

PACS numbers: 36.40.Cg, 61.46.Bc, 61.48.Gh, 68.37.Vj, 79.70.+q, 85.45.-w

## Оценка автоэмиссионных свойств наноструктур на основе карбида кремния и графена

О. Б. Охрименко, Р. В. Конакова, А. М. Светличный\*,  
О. Б. Спиридонов\*\*, Е. Ю. Волков\*

*Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины,  
просп. Науки, 41,  
03680, ГСП, Киев, Украина*

*\*Технологический институт*

*«Южного федерального университета» в г. Таганроге (ТТИ ЮФУ),  
пер. Некрасовский, 44,  
347928 Таганрог, Россия*

*\*\*НП «Южный лазерный инновационно-технологический центр»,  
пл. Авиаторов, 1,  
347913 Таганрог, Россия*

Выполнена оценка автоэмиссионных свойств катода, представляющего собой структуру, изготовленную в виде острия из карбида кремния, покрытого тонкой плёнкой графена. Рассчитаны вольт-амперные характеристики для катодного острия, изготовленного из графена и карбида кремния. Показано, что при одинаковой разности потенциалов ток автоэмиссии больше для катода, сделанного из графена. Оценка показывает, что автоэмиссионные острия на основе графена обладают лучшими эмиссионными характеристиками и могут быть использованы в современных приборах нанoeлектроники.

Виконано оцінку автоемісійних властивостей катода, що представляє собою структуру, вироблену у вигляді вістря з карбїду кремнію, покритого тонкою графеновою плівкою. Розраховано вольт-амперні характеристики для катодного вістря, виготовленого з графену і карбїду кремнію. Показано, що при однаковій різниці потенціалів струм автоемісії більший для катода, зробленої з графену. Оцінка показує, що автоемісійні вістря на графеновій основі мають ліпші емісійні характеристики і можуть бути використані в сучасних приладах нанoeлектроніки.

The evaluation of field emission properties is carried out for a cathode, which is a structure made in the form of the tip of a silicon carbide coated with a thin film of graphene. Current-voltage characteristics for the cathode tip made of graphene and silicon carbide are calculated. As shown for the same

potential difference, current field emission is higher from the cathode made of graphene. Estimate shows that the field-emission tip based on the graphene has the best emission characteristics and can be used in state-of-the-art devices for nanoelectronics.

**Ключевые слова:** графен, автоэмиссионный катод, вольт-амперные характеристики.

*(Получено 30 ноября 2010 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проявляется большой интерес к автоэмиссионным наноструктурам, изготовленным из наноуглеродных материалов — наноалмазов, алмазоподобного углерода, графена, фуллеренов и нанотрубок. Этот интерес объясняется тем, что на базе углеродных автоэмиссионных структур возможно создание целого ряда перспективных приборов микро- и наноэлектроники: автоэмиссионные дисплеи, устройства СВЧ, микро- и наносенсоры, электронно-лучевые приборы, сверхбыстрые компьютеры нового поколения и другие [1].

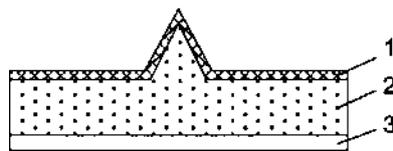
Автоэмиссионные свойства графена схожи со свойствами углеродных наноматериалов. В частности, присутствует эффект низкородоговой полевой эмиссии [2]. Низкий порог полевой эмиссии наблюдается практически для всех «наноуглеродных» эмиттеров и соответствует электрическим полям, на два–три порядка более низким, чем для металлов и полупроводников [3, 4]. Это делает графен весьма перспективным материалом для создания высокоэффективных автоэмиссионных микро- и наноэлектронных приборов. Существует несколько методов получения графена, эти методы можно разделить на следующие группы: механические методы (отшелушивание), химические методы, методы эпитаксии, методы термического разложения (термодеструкция) [5].

Поскольку, одним из основных требований к автоэмиссионным структурам является высокая стабильность эмиссии при высоких температурах и плотностях тока, то в качестве основы эмиттера рассмотрен карбид кремния как перспективный материал высокотемпературной электроники [6, 7].

Целью настоящей работы является оценка автоэмиссионных свойств структуры в виде острия из карбида кремния и карбида кремния, покрытого тонкой плёнкой графена.

## 2. МЕТОДИКА ОЦЕНОЧНОГО РАСЧЁТА

Конструкция автоэмиссионного катода приведена на рис. 1. Катод



**Рис. 1.** Конструкция автоэмиссионного катода: 1 — графен, 2 — SiC, 3 — Ti-Au.

состоит из подложки карбида кремния, на одной стороне которой сформировано наноразмерное острие. На другой стороне подложки — омический контакт Ti-Au.

Расчёт плотности тока выполнялся согласно уравнению Фаулера-Нордгейма [8]:

$$J = A \frac{E^2}{\phi} \exp\left(-\frac{B\phi^{3/2}u}{E}\right), \quad (1)$$

где  $u = 1 - CE/\phi^2$ ,  $E$  — напряжённость электрического поля;  $\phi$  — работа выхода электронов,  $J$  — плотность тока автоэлектронной эмиссии.

Коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  являются приближенными и представляют собой комбинации атомных постоянных. Данные коэффициенты соответственно равны:  $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{эВ} \cdot \text{В}^{-2}$ ,  $7 \cdot 10^9 \text{ эВ}^{-3/2} \cdot \text{В} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ эВ}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{В}^{-1}$ .

Связь между приложенной разностью потенциалов и электрическим полем вблизи вершины острия определяется известным выражением:

$$E = \beta U, \quad (2)$$

где  $U$  — разность потенциалов,  $\beta$  — коэффициент усиления поля или, как его часто называют, форм-фактор, величина которого зависит от формы вершины острия и геометрических параметров автоэмиссионной структуры.

Знание точной формы эмитирующей части острия является необходимым для правильного определения величины поля у поверхности эмиттера и величины эмитирующей площади, без чего невозможно сравнение эксперимента с теорией.

Определение поля в реальных условиях, является нелёгкой задачей. Обычно пользуются аппроксимациями, заменяющими истинную форму острия какой-либо правильной формой, позволяющей найти распределение поля из теории потенциала [9].

В настоящее время наиболее распространёнными являются следующие виды аппроксимаций.

1. Гиперболическая аппроксимация, где острие представляется в

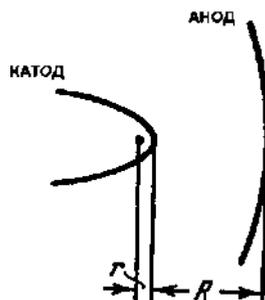


Рис. 2. Параболическая аппроксимация острия.

виде гиперboloида вращения, а анод — в виде плоского диска.

2. Параболическая аппроксимация, в этой аппроксимации острие и анод представлены в виде двух конфокальных параболоидов вращения.

3. Эквипотенциальная аппроксимация, где форма эмиттера близка к форме одной из эквипотенциальных поверхностей электрического поля, которое создано заряженным ортогональным конусом со сферой на вершине.

4. Цилиндрическая аппроксимация, где форма острия и анода представлена в виде системы коаксиальных цилиндров.

Также существуют различные аппроксимации для эмиттеров в виде лезвия или плёнки, но в данной работе мы не будем их рассматривать.

Оптимальной по точности и трудоёмкости является параболическая аппроксимация. Согласно параболической аппроксимации (рис. 2) для электродов в виде конфокальных параболоидов вращения коэффициент усиления поля равен [9]:

$$\beta = \frac{2}{r \ln(R/r)}, \quad (3)$$

где  $r$  — радиус острейного эмиттера,  $R$  — расстояние от вершины острейного эмиттера до анода. Параметры  $r$  и  $R$  выбирались в соответствии с конструктивными размерами катода  $r$  (5–15 нм) и  $R$  (10–100 нм). Разность потенциалов изменялась в диапазоне от 1 до 30 В.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОЧНОГО РАСЧЁТА

Выполним оценку предельной плотности тока автоэлектронной эмиссии, при которой автоэмиссионный катод обладает тепловой устойчивостью. Определение предельной плотности тока необходимо в связи с тем, что ток, протекающий через тело катода, разогревает его, вследствие чего происходит переход от автоэлектронной

эмиссии к термоавтоэлектронной. Это приводит к увеличению плотности тока, а, следовательно, и к дальнейшему разогреву катода, что в свою очередь приводит к его разрушению. Критерий отсутствия тепловой неустойчивости для острейного катода конической геометрии [10]:

$$Jr \leq \frac{\sin \theta}{1 - r/R} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}}, \quad (4)$$

где  $\theta$  — полуугол раствора конуса,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\rho$  — удельное сопротивление.

Согласно этому критерию плотность эмиссионного тока для катодного острья не должна превышать  $10^9$  А/см<sup>2</sup>.

Используя полученные результаты, была рассчитана вольт-амперная характеристика (ВАХ) катодного острья (рис. 3). Для сравнения приведена ВАХ острья, выполненного из SiC.

Из ВАХ, приведённых на рис. 3, видно, что при одинаковой разности потенциалов, ток автоэмиссии больше для катода, выполненного из графена. Следовательно, графен обладает лучшими, по сравнению с карбидом кремния, автоэмиссионными характеристиками.

На рисунке 4 представлена зависимость величины автоэмиссионного тока от межэлектродного расстояния  $R$ . Из полученного графика видно, что, чем меньше расстояние между анодом и катодом, тем больше величина автоэмиссионного тока. Это объясняется

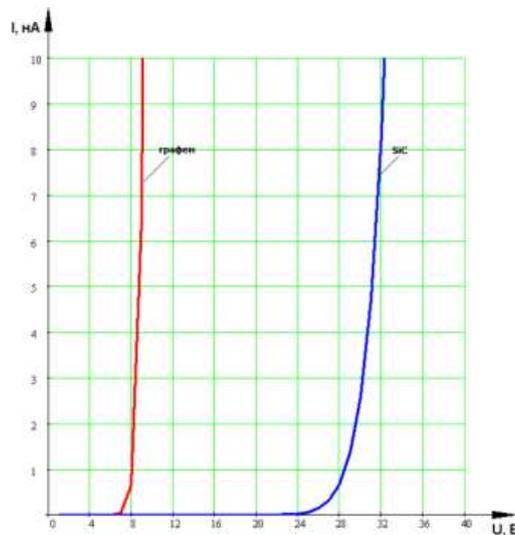
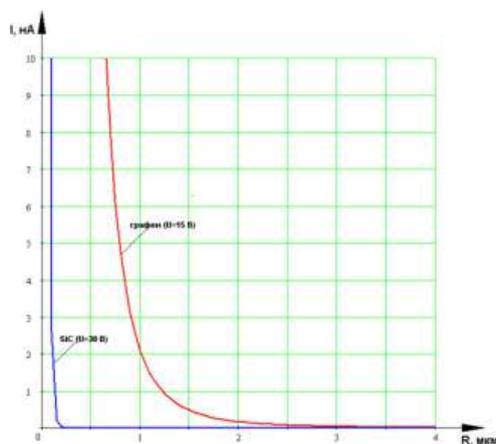
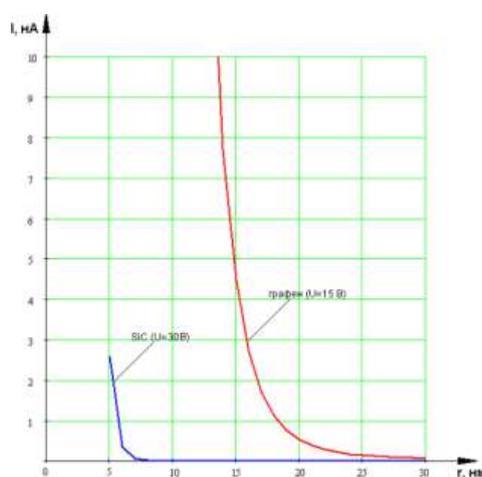


Рис. 3. ВАХ катодного острья из графена и SiC.



**Рис. 4.** Зависимость автоэмиссионного тока от межэлектродного расстояния.

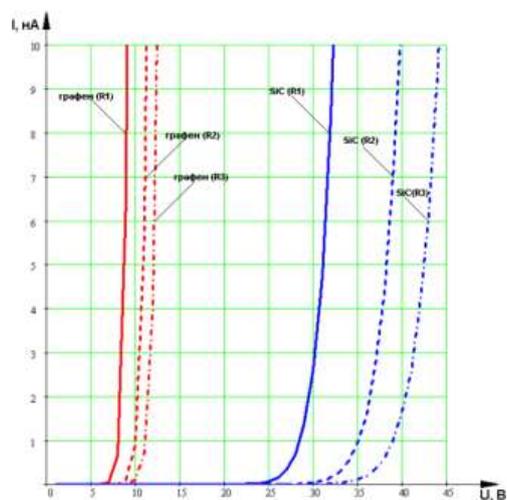


**Рис. 5.** Зависимость автоэмиссионного тока от радиуса эмитирующего острья.

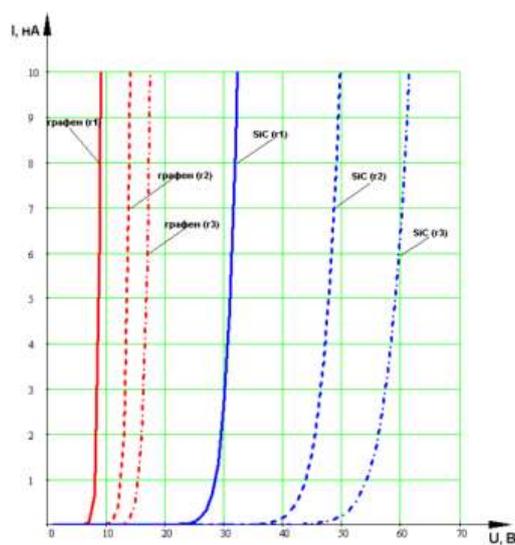
увеличением напряжённости электрического поля (уравнения (2), (3)).

На рисунке 5 представлена зависимость величины автоэмиссионного тока от радиуса эмитирующего острья. Из приведённого графика видно, что, чем меньше радиус эмитирующего острья, тем больше величина автоэмиссионного тока, что обусловлено увеличением напряжённости электрического поля (уравнения (2), (3)).

На рисунке 6 представлены вольтамперные характеристики, рассчитанные для эмитирующих острий на основе графена и карбида



**Рис. 6.** Вольтамперные характеристики эмитирующих острий для различных значений межэлектродных расстояний  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ : 100, 200, 300 нм соответственно.



**Рис. 7.** Вольтамперные характеристики эмитирующих острий разного радиуса.

кремния, где  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  расстояния между анодом и катодом, соответственно, равные 100 нм, 200 нм и 300 нм.

На рисунке 7 представлены вольтамперные характеристики, рассчитанные для эмитирующих острий на основе графена и карбида

кремния, где  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  радиусы эмитирующих острий, соответственно, равные 5 нм, 10 нм и 15 нм.

На ВАХ, приведённых на рис. 6, 7, видно, что автоэмиссионные свойства острийных катодов, покрытых графеном, существенно эффективнее, чем карбидкремниевых острийных катодов.

#### 4. ВЫВОДЫ

Таким образом, из рассчитанных ВАХ видно, что наиболее эффективными являются эмитирующие острия с радиусом  $\cong 5$  нм при расстоянии между анодом и катодом  $\cong 100$  нм.

Оценка плотности тока, при которой автоэмиссионный катод обладает тепловой устойчивостью, показывает, что автоэмиссионные острия на основе графена обладают лучшими эмиссионными характеристиками, чем карбидкремниевые.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Е. П. Шешин, *Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов* (Москва: Издательство МФТИ: 2001).
2. Г. Н. Фурсей, В. И. Петрик, Д. В. Новиков, *Журнал технической физики*, **79**, вып. 7: 122 (2009).
3. G. N. Furse, *Field Emission in Vacuum Microelectronics* (New York: Kluwer Academic–Plenum Publishers: 2005).
4. G. N. Furse, D. V. Novikov, G. A. Dyuzhev, A. V. Kocheryzhenkov, and P. O. Vassiliev, *Appl. Surf. Sci.*, **215**, No. 1–4: 135 (2003).
5. А. А. Лебедев, И. С. Котоусова, А. А. Лаврентьев, С. П. Лебедев, И. В. Макаренко, В. Н. Петров, А. Н. Титков, *Физика твердого тела*, **51**, вып. 4: 783 (2009).
6. О. А. Агеев, А. Е. Беляев, Н. С. Болтовец, В. С. Киселев, Р. В. Конакова, А. А. Лебедев, В. В. Миленин, О. Б. Охрименко, В. В. Поляков, А. М. Светличный, Д. И. Чередниченко, *Карбид кремния: технология, свойства, применение* (Харьков: ИСМА: 2010).
7. Г. С. Свечников, А. Н. Морозовская, *Нанотрубки и графен — материалы электроники будущего* (Киев: Логос: 2009).
8. Р. Спроул, *Современная физика. Серия «Физико-математическая библиотека инженера»* (Ред. В. И. Коган) (Москва: Наука: 1974), с. 441.
9. М. И. Елинсон, Г. Ф. Васильев, *Автоэлектронная эмиссия* (Москва: Изд. физ.-мат. лит.: 1958).
10. Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский, *Успехи физических наук*, **139**, вып. 2: 256 (1983).