

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО РОССИИ  
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИИ  
В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Материалы VII Международной  
научно-технической конференции**

**1–6 июня 2015 г.**

НАЛЬЧИК 2015

УДК 621: 531.91  
ББК 31.21  
М 33

*Редакционная коллегия*

А. М. Кармоков (ответственный редактор)  
О. А. Молоканов (ответственный секретарь)

**Микро- и нанотехнологии** в электронике. Материалы VII Международной научно-технической конференции — Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2015. — 392 с.

Публикуются материалы докладов, представленных на VII Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», проходившей в Эльбрусском учебно-научном комплексе Кабардино-Балкарского государственного университета 1—6 июня 2015 г.

Материалы докладов даны в авторской редакции.

ISBN 978-5-93680-871-5

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ  
ВАКУУМНОЙ АВТОЭМИССИОННОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Житяев И.Л., Светличный А.М., Спиридонов О.Б.,  
Демьяненко М.В. , Магомеднебиев З.М.

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения  
Южного федерального университета, Таганрог  
jityaev.igor@gmail.com

*В работе рассмотрены перспективные углеродные материалы, применяемые в изготовлении автоэмиссионных катодов. Проведен сравнительный анализ углеродных материалах с низким порогом автоэлектронной эмиссии: алмазоподобные пленки, углеродные нанотрубки, графен. Показана перспективность применения автоэмиссионных катодов на основе углеродных наноматериалов для СВЧ устройств вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники.*

### **Введение**

Решение одной из проблем, связанной с пороговыми значениями начала эмиссии, долговечностью и стабильностью работы прибора, зависит от материала, используемого в производстве автоэмиссионного катода. В процессе автоэлектронной эмиссии катод подвергается ионной бомбардировке, адсорбции и десорбции молекул остаточных газов, происходит поверхностная миграция атомов. Катод может подвергаться воздействию радиации и повышенным температурам. Перечисленные процессы влияют на стабильность автоэлектронной эмиссии вследствие трансформации, перегрева и разрушения эмитирующей поверхности автокатада и создают определенные ограничения при выборе материала автоэмиссионного катода [1].

Базовыми материалами автоэмиссионного катода изначально являлись тугоплавкие металлы (Ta, Mo, W) [2, 3]. Затем нашли применение в автоэмиссионной электронике полупроводники [4, 5]. Первые работы по автоэмиссии углеродных материалов свидетельствовали о низкой стабильности структуры катода. С появлением новых форм углерода (фуллерен, углеродные нанотрубки, графен, углеродные алмазоподобные пленки и др.) началось активное изучение их автоэмиссионных свойств. Характерной особенностью углеродных наноматериалов являются уникальные механические, электрические и температурные свойства, высокое аспектное отношение. В статье проводится сравнительный анализ перспективных углеродных материалов, применяемых в автоэмиссионной наноэлектронике.

## **Алмазоподобные углеродные пленки**

Вследствие нестабильности углеродных автоэммиттеров исследования были направлены на изучение автоэмиссионных свойств алмазных и алмазоподобных углеродных пленок. Достоинством подобных пленок является высокая подвижность носителей заряда, устойчивость к высоким давлению и температуре [6, 7]. Использование алмазоподобных пленок для автоэлектронных приборов обусловлено их свойством отрицательного электронного сродства, что способствует снижению напряженности электрического поля, необходимой для полевой эмиссии электронов с поверхности автокатада, до значений порядка  $10^6$  В/м [8]. В работе [9] была исследована диодная автоэмиссионная структуры на основе наноалмазографитовых пленок и получена вольт-амперная характеристика (ВАХ). Приведенные ВАХ подтверждают наличие автоэмиссии с поверхности наноалмазографитовой пленки при пороговой напряженности поля  $\sim 10^6$  В/м. Одним из способов снижения пороговых значений напряженности электрического поля является формирование проводящих каналов на поверхности легированного алмаза, обеспечивающих транспорт электронов к поверхности и их эмиссию с острия алмазного катода [10]. В итоге автоэммиттеры из алмазоподобных углеродных пленок являются эффективными многообещающими элементами вакуумной наноэлектроники.

## **Углеродные нанотрубки**

Благодаря высокому аспектному отношению углеродной нанотрубки (УНТ), позволяющему создать поле высокой напряженности при малых напряжениях, исследование её автоэмиссионных свойств привлекает внимание большинства ученых, работающих в области вакуумной эмиссионной электроники [11, 12]. Углеродным нанотрубкам свойственны низкие пороговые напряжения [13]. Наряду с единичными углеродными нанотрубками также исследуются массивы УНТ. Высокие значения плотности тока, в несколько раз превышающие единичные нанотрубки, были получены из матрицы блоков углеродных нанотрубок [14, 15]. Использование углеродных нанотрубок в эмиссионной электронике является перспективным, но существует ряд проблем, которые связаны в первую очередь с механической прочностью, однородностью распределения нанотрубок по поверхности катода и стабильностью эмиссионных характеристик.

## **Графен**

Для графена характерна низкопороговая полевая эмиссия, присущая практически всем наноуглеродным эмиттерам [16, 17]. Автоэлектронная эмиссия графена наблюдается как с поверхности, так и с торца графенового листа. В первых экспериментах изучались эмиссионные характеристики единичных графеновых слоев, полученных отслоением от объемного графита, и их неупорядоченных массивов [21, 22]. Для практического приме-

нения важным является упорядоченный массив с контролируемыми геометрическими и электрическими характеристиками. Таким структурам свойственны высокие плотности тока. Исследование автоэмиссионных свойств графена, выращенного на поверхности автокатада из карбида кремния с радиусом закругления острия  $\sim 10^{-8}$  м, показало низкие значения порогового напряжения (менее 10 В), плотность тока имеет порядок  $10^6$  А/м<sup>2</sup> [23-25].

### Выводы

По результатам проведенного обзора можно сделать выводы об актуальности использования наноуглеродных материалов в вакуумной автоэмиссионной электронике. Получены сведения о низкополевой эмиссии алмазоподобных пленок, углеродных нанотрубок, графена при высоких плотностях тока. Измерения стабильности автоэмиссионного тока свидетельствуют о малых флуктуациях в течение измерений. Сравнивая рассмотренные материалы, можно сказать, что наиболее предпочтительным являются автоэмиттеры из карбида кремния с пленками графена, полученными термической деструкцией SiC. В этом случае графен формируется на всей поверхности подложки SiC и является её естественным продолжением. При росте нанотрубок наблюдается разброс параметров по подложке. Сопротивление и структурные дефекты контакта углеродных нанотрубок к подложке вносит погрешности в измерения эмиссионных характеристик. Происходит тепловая деградация углеродных нанотрубок во время эмиссии. Алмазоподобные пленки имеют низкую плотность эмиссионных центров и рассогласование кристаллической решетки с полупроводниковой подложкой, на которой выращена пленка. В итоге наблюдается температурная нестабильность структур. Пленки графена на карбиде кремния лишены подобных недостатков. Приведенные в обзоре результаты будут полезны при проектировании элементов автоэмиссионной микро- и нанoeлектроники.

Результаты работы были получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета. Исследование выполнено в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (Задание № 16.1154.2014/К).

### Литература

1. Ненакаливаемые катоды / под ред. М.И. Елинсона. М.: Сов Радио, 1974. 336 с.
2. Широков Е.Г. Автоэлектронная эмиссия системы вольфрамовых острий. Радиотехника и электроника, 1964. – Т. 9, вып. 7. – С. 1320-1321. Научная библиотека диссертаций и авторефератов.

3. Дюжев Н., Тишин Ю. Молибденовая и кремниевая технологии плоских автоэмиссионных экранов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2001. – № 1. – С. 50-53.
4. Фурсей Г.Н., Егоров Н.В. Стабильный полупроводниковый эмиссионный катод // ЖТФ. – 1972. – Т. 42, вып. 5. – С. 1090-1092.
5. Stetsenko V.V., Yatsenko A.F., Miroshnichenko L.S. Effect of surface states on transient processes in silicon field cathodes // Physica Status Solidi (a). – 1970. – Vol. 1, № 2. – P. 349-355.
6. Расчет подвижности носителей заряда в алмазе при низких температурах / А.С. Батурин, В.Н. Горелкин, В.Р. Соловьев и [др.] // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, вып. 7. – С. 897-901.
7. Thermal conductivity of isotopically modified single crystal diamond / L. Wei, P.K. Kuo, R.L. Thomas [et al.] // Physical Review Letters. – 1993. – № 70. – P. 3764-3767.
8. Quantum photoyield of diamond (111) – A stable negative affinity emitter / F.J. Himpsel, J.A. Knapp, J.A. Van Vechten [et al.] // Physical Review B. – 1979. – Vol. 20, № 2. – P. 624-627.
9. Наноалмазографитовые автоэммитеры для интегральных автоэмиссионных элементов / Н. Зайцев, Е. Горнев, С. Орлов [и др.] // Наноиндустрия. – 2011. – № 5. – С. 36-39.
10. Автоэлектронная эмиссия из наноалмаза / С.А. Ляшенко, А.П. Волков, Р.Р. Исмагилов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, вып. 6. – С. 1-8.
11. Field emission from short and stubby vertically aligned carbon nanotubes / M. Chhowalla, C. Ducati, N. L. Rupesinghe [et al.] // Applied physics letters. – 2001. – Vol. 79, № 13. – P. 2079-2081.
12. Гуляев Ю.В. Углеродные нанотрубные структуры - новый материал для эмиссионной электроники // Вестник российской академии наук. – 2003. – Т. 73, № 5. – С. 389-391.
13. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 4. – С. 401-438.
14. Self-Oriented Regular Arrays of Carbon Nanotubes and Their Field Emission Properties / Sh. Fan, M.G. Chapline, N.R. Franklin [et al.] // Science. – 1999. – Vol. 283. – P. 512-514.
15. Large field emission current density from well-aligned carbon nanotube field emitter arrays / I.E. Sohn, S. Lee, Y.-H. Song [et al.] // Current Applied Physics. – 2001. – № 1. – P. 61-65.
16. Field emission from graphene based composite thin films / G. Eda, H.E. Unalan, N. Rupesinghe [et al.] // Applied physics letters. – 2008. – № 93. – 233502.
17. A Study on Field Emission Characteristics of Planar Graphene Layers Obtained from a Highly Oriented Pyrolyzed Graphite Block / S.W. Lee, S.S. Lee, E.H. Yang // Nanoscale Research Letters. – 2009. – № 4. – P. 1218-1221.

18. Field emission from vertically aligned few-layer graphene / A. Malesevic, R. Kemps, A. Vanhulsel, [et al.] // Journal of applied physics. – 2008. – № 104. – P. 084301.
19. Ultra low field electron emission of graphene exfoliated from carbon cloth / J. Liu , B. Zeng , X. Wang [et al.] // Applied Physics Letters. – 2012. – № 101. – P. 153104.
20. Оценка автоэмиссионных свойств наноструктур на основе карбида кремния и графена / О.Б. Охрименко, Р.В. Конакова, А.М. Светличный [и др.] // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2012. – Т. 10, №2. – С. 335-343.
21. Comparative characteristics of the Raman scattering spectra of graphene films on conductive and semi-insulating 6H-SiC substrates / R.V. Konakova, E.Yu. Volkov, A.M. Svetlichnyi [et. al.] // Semiconductors. – 2013. – Vol. 47, Iss. 6. – P. 812-814.
22. Modelling of the influence of a pointed field emission cathode design from the silicon carbide with graphene film on the electric field strength / A.M. Svetlichnyi, O.A. Ageev, I.L. Jityaev [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 752-753. – P. 163-167.

PROMISING CARBON MATERIALS FOR  
VACUUM FIELD EMISSION NANOELECTRONICS

Jityaev I.L., Svetlichnyi A.M., Spiridonov O.B.,  
Demyanenko M.V., Magomednebiev Z.M.

Institute of Nanotechnologies, Electronics, and Electronic  
Equipment Engineering, Southern Federal University, Taganrog  
jityaev.igor@gmail.com

*Promising carbon materials used in the manufacture of field emission cathodes was discusses in this paper. A comparative analysis of carbon materials with a low threshold field emission - diamond-like films, carbon nanotubes, graphene - was conducted. Relevance of using the field emission cathodes based on carbon nanomaterials for UHF devices of vacuum field emission nanoelectronics was shown.*