

Рындин Евгений Адальбертович

Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

Тел.: 88634311584.

Ведущий научный сотрудник; д.т.н.; доцент.

Konoplev Boris Georgievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kbg@fep.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371767.

College of Electronics and Electronic Equipment Engineering; Dean; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

Denisenko Mark Anatolievich

E-mail: dema.bmfe@gmail.com.

The Department of Electronic Apparatus Design; Postgraduate Student.

Ryndin Eugeny Adalbertovich

Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

41, Chekhov Street, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

Phone: +78634311584.

Senior Researcher; Dr. of Eng. Sc.; Associate Professor.

УДК 621.385.002

**А.М. Светличный, О.Б. Спиридонов, Е.Ю. Волков, Л.Г. Линец,
М.Н. Григорьев**

**ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК АВТОЭМИССИОННЫХ НАНОСТРУКТУР
НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И КАРБИДА КРЕМНИЯ**

Проведена оценка характеристик автоэмиссионных наноструктур на основе карбида кремния и кремния. Определены зависимости плотности тока автоэлектронной эмиссии от напряженности электрического поля. Построены вольт-амперные характеристики катодов на основе SiC и Si. Также получено оценочное значение предельной плотности тока автоэлектронной эмиссии, при которой катод обладает тепловой устойчивостью. Исследована зависимость предельной плотности тока от конструкции автоэмиссионного катода. Оценка показывает, что наноструктуры на основе карбида кремния обладают характеристиками, позволяющими использовать их в современных приборах нанoeлектроники.

Карбид кремния; автоэлектронная эмиссия; наноструктуры; кремний.

A.M. Svetlichnyi, O.B. Spiridonov, E.Y. Volkov, L.G. Linets, M.N. Grigoriev

**THE EVALUATION OF THE CHARACTERISTICS OF FIELD EMISSION
NANOSTRUCTURES BASED ON SI AND SiC**

The evaluation of the characteristics of field emission nanostructures based on silicon carbide (SiC) and silicon (Si) was carried out. The dependence of the field emission current density from the electric field was determined. Current-voltage characteristics of SiC and Si cathodes were plotted. Also the estimation of the limiting field emission current density necessary for cathode thermostability was provided. The interrelation of the limiting current density on the design

*of the cathode was investigated. Analysis showed that the nanostructures of silicon carbide is suitable for use in nanoelectronic devices due to its advanced characteristics
SiC; field emission; nanostructures Si.*

Одной из актуальнейших задач современной микро- и нанoeлектроники является разработка стабильных автоэмиссионных структур, на основе которых возможно создание целого ряда перспективных приборов микро- и нанoeлектроники: автоэмиссионные дисплеи, устройства СВЧ, микро- и наносенсоры, электронно-лучевые приборы, сверхбыстрые компьютеры нового поколения и другие. Автоэмиссионные структуры обладают следующим рядом преимуществ: отсутствие накала; высокая плотность тока, термическая стабильность в широких пределах; высокая радиационная стойкость; низкий уровень шума; высокое быстродействие; экспоненциально высокая крутизна вольт-амперных характеристик (ВАХ) [1].

На стабильность работы автоэмиссионных структур влияют различные процессы, происходящие на поверхности катода. Основные из них: ионная бомбардировка катода; адсорбция и десорбция молекул остаточных газов; поверхностная миграция и другие. Перечисленные процессы, в зависимости от режимов работы автоэмиссионных структур, приводят к появлению следующих эффектов: катодное распыление; изменение геометрии эмитирующей поверхности; изменение работы выхода электронов; разогрев катода и как следствие его разрушение [1].

Применение карбида кремния для создания автоэмиссионных структур позволяет преодолеть негативное влияние некоторых из приведенных выше эффектов. Что объясняется электрофизическими свойствами карбида кремния. Также одним из преимуществ карбида кремния является возможность создания на его поверхности пленок графена методом термического разложения (термодеструкция) [2, 3].

Целью настоящей работы является оценка характеристик автоэмиссионных наноструктур на основе кремния и карбида кремния. Конструкция автоэмиссионного катода, для которого будет проводиться оценка, приведена на рис. 1.

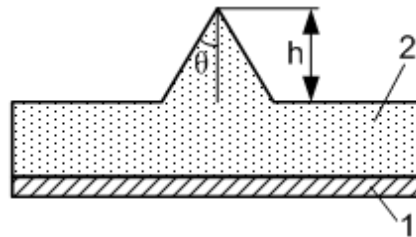


Рис. 1. Конструкция автоэмиссионного катода: 1 – Ti, 2 – SiC или Si,
h – высота острья, θ – полуугол раствора конуса

Плотность автоэмиссионного тока находится согласно уравнению Фаулера–Нордгейма, которое имеет следующий вид[4]:

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

где $u = 1 - (C \cdot E / \phi^2)$, E – напряженность электрического поля, ϕ – работа выхода электронов (для SiC равна 4,6 эВ, а для Si – 4,75 эВ), J – плотность тока автоэлектронной эмиссии.

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

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

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

где U – разность потенциалов, β – 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 действительных условиях является непростой задачей. Обычно пользуются аппроксимациями, заменяющими истинную форму острия какой-либо правильной формой, позволяющей найти распределение поля из теории потенциала [5].

В настоящее время наиболее распространенными являются следующие виды аппроксимаций:

1. Гиперболическая аппроксимация, где острие представляется в виде гиперболоида 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 пленки, но в данной работе мы не будем их рассматривать.

Оптимальной по точности и трудоемкости является параболическая аппроксимация. Согласно параболической аппроксимации (рис. 2) для электродов в виде конфокальных параболоидов вращения коэффициент усиления поля равен [5]

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

где r – радиус острейшего эмиттера, R – расстояние от вершины острейшего эмиттера до анода.

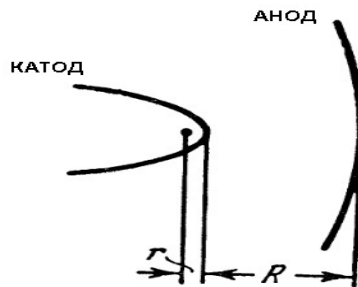


Рис. 2. Параболическая аппроксимация

Параметры r и R выбирались в соответствии с конструктивными размерами катода r (5 нм) и R (500 нм). Разность потенциалов изменялась в диапазоне от 1 до 100 В. Согласно этой оценке, плотность автоэмиссионного тока составила величину $\sim 10^7$ А/см², при напряженности электрического поля порядка 10^7 В/см (для $r = 5$ нм, $R = 500$ нм). Результаты оценки плотности тока для кремния и карбида кремния приведены на рис. 3.

Величина тока автоэлектронной эмиссии рассчитывается согласно следующему выражению:

$$I = J \cdot S_{\text{э}}, \quad (4)$$

где $S_{\text{э}}$ – площадь эмитирующей поверхности.

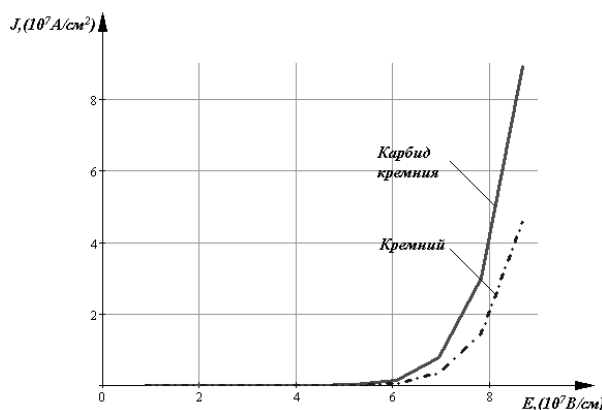


Рис. 3. График зависимости плотности тока автоэлектронной эмиссии от напряженности электрического поля

Так как эмитирует электроны в основном лишь вершина катодного острия, то эмитирующую поверхность можно представить как полусферу, а площадь найти из следующего выражения:

$$S_{\text{э}1} = 2 \cdot \pi \cdot r^2, \quad (5)$$

где r – радиус сферы.

Для подтверждения данного утверждения было проведено моделирование электростатического поля, образованного структурой анод – катод. Моделирование проводилось в САПР Elcut 5.8, результаты моделирования приведены на рис. 4,а,б.

Параметры, использованные при моделировании, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры моделирования

№	Наименование	Значение
1	Количество узлов сетки	255
2	Высота катода	3 мкм
3	Межэлектродное расстояние	0,5 мкм
4	Потенциал на границе катода	-50 В
5	Потенциал на границе анода	50 В
6	Потенциал на границе камеры	0 В
7	Диэлектрическая проницаемость катода (SiC)	6,7
8	Диэлектрическая проницаемость камеры (вакуум)	1
9	Шаг эквипотенциальных кривых	5 В

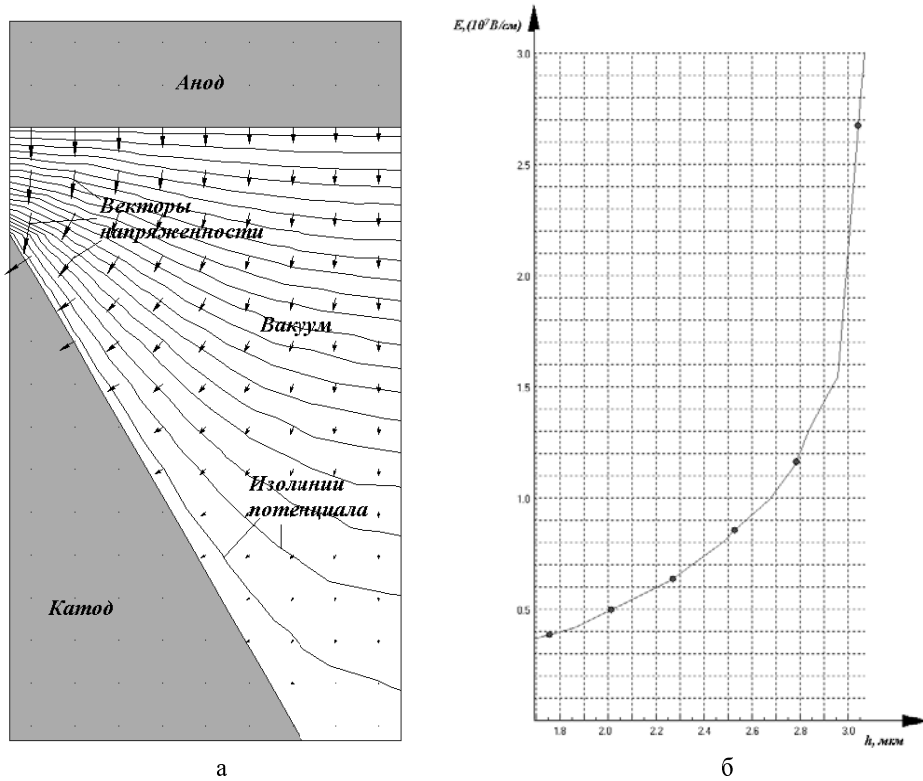


Рис. 4. Результаты моделирования электростатического поля (а), зависимость напряженности поля от расстояния до вершины острия (б)

Из результатов моделирования видно, что лишь у вершины острия напряженность поля достигает значения, необходимого для появления автоэлектронной эмиссии. Эмитирующую поверхность можно представить как боковую поверхность конуса, длина образующей этого конуса приблизительно равна 10 нм.

Отсюда найдем площадь эмитирующей поверхности, она равна площади боковой поверхности конуса:

$$S_{32} = \pi \cdot r_o \cdot l, \quad (6)$$

где r_o – радиус основания конуса, l – длина образующей.

Используя выражения (5) и (6), найдём площадь эмитирующей поверхности:

$$\begin{aligned} S_{32} &= \pi \cdot r_o \cdot l = 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^{-9} = 157 \cdot 10^{-18}, \text{ м}^2, \\ S_{31} &= 2 \cdot \pi \cdot r^2 = 2 \cdot 3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-9})^2 = 157 \cdot 10^{-18}, \text{ м}^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Получены одинаковые значения площадей эмитирующих поверхностей.

Зная площадь эмитирующей поверхности, найдем значение тока автоэлектронной эмиссии и построим ВАХ. Полученное значение тока автоэлектронной эмиссии имеет порядок 10^{-5} А.

На рис. 5 представлена ВАХ катодного острия на основе кремния и карбида кремния, при расчете ВАХ использовались следующие значения: разность потенциалов – от 0 до 100 В, межэлектродное расстояние – 500 нм, радиус острия – 5 нм.

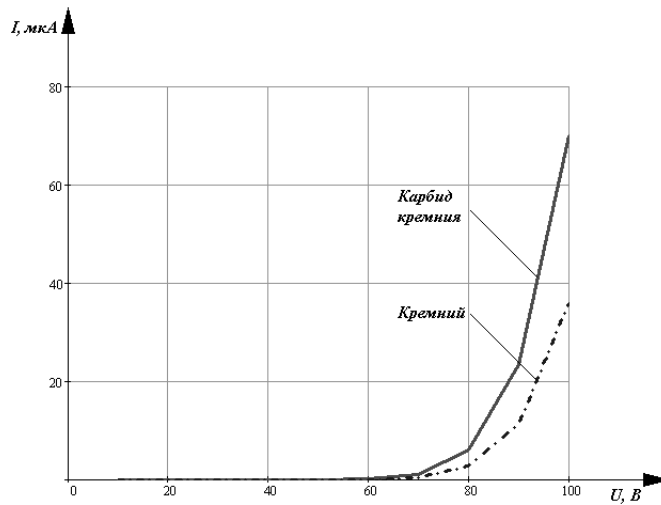


Рис. 5. ВАХ катодного острия на основе карбида кремния и кремния

Проведена оценка 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 катода конической геометрии [6]:

$$J \cdot r \leq \frac{\sin \theta}{1 - (r/R)} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}}, \quad (8)$$

где θ – полуугол раствора конуса, λ – коэффициент теплопроводности (для SiC находится в пределах 300 – 370 Вт/м·К), ρ – удельное сопротивление (для SiC 1000 Ом·м).

Согласно этому критерию, плотность эмиссионного тока для катодного острия не должна превышать величину порядка 10^{11} А/см². На рис. 6 представлен график зависимости плотности автоэмиссионного тока от радиуса вершины острия для разных углов раствора конуса.

Из рис. 6 видно, что чем больше полуугол раствора конуса, тем выше предельная плотность тока автоэлектронной эмиссии и, следовательно, выше тепловая устойчивость катода.

На рис. 7 представлена зависимость напряженности электрического поля от межэлектродного расстояния для катодов с различными радиусами вершины острия.

Из рис. 7 видно, что чем больше межэлектродное расстояние, тем ниже напряженности электрического поля, а также чем меньше радиус вершины катодного острия, тем выше напряженность. Следовательно, для понижения рабочих напряжений и увеличения напряженности электрического поля необходимо уменьшать межэлектродное расстояние до десятков нанометров, а радиус вершины острия катода до единиц нанометров.

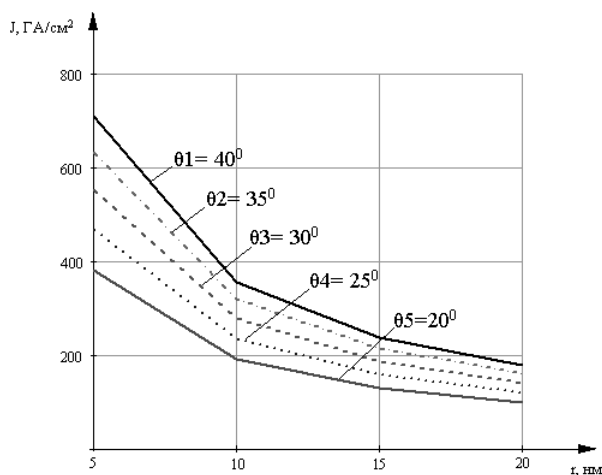


Рис. 6. Зависимость плотности автоэмиссионного тока от радиуса вершины острия для разных углов раствора конуса

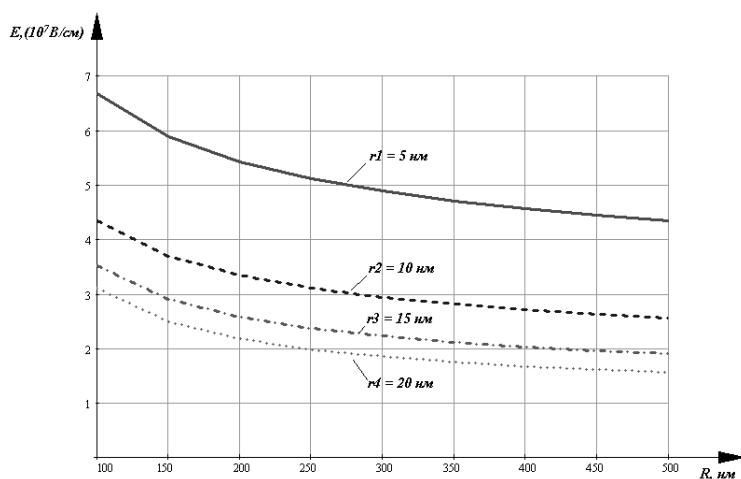


Рис. 7. Зависимость напряженности электрического поля от межэлектродного расстояния

В работе проведена оценка значения плотности автоэмиссионного тока, величины автоэмиссионного тока при разности потенциалов 100 В. Из рассчитанных вольт-амперных характеристик видно, что ток автоэлектронной эмиссии, при разности потенциалов 100 В, для эмитирующего острия на основе карбида кремния выше, чем ток для острия на основе кремния. Также из полученных ВАХ видно, что наиболее эффективными являются эмитирующие острия радиусом 5 нм при межэлектродном расстоянии в десятки нанометров. Получено оценочное значение плотности тока, при котором автоэмиссионный катод обладает тепловой устойчивостью. Исследована зависимость предельной плотности тока от угла раствора конуса (острия), согласно этой зависимости, из двух катодов одинаковой высоты катод с меньшим основанием будет менее устойчивым. Оценка показывает, что автоэмиссионные структуры на основе карбида кремния обладают характеристиками, позволяющими использовать их в современных приборах нанoeлектроники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шешин Е.П.* Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. – М.: Изд-во МФТИ, 2001. – С. 5-7.
2. *Лебедев А.А., Котоусова И.С.* Формирование наноуглеродных пленок на поверхности SiC методом сублимации в вакууме // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – Вып. 4. – С. 783-786.
3. *Конакова Р.В., Охрименко О.Б., Светличный А.М., Волков Е.Ю.* Оценка возможности изготовления автоэмиссионных наноструктур на основе графена // Материалы конференции «Наноструктурные материалы - 2010». – Киев, 2010. – С. 249.
4. *Спроул Р.* Современная физика / Пер. с англ.; Под ред. В.И. Когана. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука: Гл. ред. физ-мат. лит., 1974. – С. 441-442.
5. *Елинсон М.И., Васильев Г.Ф.* Автоэлектронная эмиссия. – М.: Физматлит, 1958. – С. 75-86.
6. *Литвинов Е.А., Месля Г.А.* Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы при вакуумных разрядах // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 139. – Вып. 2. – С. 266-272.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.А. Мустафаев.

Светличный Александр Михайлович

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: svetlich@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; доцент; профессор.

Спирidonov Олег Борисович

E-mail: o.spiridonoff@gmail.com.

Тел. 88634312018.

Кафедра безопасности информационных технологий; доцент.

Линец Людмила Геннадьевна

E-mail: linetslg@gmail.com.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Волков Евгений Юрьевич

E-mail: eyvolkov@gmail.com.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Григорьев Михаил Николаевич

E-mail: mikhailgregoryev@mail.ru.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

SvetlichnyiAlexandrMikhailovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Professor.

Spiridonov Oleg Borisovich

E-mail: o.spiridonoff@gmail.com.

Phone: +78634312018.

The Department of Security in Data Processing Technologies; Associate Professor.

Linets Lyudmila Gennad'evna

E-mail: linetslg@gmail.com.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Volkov Evgeniy Yurievich

E-mail: eyvolkov@gmail.com.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Grigoriev Mikhail Nikolaevich

E-mail: mikhailgregoryev@mail.ru.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

УДК 539.216.2

В.И. Шевяков

ЛОКАЛЬНОЕ ЗОНДОВОЕ ОКИСЛЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Цель работы связана с анализом основных проблем, возникающих при реализации локального зондового окисления полупроводниковых подложек и сверхтонких металлических пленок. Основная задача – теоретический анализ кинетики локального зондового окисления, выявление факторов, определяющих его производительность. Исследованы особенности кинетики локального зондового окисления сверхтонких пленок металлов V, Nb, Ta, Ti, TiN, W. Установлено, что кинетику процесса определяют такие свойства окисляемого материала, как его удельное сопротивление, наличие на поверхности естественной оксидной пленки и ее толщина, соотношение удельных плотностей металла и оксида, электрохимическая константа процесса окисления.

Атомно-силовая микроскопия; локальное зондовое окисление; производительность метода.

V.I. Shevyakov

LOCAL PROBE OXIDATION AND IT'S MAIN PROBLEMS

The main purpose of this work involves problem analysis encountered during local probe oxidation of semiconductor wafers and ultra-thin metal films. Main goal of presented work is theoretical analysis of local probe oxidation kinetics, to identify factors that determine its performance. Distinctive kinetics features were studied for local probe oxidation of ultrathin V, Nb, Ta, Ti, TiN, W films. It was shown that kinetics of process are determined properties of material. They were specific resistance, presence of natural oxide film, correlations of specific density of metal and oxide, electrochemical constant of oxidation process. Vanadium was chosen as the best metal that provide maximum productivity of anodic oxidation.

Atomic force microscopy; local probe oxidation; productivity of method.

Введение. Для создания наноструктур в настоящее время используются как литографические, так и нелитографические методы. Последние являются более доступными в условиях лабораторных исследований. Среди них можно выделить метод, основанный на использовании атомно-силовой микроскопии (АСМ). Это метод локального зондового окисления проводящих материалов (полупроводниковых подложек и сверхтонких металлических пленок), который применяют для локальной модификации проводящих свойств поверхности и для изготовления ряда активных элементов нанoeлектроники [1–2].