



# Известия высших учебных заведений

## ЭЛЕКТРОНИКА 4(102)'2013

### Учредители:

Министерство  
образования и науки  
Российской Федерации

Национальный  
исследовательский  
университет «МИЭТ»

Главный редактор  
В.Д. Вернер

### Редакционная коллегия:

Амербаев В.М.  
Бархоткин В.А.  
Быков Д.В.  
Гаврилов С.А.  
Грибов Б.Г.  
Казёнов Г.Г.  
Коноплёв Б.Г.  
Коркишко Ю.Н.  
Королёв М.А.  
Кубарев Ю.В.  
Неволин В.К.  
Неволин В.Н.  
Петросянц К.О.  
Руденко А.А.  
Таиров Ю.М.  
Телец В.А.  
Тихонов А.Н.  
Усанов Д.А.  
Чаплыгин Ю.А. (зам. главного редактора)

Адрес редакции: 124498,  
Москва, Зеленоград,  
проезд 4806, д. 5, МИЭТ  
Тел.: 8-499-734-6205  
E-mail: magazine@miet.ru  
http://www.miet.ru

### Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Технология микро- и нанoeлектроники

- Бобовников П.Г., Ермаков А.С., Матюшкин И.В., Орлов С.Н., Свечкарев К.П., Шелепин Н.А., Михайлов А.Н., Белов А.И.* Автоэмиссия из наноструктур на основе карбида кремния и влияние на нее образующихся субоксидных  $\text{SiO}_x$ -покрытий. I. Конструктивно-технологические особенности SiC-микркатодов. Обзор..... 3
- Блинов Г.А., Борисов А.Г., Любимов А.В.* Технология фольгированного полиимида для плоских электромагнитных компонентов ..... 13

#### Микроэлектронные приборы и системы

- Кузнецов Е.В., Рязанцев Д.В.* Моделирование вторичного пробоя латерального ДМОП-транзистора при облучении ..... 18
- Белюсов Е.О., Тимошенко А.Г.* Метод расширения полосы пропускания усилителей с переменным коэффициентом усиления ..... 24
- Романюк В.А., Аунг Бо Бо Хейн.* Применение удвоителя частоты на двух транзисторах для гетеродина смесителя ..... 28

#### Схемотехника и проектирование

- Заикин А.В.* Метод размещения стандартных ячеек СБИС на основе сочетания результатов работы итерационных алгоритмов ..... 32

#### Нанотехнология

- Галперин В.А., Кицюк Е.П., Скундин А.М., Тусеева Е.К., Кулова Т.Л., Шаман Ю.П., Скорик С.Н.* Разработка электродов на основе композита кремний – углеродные нанотрубки для литиевых аккумуляторов повышенной емкости..... 38

**Заведующая редакцией**  
**С.Г. Зверева**

**Редактор**  
**А.В. Тихонова**

**Научный редактор**  
**С.Г. Зверева**

**Корректор**  
**Л.Ф. Летунова**

**Компьютерный дизайн, верстка**  
**А.Ю. Рыжков**  
**С.Ю. Рыжков**

Подписано в печать 5.07.2013.  
Формат бумаги 60×84 1/8.  
Цифровая печать.  
Объем 12,56 усл.печ.л.,  
11,6 уч.-изд.л.  
Заказ № 37.

Отпечатано  
в типографии ИПК МИЭТ  
124498, Москва, Зеленоград,  
проезд 4806, д. 5, МИЭТ

Свидетельство о регистрации  
№ 014134  
выдано Комитетом РФ по печати  
12.10.95.

Включен в Перечень российских  
рецензируемых научных журналов,  
в которых должны быть опубликова-  
ны основные научные результаты  
диссертаций на соискание ученых  
степеней доктора и кандидата наук  
редакции 2012 г.

Включен в Российский индекс  
научного цитирования.

**Гаврилов С.А., Громов Д.Г., Дубков С.В., Назаркин М.Ю., Силибин М.В., Тимошенков С.П., Козьмин А.М., Шулятьев А.С.** Исследование колебаний пьезоэлектрического элемента на основе нанопроволок ZnO и пористого электрода ..... 44

**Бобринецкий И.И., Емельянов А.В., Неволин В.К., Ромашкин А.В.** Влияние покрытия молекулами органических соединений на управление проводимостью канала из углеродных нанотрубок ..... 51

#### Микро- и наносистемная техника

**Беспалов В.А., Ильичев Э.А., Кулешов А.Е., Набиев Р.М., Петрухин Г.Н., Рычков Г.С.** МЭМС-переключатели в радиочастотной электронике. II. Состояние разработок и перспективы. Обзор ..... 61

#### Информационные технологии

**Соловьев Р.А., Тельпухов Д.В.** Аппаратная реализация операции нахождения остатка целочисленного деления для входных данных большой разрядности в модулярной арифметике ..... 75

**Шишкевич А.А.** Оценка показателей надежности вычислительных устройств с трехкратным мажорированием при отказах и сбоях ..... 84

#### Краткие сообщения

**Бешенков В.Г., Вяткин А.Ф., Амеличев В.В., Костюк Д.В.** Анализ многослойных тонкопленочных структур методом электронной оже-спектроскопии в условиях перекрывания оже-пиков элементов ..... 89

**Данилов А.А., Корнюхин А.В.** Влияние радиуса приемной катушки индуктивности на нагрев биологической ткани при беспроводной передаче энергии с помощью индуктивной связи ..... 92

**Тихомиров А.А., Краснобородько С.Ю., Шеваков В.И.** Методика проведения измерений в полуконтактной моде атомно-силовой микроскопии ..... 94

**Петросяни К.О., Попов Д.А.** Учет влияния температуры на радиационный сдвиг порогового напряжения МОП-транзистора в системе TCAD ..... 96

#### Юбилей

Орликовскому Александру Александровичу – 75 лет ..... 98

Усанову Дмитрию Александровичу – 70 лет ..... 100

Contents ..... 102

Abstracts ..... 103

К сведению авторов ..... 107

# ТЕХНОЛОГИЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Обзор

УДК 621.385.002

## Автоэмиссия из наноструктур на основе карбида кремния и влияние на нее образующихся субоксидных $\text{SiO}_x$ -покрытий

### I. Конструктивно-технологические особенности SiC-микрокатодов

*П.Г.Бобовников<sup>1</sup>, А.С.Ермаков<sup>1</sup>, И.В.Матюшкин<sup>1</sup>, С.Н.Орлов<sup>1</sup>,  
К.П.Свечкарев<sup>1</sup>, Н.А.Шелепин<sup>1</sup>, А.Н.Михайлов<sup>2</sup>, А.И.Белов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ОАО «НИИ молекулярной электроники» (г. Москва)

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им.  
Н.И.Лобачевского

Проанализированы конструктивно-технологические пути формирования автоэмиссионных микрокатодов на основе наноструктурированного карбида кремния. Выделены альтернативы, позволяющие понизить температуру технологического процесса до приемлемой в КМОП-технологии.

*Ключевые слова:* автоэмиссия, микрокатоды, карбид кремния, КМОП-технологии.

В настоящее время в традиционной кремниевой электронике наблюдается экспансия углеродных материалов (углеродных нанотрубок, фуллеренов, полупроводниковых органических соединений и т.п.). С атомистической точки зрения карбид кремния SiC представляет собой связующее звено между старой Si-электроникой и новой C-электроникой. Последние полвека карбид кремния применяется в приборах силовой электроники, диодах Шоттки, оптоэлектронике и др. [1–3]. В последние годы активизируются исследования наноразмерного SiC, включая и технологические способы его получения. По информации, содержащейся в базе данных Scopus, в 2008 г. около 100 статей было посвящено нанокристаллическим и аморфным объектам на основе SiC [4].

Большая энергия связи Si–C обуславливает высокую температуру роста кристаллов (более 2000 °C), а химическая инертность и механическая стойкость – сложность их обработки. Травится SiC очень плохо и только в КОН и в смеси  $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ . Однако этот существенный недостаток с точки зрения традиционной КМОП-технологии оказывается преимуществом с точки зрения долговечности автоэмиссионных катодов. Более того, это преимущество еще более значимо для SiC-диодов или триодов, созданных в рамках технологии поверхностной микромеханики, когда расстояние катод–анод составляет примерно 0,5–1,5 мкм, а минимальное рабочее напряжение, при котором достигается порог автоэмиссии, – менее 10–30 В. При этом желательна эксплуатация прибора при плохом и/или полном отсутствии вакуумирования (в этих условиях длина пробега электрона сравнима с расстоянием катод–анод). Автоэмиссию из ассоциированных с