническом вакууме [14].

Атомы в таких волокнах образуют фибриллы – кристаллы тетрагональной формы, объединенные между собой аморфной областью. Такая структура обеспечивает эластичность волокон. Эмиссионными центрами этого вида катодов служат микровыступы на торцевой поверхности волокна, образованные фибриллами или их группами. Таких выступов на катоде насчитывается ~100 [15].

При работе катода разрушение отдельных микровыступов не оказывает значительного влияния на эмиссионный ток, так как средняя численность микровыступов в процессе функционирования автокатаода остаётся постоянной [16]. Это обуславливает высокую стабильность эмиссионного тока и продолжительный срок службы катода при техническом вакууме [17]. Рис. 2 демонстрирует изображение одиночного ПАН-волокна, полученного с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

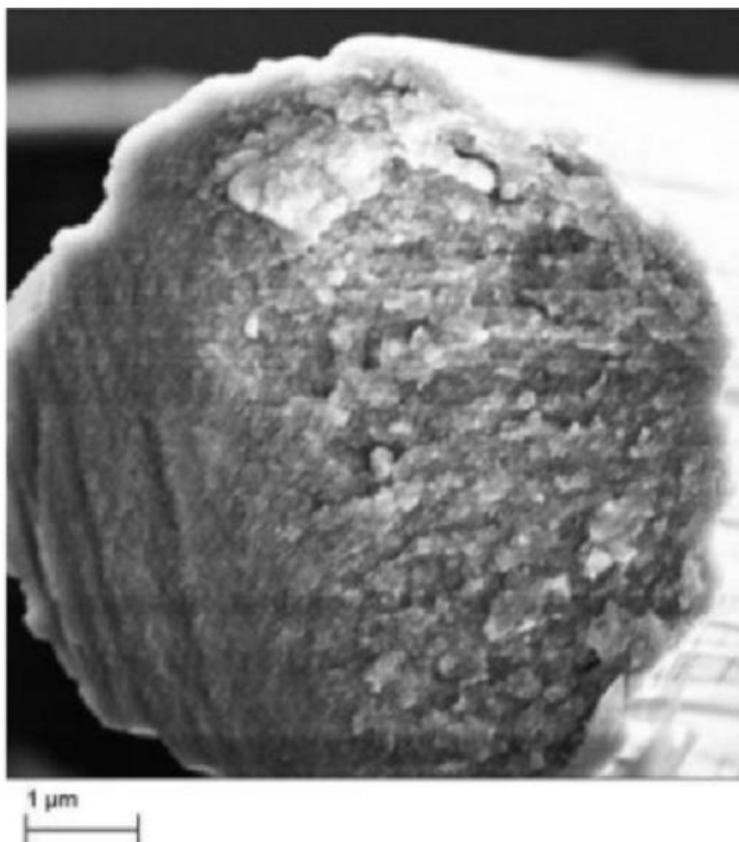


Рис. 2. Изображение одиночного ПАН-волокна, полученное с помощью РЭМ.

3. Результаты и обсуждения

Проведен анализ зависимостей колебаний автоэмиссионного тока от разности потенциалов, а также от расстояния между катодом и анодом. Данные эксперименты с углеродными катодами на основе ПАН-волокон, позволили сравнить их свойства и определить, какие параметры наиболее подходят для большей стабильности тока. ВАХ, полученные по итогам исследований, представлены на Рис. 3. На Рис. 4 приведены эти же ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма.

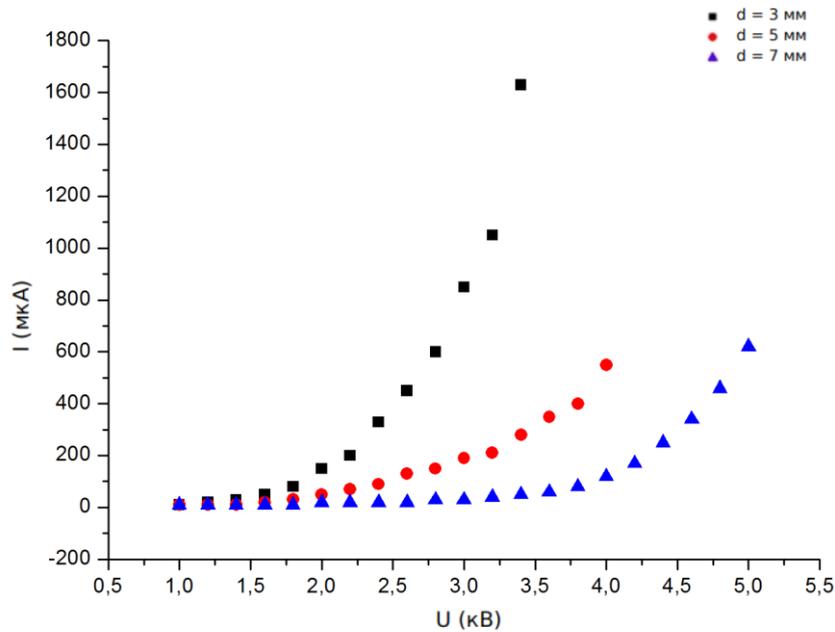


Рис. 3. ВАХ пучка ПАН-волокон при различном расстоянии между катодом и анодом.

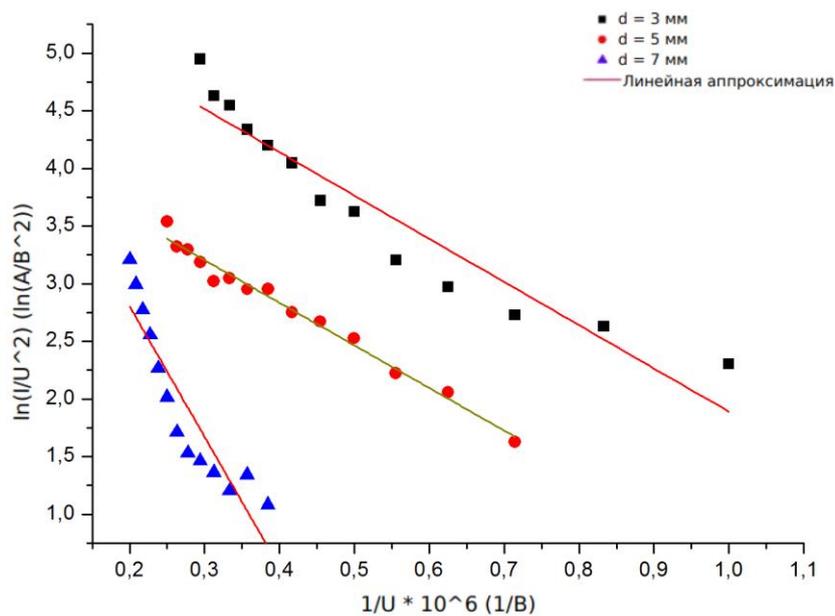


Рис. 4. ВАХ пучка ПАН-волокон при различном расстоянии между катодом и анодом в координатах Фаулера-Нордгейма.

Изнучена зависимость колебаний эмиссионного тока от таких параметров, как расстояние между катодом и анодом, электрическое поле и состояние поверхности образца. Обнаружено, что расстояние и электрическое поле

оказывают существенное влияние на автоэмиссионный ток. В частности, с сокращением дистанции между анодом и катодом флуктуации тока снижаются, а увеличение напряженности поля приводит к обратному эффекту.

Исследование флуктуаций тока углеродных автокатодов на основе ПАН-волокон показало, что подобные колебания действительно происходят и могут существенно влиять на работу электронных устройств.

В частности, установлено, что размах флуктуаций может достигать существенных значений, особенно на больших расстояниях между анодом и катодом. К тому же эти колебания имеют сложный частотный спектр и обладают корреляционной структурой, то есть флуктуации могут обладать разными временными масштабами и влиять на функционирование электронных устройств в различных частотных диапазонах. При этом вероятностное распределение тока (Рис. 5) можно описать нормальным распределением, что может облегчить моделирование этого процесса в будущем и ускорить получение данных в ходе экспериментов.

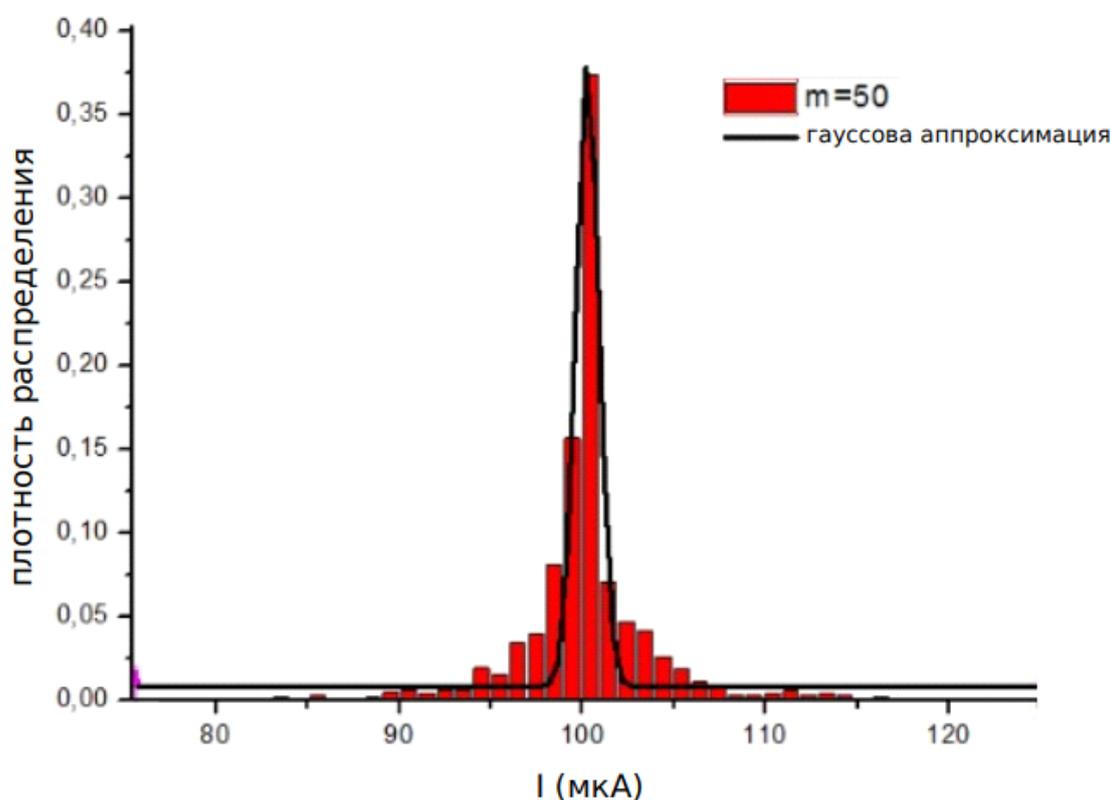


Рис. 5. Распределение амплитуды шума автоэмиссионного тока.

Заключение

В ходе исследования выяснилось, что автоэмиссионные колебания тока могут значительно влиять на функционирование электроники, особенно когда речь идет о высокочастотных приборах с малым уровнем сигнала. Эти колебания способны ухудшить качество сигнала, снизить чувствительность оборудования.

Изучение же флуктуаций автоэмиссионного тока с использованием углеродных катодов из ПАН-волокон помогает лучше понять процессы на поверхностях материалов и способствует созданию новых методов и технологических решений. А выяснение физических механизмов колебаний тока автоэлектронной эмиссии и создание методов их подавления – важные задачи для дальнейшего усовершенствования электронных приборов и устройств.

Литература

1. Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. Москва: Физматгиз, 1958. С. 274.
2. 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.
3. Pierson O. Guide to Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications. Noyes. Park Ridge. N. J. 1992.
4. Oshima C., Matsuda K., Kona T., Mogami Y., M. 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. Lobanov S.V., Sheshin E.P. Carbonate-based field emission cathode // Materials today: Proceedings. 2018. V. 5. P. 26140–26145.
6. Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. Долгопрудный: МФТИ, 2001. С. 126.
7. Colin Lee., J. Fiz. Field emission from carbon fibers // J. of Physics D: Applied Physics. 1973. V. 6. N. 9. P. 1105–1114.

8. Бахтизин Р.З., Гоц С.С. Информационно-измерительный комплекс на базе микро-ЭВМ "Электроника ДЗ-28" для исследования спектральных характеристик случайных процессов // Приборы и техника эксперимента. 1985. Н. 3. С. 216.
9. Бондаренко Б.В. Проблема стабильности автоэлектронной эмиссии и некоторые пути ее решения // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1980. Вып. 9 (321). С. 3-8.
10. Бондаренко Б.В. Способы повышения стабильности и срока службы автоэлектронных катодов // Электронная техника. 1973. Сер. 1, вып. 6. С. 74–82.
11. Ван дер Зил А. Шум, источники, описание, измерение. М.: Сов. радио, 1973.
12. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М.: Энергия, 1972.
13. 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. Слоисто-монокристаллический катод и способ его изготовления: авт. свид. СССР. №. 1658756. 1991.
14. Simamuriy S. Carbonfibers. Moscow: Mir, 1987.
15. Фиалков А.С. Углеродные материалы. Москва: Энергия, 1979. С. 320.
16. Yamamoto S., Hosoki S., Fukuhara M. Stability of carbon field emission current // Surf. Sci. 1979. V. 86. P. 734-742.
17. Шешин Е.П. Эмиссионные характеристики углеродных волокон // Физические процессы в приборах электронной техники. Москва: МФТИ, 1980. С. 6–10.

Для цитирования:

Базанов И.Е., Кудряшов А.В., Майорова Л.С., Фунг Дык Мань, Шешин Е.П. Исследование флуктуаций автоэмиссионного тока катодов из ПАН углеродных волокон. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.9>