

## **Исследование влияния геометрических факторов на ток автоэмиссионного многоострийного катода на основе карбида кремния**

*В работе проведено исследование автоэмиссионного многоострийного катода на основе карбида кремния. Рассмотрены различные варианты размеров катодной столбчатой мезоструктуры и исследовано их влияние на ток эмиссии.*

**Ключевые слова:** автоэмиссионный многоострийный катод, карбид кремния, катодная мезоструктура, электронный прибор миллиметрового диапазона

Автоэмиссионные катоды обеспечивают вакуумным электронным приборам ряд важных преимуществ по сравнению с традиционными термокатадами: мгновенное включение электронных устройств в рабочий режим и уменьшение габаритов электронных устройств за счет исключения источника питания для подогрева катода. Указанные преимущества весьма перспективны для применения автоэмиссионных катодов в приборах миллиметрового диапазона, работающих в космических и мобильных коммуникационных системах.

Современные исследования многоострийных автоэлектронных катодов ведутся по следующим направлениям:

- катоды на основе углеродных нанотрубок;
- катоды из графена и содержащих графен материалов;
- катоды из окислов металлов;
- многоострийные полупроводниковые полевые катоды с двухслойными защитными покрытиями;
- катоды из карбида кремния.

В перечисленных направлениях получены отдельные результаты, сопоставимые по плотности эмиссионного тока с термоэлектронными катодами. Однако нерешенными остаются проблемы стабильности эмиссии и надежной технологии, позволяющей изготавливать многоострийные катоды различных конфигураций.

Наиболее перспективными представляются многоострийные автоэлектронные катоды из карбида кремния, обладающего уникальным сочетанием высокой тугоплавкости и хорошей электропроводности, необходимыми для стабильной работы в условиях высоких температур и ионной бомбардировки. Ряд публикаций последних лет [1-5] показывает, что этому направлению уделяется особое внимание.

В СПбГЭТУ «ЛЭТИ» разработана оригинальная технология [6], позволяющая создавать многоострийные автоэлектронные катоды из карбида кремния с различными конфигурациями и геометрическими размерами. Технология позволяет создавать, как сплошные многоострийные автоэлектронные катоды, так и различные варианты катодных мезоструктур, один из которых приведен на рис 1.

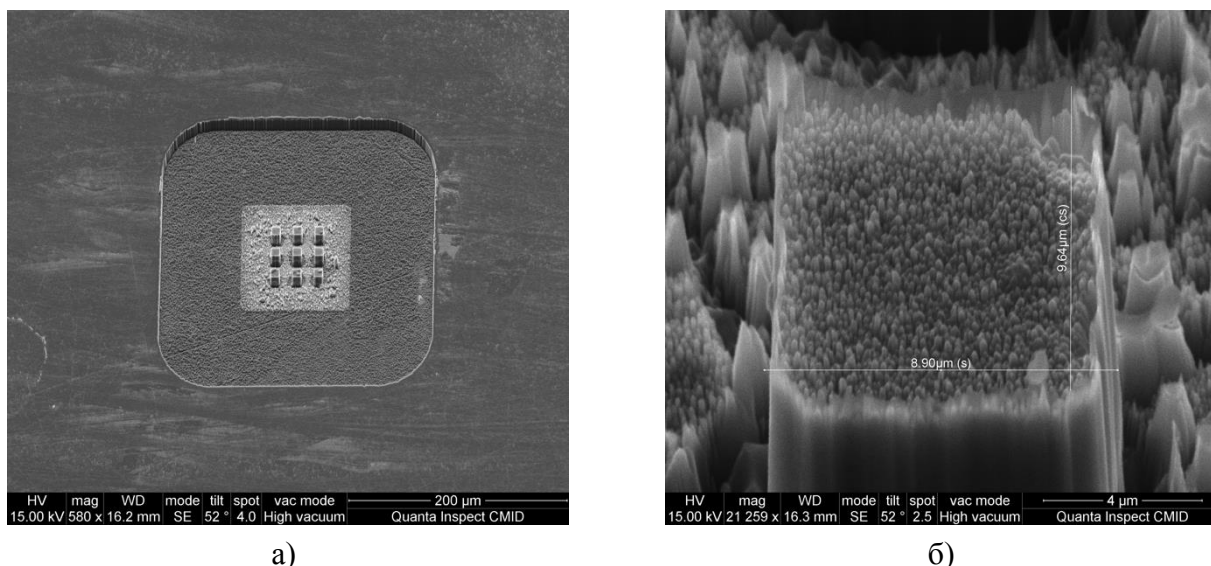


Рисунок 1.

Слева (а) показано РЭМ-изображение 3x3 матрицы катодных мезоструктур. Справа (б) изображена поверхность отдельной катодной мезоструктуры в виде столбика с плотностью nanoострий  $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$ , линейный размер мезоструктуры 8x8 мкм, высота 13 мкм, высота острий 0,6 мкм.

Экспериментальное измерение вольт-амперной характеристики (ВАХ) матрицы катодных мезоструктур проводилось в вакуумном диоде с межэлектродным зазором 70 мкм. Напряжение на аноде изменялось от 1,4 до 2,4 кВ. Полученные экспериментальные значения ВАХ использовались для расчета констант в формуле Фаулера-Нордгейма. Их величина составила:  $A = 0.2364 \text{ мА/м}$  и  $B = 0.255678 \cdot 10^9 \text{ 1/м} \cdot B^{1/2}$ .

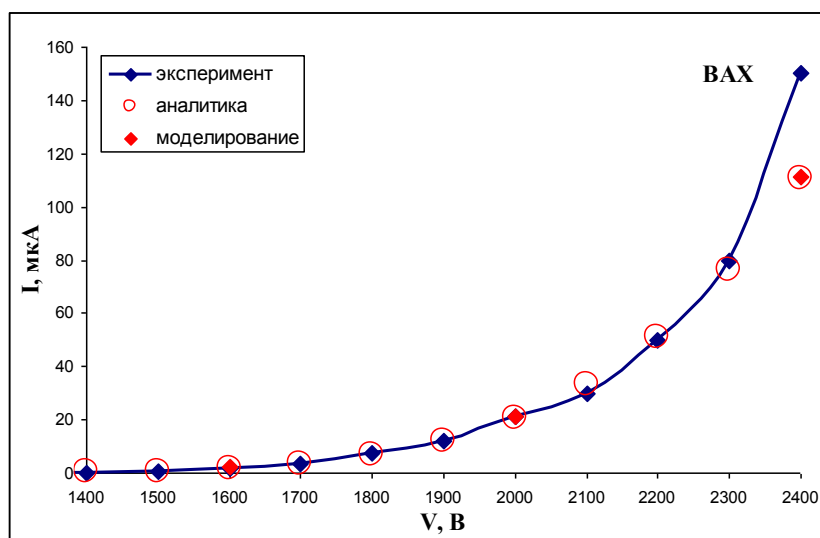


Рисунок 2.

На рис. 2 приведены экспериментальная ВАХ (график) и значения, вычисленные по формуле Фаулера-Нордгейма аналитически и в ходе численного моделирования (отдельные точки). Видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с аналитической аппроксимацией, что подтверждает соответствие математической модели экспериментальной системе и позволяет перейти к численному моделированию катодных

мезоструктур с различными геометрическими размерами и оценке их влияния на величину тока эмиссии.

Прежде всего, проведем оценку влияния поперечных размеров мезоструктурного столбика на ток эмиссии. Считая период следования столбиков на подложке постоянным и равным 20 мкм, исследуем влияние ширины столбика на ток эмиссии. В начале рассмотрим гладкие столбики без nanoострий.

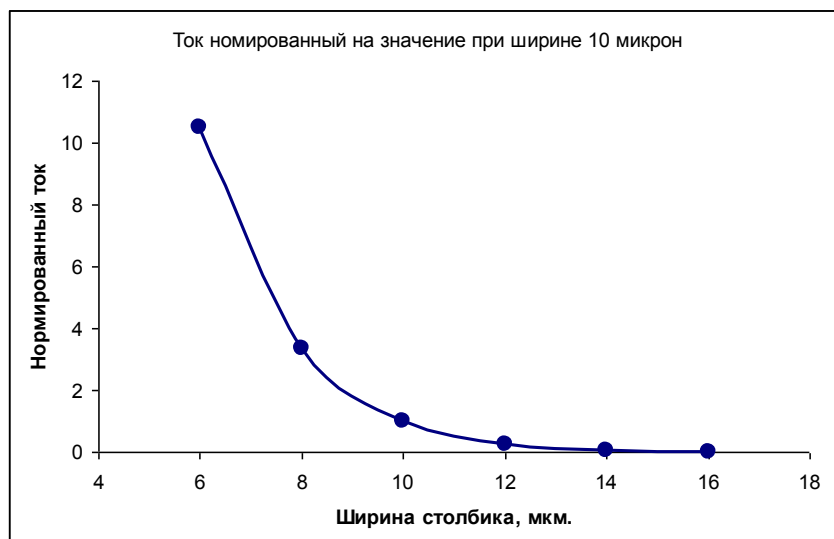


Рисунок 3.

На рис. 3 построена зависимость нормированного тока эмиссии от ширины столбика. За единичный ток принят ток эмиссии со столбика шириной в 10 мкм. Видно, что снижение ширины столбика до 6 мкм позволяет значительно повысить ток эмиссии.

Положив ширину столбика равной 6 мкм, исследуем влияние высоты гладкого (без nanoострий) столбика на ток эмиссии.

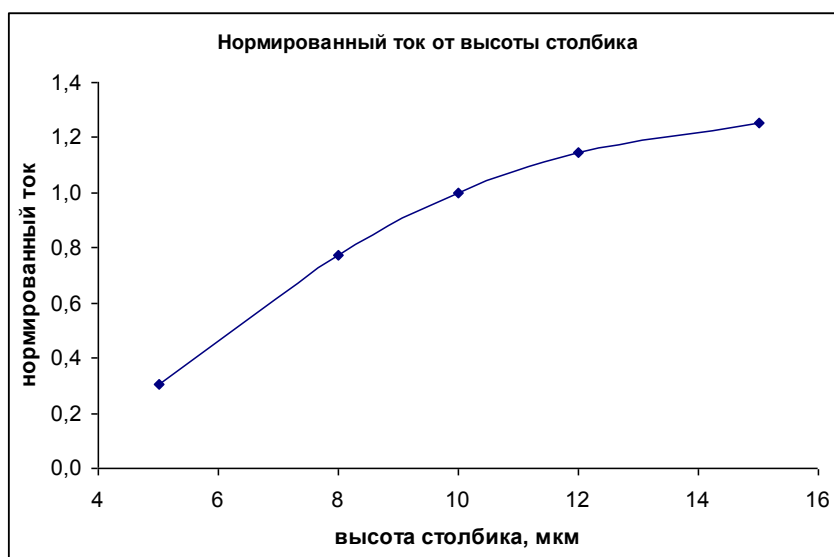


Рисунок 4.

На рис. 4 построена зависимость нормированного тока эмиссии от высоты столбика. Можно считать высоту столбика 12-14 мкм близкой к оптимальной, так как дальнейшее ее увеличение уже не приводит к существенному росту тока.

Оценим порядок величины возможного увеличения тока эмиссии с оптимизированной мезоструктуры по сравнению с базовой экспериментальной системой. В численном моделировании по прежнему будем полагать, что на вершине столбика располагается массив из 100 наноострий. Построим ВАХ для оптимизированной мезоструктуры, пронормировав ток на соответствующее значение для исходной геометрии.

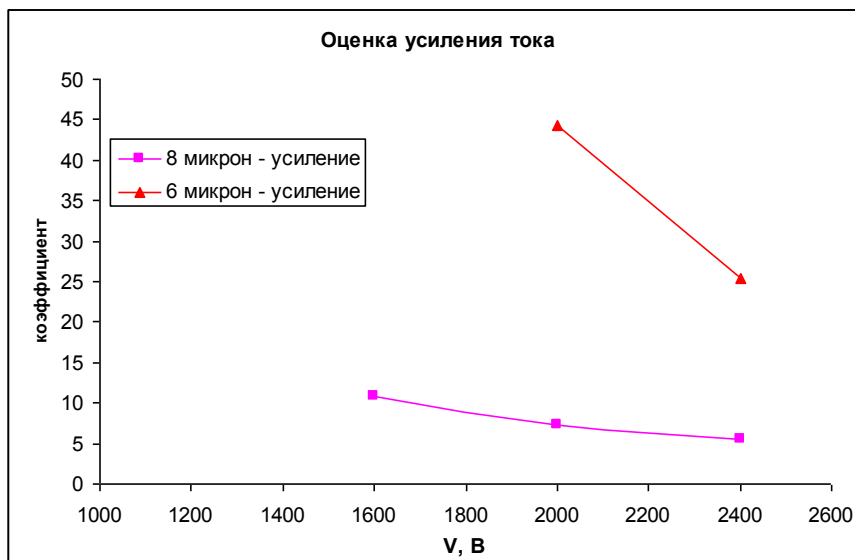


Рисунок 5.

На рис. 5 построены зависимости коэффициента увеличения тока эмиссии от потенциала анода для модельных систем с шириной столбика в 8 мкм и 6 мкм. Видно, что оптимизация геометрии автоэмиссионного катода позволяет значительно увеличить ток эмиссии. Также можно заключить, что в исследуемой системе достаточно существенную роль играют эффекты пространственного заряда.

Приведенные результаты позволяют сделать заключение о том, что геометрические размеры катодных мезоструктур существенно влияют на величину эмиссионного тока. При величине (70 мкм) межэлектродного диодного промежутка, существенно превышающей размеры катодных мезоструктур, и периоде следования 20 мкм можно считать высоту мезоструктур в 12-14 мкм и поперечные размеры 6х6 мкм близкими к оптимальным для получения максимального эмиссионного тока.

#### Библиографический список

1. Kang Myung-Gyu, et al. Stable field emission from nanoporous silicon carbide / Myung-Gyu Kang, et al. // – Nanotechnology. – 2013. – Vol. 24, – p. 065201.
2. Choi J.H, et al. Fabrication of SiC nanopillars by inductively coupled SF6/O2 plasma etching / J.H Choi, et al. // – J. Phys. D: Appl. Phys. – 2012. – Vol. 45. – p. 235204.
3. Latu-Romain L. et al. Silicon carbide nanotubes growth: an original approach / L. Latu-Romain et al. // – J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – Vol. 46. – p. 092001.
4. Wu Renbing, et al. Growth of Tapered SiC Nanowires on Flexible Carbon Fabric: Toward Field Emission Applications / Renbing Wu, et al. // – J. Phys. Chem. C. – 2012. – Vol. 116. – № 23. – pp. 12940–12945.
5. Lo H.C., et al. SiC-capped nanotip arrays for field emission with ultralow turn-on field / H.C. Lo, et al. // – Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 83. – p. 1420.
6. Afanasyev A.V., Ivanov B.V., Ilyin V.A., Kardo-Sysoev A.F., Kuznetsova M.A., Luchinin V.V. Superfast drift step recovery diodes (DSRDs) and vacuum field emission diodes based on 4H-SiC / A.V. Afanasyev, B.V. Ivanov, V.A. Ilyin, A.F. Kardo-Sysoev M.A. Kuznetsova, V.V. Luchinin // – Materials Science Forum. – 2013. – Vols. 740-742. – pp. 1010-1013.