

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 621.382.029.6

**Оценка работы выхода электронов из углеродной пленки,
полученной электродуговым распылением графита в магнитном поле**

**Залим Мухамедович Хамдохов¹, Заур Чамилович Маргушев^{2,3}, Хамидби Хабасович Лосанов³,
Тешев Руслан Шагбанович⁴**

^{1,2} Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, Нальчик, Россия

^{3,4} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

¹ hamdohov@mail.ru

² zmargush@yandex.ru

³ losanovh@mail.ru

Аннотация. Исследованы автоэмиссионные характеристики углеродных пленок, полученных электродуговым распылением графита в магнитном поле. На основе анализа экспериментальных прямых Фаулера – Нордгейма показано, что работа выхода электронов из углеродной пленки составила ~ 0,2 эВ. Вольтамперные характеристики снимались при межэлектродном расстоянии 10 мкм (от поверхности углеродной пленки и анода при комнатной температуре).

Ключевые слова: автоэмиссионная характеристика, углеродная пленка, электродуговой метод, работа выхода электронов

Для цитирования: Хамдохов З.М., Маргушев З.Ч., Лосанов Х.Х., Тешев Р.Ш. Оценка работы выхода электронов из углеродной пленки, полученной электродуговым распылением графита в магнитном поле // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 34–37.

PHYSICS

Original article

**Evaluation of the work function of electrons from
a carbon film obtained by electric arc sputtering of graphite in a magnetic field**

Zalim M. Khamdokhov¹, Zaur Ch. Margushev^{2,3}, Khamidbi Kh. Losanov³, Ruslan Sh. Teshev

^{1,2} Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

³ Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹ hamdohov@mail.ru

² zmargush@yandex.ru

³ losanovh@mail.ru

Abstract. The autoemission characteristics of carbon films obtained by electric arc sputtering of graphite in a magnetic field were studied. Based on the analysis of the experimental Fowler-Nordheim curves, it was shown that the work function of electrons from the carbon film was ~ 0.2 eV. The current-voltage characteristics were measured at a distance of 10 μm between the carbon film surface and the anode at room temperature.

Keywords: auto-emission characteristic, carbon film, electric arc method, electron work function

For citation: Khamdokhov Z.M., Margushev Z.Ch., Losanov Kh.Kh., Teshev R.Sh. Evaluation of the work function of electrons from a carbon film obtained by electric arc sputtering of graphite in a magnetic field // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):34–37.

Введение

В настоящее время наиболее перспективны автоэмиссионные катоды на основе углеродных наноматериалов (графен, углеродные нанотрубки), отличающиеся высокой стабильностью тока эмиссии и невысокими величинами рабочего напряжения [1–4]. Для получения углеродных нанотрубок широко используется электродуговой метод, заключающийся в распылении графитового электрода в плазме дугового разряда, горящего в атмосфере инертного газа посредством дугового разряда между электродами с последующей конденсацией и ростом наночастиц [5–7]. Однако проблема получения автоэмиссионных катодов на основе таких материалов для приборов вакуумной электроники не получила завершённого технического решения и продолжает оставаться актуальной проблемой.

Цель работы – экспериментально-расчетная оценка работы выхода электронов из углеродных пленок, полученных электродуговым методом с применением магнитного поля для фильтрации углеродной плазмы от микрочастиц графита.

Методика работы

Объектом исследования послужили катоды на основе автоэмиссионных сред из углеродных пленок, нанесенных электродуговым методом на алюминиевые пластины толщиной 2 мм. Исследуемые углеродные пленки были получены на установке вакуумного напыления износостойких покрытий УВНИПА. Осаждение пленок проводилось при температуре не более 80 °С и токе дуги 70 А. На образец подавался отрицательный потенциал 150 В. Толщина покрытий (примерно 0,3 мкм) контролировалась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. Топография поверхности исследуемых образцов углеродных пленок проводилась с помощью растрового электронного микроскопа JEOLJSM-6610LV.

Исследование автоэмиссионных характеристик углеродных пленок проводилось в вакуумной камере со шлюзовым устройством, позволяющим измерять автоэмиссионные токи различных образцов за один цикл откачки (рисунок 1). Катодно-анодный узел, представлял собой устройство с катодом из углеродной пленки и анодом из нержавеющей стали с нанесенным телевизионным люминофором. Катодно-анодный узел крепился на сменном механизме, который позволял производить перемещение катода внутри вакуумной камеры и фиксировать взаимное расположение катода и анода с точностью 5 мкм.

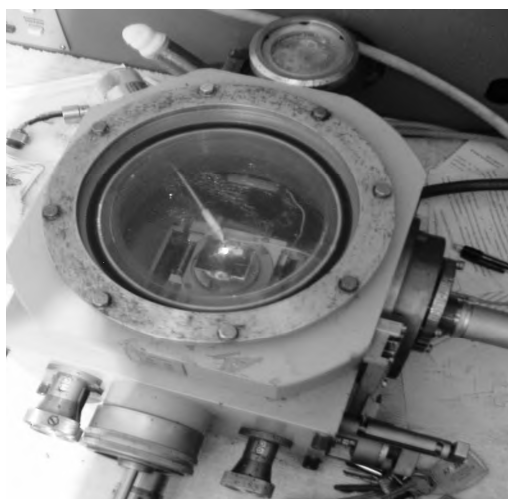


Рисунок 1 – Вакуумная камера для измерения ВАХ

Результаты работы

На *рисунке 2* показано типичное изображение поверхности углеродной пленки, полученное с помощью электронного микроскопа.

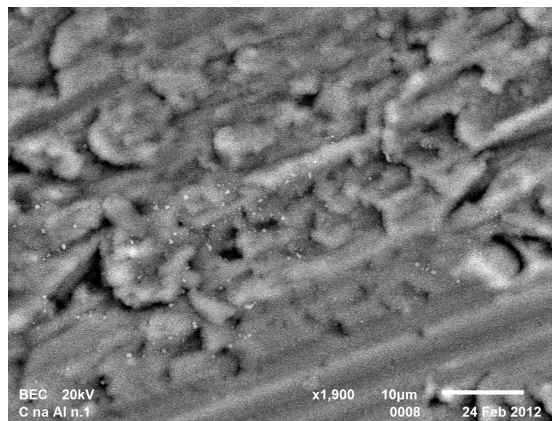


Рисунок 2 – Электронное изображение поверхности углеродной пленки

Видно, что пленка имеет практически гладкую поверхность.

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) образцов проводились в камере, из которой откачивался воздух до давления 6×10^{-4} Па при межэлектродном расстоянии 10 мкм.

На *рисунке 3* представлена ВАХ, построенная в координатах Фаулера – Нордгейма. Здесь I – ток эмиссии, V – напряжение. Как видно из рисунка, ВАХ является прямолинейной, то есть наблюдается автоэлектронная эмиссия.

Работа выхода электронов из углеродной пленки, содержащей углеродные нанотрубки, определяется формулой [8]:

$$\phi = \sqrt[3]{(3,549 \cdot 10^{-8} k \operatorname{tg} \alpha)^2}, \quad (1)$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона прямой Фаулера–Нордгейма относительно оси абсцисс, ϕ – работа выхода электронов, k – коэффициент усиления поля.

Используя тангенс угла наклона прямой, полученный из экспериментальной ВАХ [8], и расчетное значение коэффициента усиления поля для углеродных нанотрубок, равное 160, согласно работе по формуле 1 можно оценить значение $\phi \sim 0,2$ эВ.

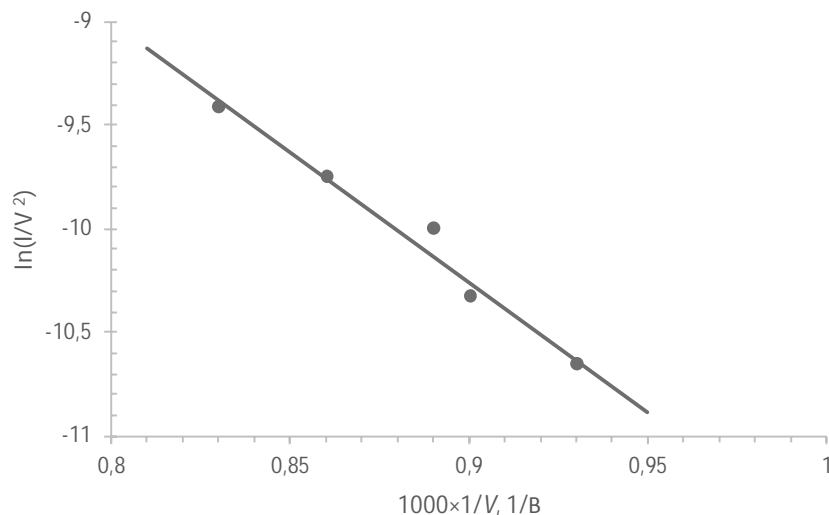


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость автоэмиссионного тока углеродной пленки от напряженности поля

Заключение

Исследованы автоэмиссионные характеристики углеродных пленок, полученных электродуговым распылением графита в магнитном поле. На основе анализа экспериментальных ВАХ показано, что работа выхода электронов из углеродной пленки составила $\sim 0,2$ эВ.

Библиография

1. Гуляев Ю.В. Углеродные нанотрубные структуры – новый материал для эмиссионной электроники // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 5. С. 389–391.
2. Конакова Р.В., Охрименко О.Б., Светличный А.М., Агеев О.А., Волков У.Ю., Коломийцев А.С., Житяев И.Л., Спиридонов О.Б. Характеризация автоэмиссионных катодов на основе пленок графена на SiC // ФТП. 2015. Т. 49, № 9. С. 1278–1281.
3. Фурсей Г.Н., Поляков М.А., Кантонистов А.А., Яфасов А.М., Павлов Б.С., Божевольнов В.Б. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 6. С. 71–77.
4. Савельев С.Г., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В., Григорьев Ю.А. Исследование пленочных углеродных катодов, полученных методом пиролиза гептана // Материалы международной конференции «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ». Саратов, 2001. С. 138.
5. Хамдохов Э.З., Тешев Р.Ш., Хамдохов З.М., Хамдохов А.З., Калажоков З.Х., Калажоков Х.Х. Получение углеродных пленок методом электродугового распыления графита в магнитном поле // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 12. С. 68–73.
6. Khamdokhov Z.M., Margushev Z.Ch., Kalazhokov Z.Kh., Kushchov Kh.B., Kalazhokov Kh.Kh., Teshev R.Sh. On the Phase Composition of Nanoscale Metal – Carbon Films Produced by the Two-Evaporator Method // The Journal of Surface Investigation. X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17, N 6. P. 8317–8321.
7. Хамдохов З.М., Маргушев З.Ч. Особенности структуры композитных пленок Cu-C, полученных ионно-плазменным методом // Труды МФТИ. 2024. Т. 16, № 3. С. 127–132.
8. Григорьев Ю.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д., Пименов В.Г. Экспериментально-расчётная оценка работы выхода электронов из материалов автоэмиссионных катодов при анализе их качества // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 3 (40), № 1. С. 119–124.