# 

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России, в систему Российского индекса научного цитирования и с 2009 г. реферируется в базе данных INSPEC

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н, проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н, проф. Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

### Редакционный совет:

Аристов В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Гапонов С. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Каляев И. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Климов Д. М., д.т.н., проф., акад. РАН Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Никитов С. А., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН (Япония) Сауров А. Н., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

### Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь) Андреев А., к.ф.-м.н., (Великобритания) Андриевский Р. А., д.х.н., проф. Антонов Б. И. Астахов М. В., д.х.н., проф. Быков В. А., д.т.н., проф. Горнев Е. С., д.т.н., проф. Градецкий В. Г., д.т.н., проф. Кальнов В. А., к.т.н. Карякин А. А., д.х.н., проф. Колобов Ю. Р., д.т.н., проф. Кузин А. Ю., д.т.н., проф. Панич А. Е., д.т.н., проф. Петросянц К. О., д.т.н., проф. Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф. Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва) Путилов А. В., д.т.н., проф. Телец В. А., д.т.н., проф. Тимошенков С. П., д.т.н., проф. Тодуа П. А., д.т.н., проф. Шубарев В. А., д.т.н., проф. Отв. секретарь Лысенко А. В.

### Релакция:

Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В.

> Учрелитель: Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

## Излается с 1999 г.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Голиков А. В. Математическое моделирование тепловых процессов в углеродных нанотрубках и фуллеренах	3
Макарцева М. М. Исследование эффективности использования специализирован- ной библиотеки мажоритарных элементов при автоматизации проектирования	9
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ	
Гурин С. А., Песков Е. В., Вергазов И. Р. Методика термостабилизации тонкопле- ночных гетерогенных структур	12
<b>Трегулов В. В., Гудзев В. В., Вишняков Н. В., Воробьев Ю. В., Толкач Н. М.</b> Структура поверхности пленок пористого кремния, сформированных в электроли- те на основе HF с добавкой KMnO <sub>4</sub>	16
Вертянов Д. В., Тимошенков С. П., Петров В. С., Горюнова Е. П. Свойства и прак- тическое применение полиимидных микроструктур	19
элементы мнст	
Тимошенков С. П., Шерченков А. А., Нальский А. А., Ревина А. А., Лобус Р. Е. Ис- точник тока на фотоэлектрическом эффекте с повышенными показателями эффек- тивности	25
Новиков Ю. А. Виртуальные измерительные приборы	29
Васильев В. А., Москалев С. А., Ползунов И. В., Шокоров В. А. Полупроводнико- вые микроэлектромехнические системы современных и перспективных датчиков давления	37
Глинский И. А., Рубан О. А., Алёшин А. Н., Зенченко Н. В., Мельников А. А. Расчет тепловых режимов HEMT-транзисторов на основе гетероструктуры AlGaN/GaN.	43
Семёнов А. Н., Шалимов А. С., Зуев Е. В. Исследование возможности создания на БМК 5503 микросхемы управления емкостным преобразователем линейного ускорения	49
ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ	

Бабуров В. А., Томош К. Н., Павлов В. Ю. Модульная система дистанционного обучения и тестирования специалистов в области плазмохимических процессов . . 52

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (http://microsystems.ru; http://novtex.ru/nmst/) и научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2012 г. в разделе "АРХИВ"

### ПОДПИСКА: по каталогу Роспечати (индекс 79493); по каталогу "Пресса России" (индекс 27849) в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки: 107076 Москва, Стромынский пер., д. 4 e-mail: nmst@novtex.ru

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2014

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

# Journal of NANOand MICROSYSTEM TECHNIQUE NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEHNIKA

ISSN 1813-8586

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. – EDITOR IN CHIEF Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. DEPUTY OF EDITOR IN CHIEF

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA) – **DEPUTY OF EDITOR IN CHIEF** 

### **Editorial council:**

Aristov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Gaponov S. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Kaljaev I. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Klimov D. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Nikitov S. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Ryzhii V. I. (Japan), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS

### Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andrievskii R. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Antonov B. I. Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Bykov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Gradetskiy V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.) Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Petrunin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Pozhela K.(Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.) Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Todua P. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

### **Executive secretary:**

Lysenko A. V.

**Editorial staff:** 

Chugunova A. V. Grigorin-Ryabova E. V.

### Address:

4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel/Fax: +7(499)269-55-10. Web: www.microsistems.ru/eng; e-mail: nmst@novtex.ru The Journal is included in the list of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation, in the Russian system of science citation index and INSPEC data base

Published since November 1999

### CONTENTS

Nº 11

(172)

2014

### MODELLING AND DESIGNING OF MNST

**Dzhashitov V. E.**], **Pankratov V. M., Golikov A. V.** Mathematical Modelling of Thermal Processes in Carbon Nanotubes and Fullerenes . . . . . 3

 Makarceva M. M. Study of Efficiency for Design Automation Using Library

 of Fault Tolerant Cells with Redundancy
 9

## SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

**Vertyanov D. V., Timoshenkov S. P., Petrov V. S., Goryunova E. P.** Properties and Practical Application of Polyimide Microstructures . . . . 19

### MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Timoshenkov S. P., Sherchenkov A. A., Nalsky A. A., Revina A. A.,Lobus R. E. Current Source Based on Photoelectric Effect with EnhancedEfficiencyEfficiency25

Vasiliev V. A., Moskaliev S. A., Polzunov I. V., Shokorov V. A. Semiconductor Microelectromechanical Systems of Modern and Prospective Pressure Sensors

Semyonov A. N., Shalimov A. S., Zuev E. V. Research of Availability of IC Based on Array Chip 5503 for Capacitive Transducer of Linear Acceleration

### APPLICATION OF MNST

# Моделирование и конструирование MHCT Modelling and designing of MNST

### УДК 629.7.054

**В. Э. Джашитов**, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., **В. М. Панкратов**, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., **А. В. Голиков**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт проблем точной механики и управления Российской Академии Наук, г. Саратов, e-mail: iptmuran@san.ru

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ И ФУЛЛЕРЕНАХ

### Поступила в редакцию 01.07.2014

Рассмотрены фундаментальные и прикладные аспекты применения метода элементарных балансов к расчету нестационарных температурных полей наноструктур. Показана принципиальная возможность применения этого метода к построению математических моделей тепловых процессов в наноструктурах. Выявлены особенности, возникающие при построении таких моделей. Разработаны алгоритмы и поддерживающее программное обеспечение, позволяющие автоматизированно решать задачи расчета и анализа нестационарных температурных полей наноструктур. Проведены компьютерные эксперименты, подтверждающие полученные теоретические результаты и работоспособность математического, алгоритмического и программного обеспечения.

**Ключевые слова:** моделирование, тепловые процессы, нанотрубки, температурные поля, метод элементарных балансов

## Введение, постановка задач, обоснование походов и методов решения

В настоящее время в области нанотехнологий существенное развитие и применение находят материалы и изделия на основе углеродных нанотрубок (УНТ), молекул фуллерена и других наноструктур.

В связи с созданием многообразных наноструктур [1, 2] возникает необходимость разработки методов и построения математических моделей для расчета и анализа нестационарных тепловых процессов как важного фактора, влияющего на их эффективное и надежное функционирование, например, в составе датчиков, приборов и прецизионных измерительных систем.

На макро- и микроуровнях действуют хорошо разработанные континуальные теории сплошных сред и инженерные методы расчета и конструирования технических устройств с учетом разнообразных возмущающих факторов [3, 4].

При этом возникает важный с фундаментальной и с прикладной точек зрения вопрос о возможности и способах реализации методов расчета температурных полей [3, 4] применительно к наноуровню.

В работе [5] обоснована принципиальная возможность применения метода элементарных балансов (МЭБ) [3, 4] к расчету нестационарных температурных полей наноструктур.

Цель настоящей работы — дальнейшее развитие и применение МЭБ к расчету и анализу тепловых процессов в конкретных наноструктурах (углеродных нанотрубках, фуллеренах и др.) с учетом их особенностей.

В основе МЭБ [3, 4] лежат: закон сохранения энергии; закон Фурье теплообмена теплопроводностью; закон Ньютона конвективного теплообмена; закон лучистого теплообмена Стефана—Больцмана.

Сущность МЭБ для твердотельных структур [3-5]: макро- или микроструктура (датчик, прибор, плата или другое устройство) разбивается на ряд конечных элементарных объемов (элементов). Эти объемы — тела с температурой  $T_i(t)$ , i = 1, 2, ..., N.

В объемах могут находиться источники или стоки теплоты мощностью  $Q_i$ . Из законов теплообмена путем составления уравнений тепловых балансов выводится основной алгоритм [4, 5] расчета температурного поля:

$$T_{i}(t + \Delta t) = \left[1 - \frac{\Delta t}{c_{i}} \left(\sum_{j=1}^{N} q_{ij} + q_{ic}\right)\right] T_{i} + \frac{\Delta t}{c_{i}} \left(\sum_{j=1}^{N} q_{ij}T_{j} + q_{ic}T_{ci} + Q_{i}\right), \quad (1)$$

где  $T_i(t)$ ,  $T_i(t + \Delta t)$ ,  $c_i$  (i = 1, ..., M) — температуры *i*-го элемента в настоящий и последующий моменты времени и его теплоемкость;  $q_{ij}$  — термопроводимости между элементами *i*, *j* (j = 1, ..., N);  $q_{ic}$  термопроводимость между *i*-м элементом и окружающей средой;  $T_{ci}$  — температура окружающей среды;  $Q_i$  — мощность источника теплоты; M число элементов; N — число элементов, имеющих тепловой контакт с *i*-м элементом;  $\Delta t$  — шаг расчета.

В некоторых случаях возможен и целесообразен альтернативный подход к составлению уравнений тепловых балансов не в виде разностных соотношений, а в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений для твердотельных структур:

$$c_{i}\frac{dT_{i}}{dt} + \sum_{j=1}^{M} q_{ij}(T_{i} - T_{j}) + q_{ic}(T_{i} - T_{c}) = Q_{i},$$
  
$$i = 1, ..., N.$$
 (2)

Система таких дифференциальных уравнений соответствует разностному алгоритму (1), и их удобно использовать для численных расчетов при сравнительно малом числе элементарных объемов (порядка нескольких единиц и десятков), а также для проведения аналитических оценок теплового состояния рассматриваемых структур.

Вместе с тем, внутри рассматриваемых наноструктур учитывается теплообмен только теплопроводностью (кондукцией). Наноструктуры состоят из наночастиц (молекул, ионов, атомов). Наночастицы находятся в непрерывном движении и между ними существуют силы взаимного притяжения и отталкивания. Эти силы вызывают колебания наночастиц около их средних положений, причем амплитуды колебаний являются мерой температуры и растут при ее повышении.

Как показано в работах [4, 5], в первом приближении можно полагать, что использование алгоритмов и уравнений (1), (2) МЭБ *принципиально возможно* и на наноуровне.

Этот вывод подтверждается еще и тем, что МЭБ — это численный метод, алгоритмы которого [5] основаны на фундаментальных энергетических соотношениях, определяемых соответственно законами сохранения энергии и теплообмена Фурье, Ньютона, Стефана—Больцмана. При этом совершенно *необходим учет* реальных типов внутренних наноструктур при расчете их температурных полей, *при переходе* к наноразмерностям в теплофизических параметрах и мощностях тепловыделения и уменьшении характерного времени протекания тепловых процессов до наноуровня.

Еще одна выявленная особенность применения МЭБ для расчета температурных полей наноструктур заключается в *существенном уменьшении* (на порядки за счет малых геометрических размеров поверхностей теплоотдачи), по сравнению с макроуровнем, термопроводимостей в окружающую среду по отношению к внутренним термопроводимостям между наночастицами. Эта особенность позволяет на данном этапе при расчете температурных полей наноструктур пренебречь их теплообменом с окружающей средой.

### Исследуемые наноструктуры

Углеродная нанотрубка (УНТ) [1, 6—8] — это цилиндрическая структура диаметром от долей нанометров до микрометра и длиной до десятков микрометров, полученная при свертывании плоской гексагональной сетки графита без швов. Эти трубки могут быть открытыми с торцов или заканчиваться полусферическими головками, рассматриваемыми как половинки молекул фуллерена [1, 6—8].

Идеальная открытая нанотрубка представляет собой свернутую в цилиндр графитовую плоскость, т. е. поверхность, выложенную правильными шестиугольниками, в вершинах которых расположены атомы углерода. Взаимная ориентация гексагональной сетки графита и продольной оси нанотрубки определяет важную структурную характеристику УНТ — ее хиральность. Хиральность нанотрубки определяет многие ее свойства, например, электрические, теплофизические и другие характеристики.

Хиральность нанотрубок [1, 6-8] обозначается набором целых индексов (m, n), указывающих координаты вершин шестиугольника, который в результате сворачивания плоскости должен совпадать с шестиугольником, находящимся в начале координат (рис. 1).

Другой способ обозначения хиральности состоит в указании угла  $\alpha$  между направлением сворачивания нанотрубки и направлением, в котором соседние шестиугольники имеют общую сторону.

Индексы хиральности однослойной нанотрубки (m, n) однозначно определяют ее диаметр D, поперечный x и минимальный продольный размер y плоской прямоугольной развертки и угол  $\alpha$ .



#### Рис. 1. Хиральность УНТ:

*а* — определение направления *R* закручивания нанотрубок; *б* — плоские развертки нанотрубок с различными хиральностями

Среди различных возможных направлений сворачивания нанотрубок выделяются те, для которых совмещение шестиугольника (*m*, *n*) с началом координат не требует искажения его структуры. Этим направлениям соответствуют, в частности, углы  $\alpha = 0^{\circ}$  и  $\alpha = 30^{\circ}$  (рис. 1). Указанные конфигурации отвечают хиральностям (*m*, *m*) и (*m*, 0) соответственно и будут исследованы далее.

Для сравнительного анализа влияния хиральности УНТ, например, на их теплофизические параметры необходимо исследовать одинаковые по размерам нанотрубки.

Наиболее близкие по диаметрам являются нанотрубки с минимальными хиральностями  $(m_1, m_1) = (4, 4)$  и  $(m_2, 0) = (7, 0)$  или нанотрубки  $(m_1, m_1) = (15, 15)$  и  $(m_2, 0) = (26, 0)$ .

Теплота в УНТ распространяется от более нагретых наночастиц к менее нагретым по цилиндрической поверхности в соответствии со структурой нанотрубок, определяемой их хиральностью.

На основании закона теплопроводности Фурье введем важную характеристику  $\lambda_{9}$  — эффективную теплопроводность УНТ (или другой наноструктуры).

Предположим, что в выбранной группе наночастиц (частный случай — одна частица) имеется источник теплоты заданной постоянной удельной мощности, например, задана удельная мощность тепловыделения Q [пВт/пм<sup>2</sup>] = const в группе наночастиц на одном торце трубки.

От этого источника теплота будет распространяться по цилиндрической поверхности нанотрубки с достигнутым через некоторое время максимальным постоянным температурным перепадом  $\Delta T$ , между самой нагретой наночастицей (в ней источник теплоты заданной мощности) и наименее нагретой отдаленной наночастицей.

Эффективную теплопроводность  $\lambda_{9}$  при прохождении потока теплоты по поверхности нанотрубки (или другой наноструктуры) можно записать [5] через температурный градиент  $\Delta T / \Delta l$ :

$$\lambda_{2} = Q\Delta l / \Delta T, \qquad (3)$$

где  $\Delta l$  — кратчайшее расстояние по направлению градиента между наиболее и наименее нагретыми наночастицами.

Температурный перепад  $\Delta T$  рассчитывается в программном комплексе по алгоритму (1) МЭБ.

Например, для УНТ с хиральностями  $(m_1, m_1)$  и  $(m_2, 0)$  формулы вида (3) для расчета эффективной теплопроводности трубки примут вид

$$\lambda_{31} = Q\Delta l_1 / \Delta T_1; \quad \Delta l_1 = \sqrt{3} \, m_1 d_0 \sqrt{k_1^2 \pi^2 + 3} \, / \pi; \quad (4)$$

$$\lambda_{32} = Q\Delta l_2 / \Delta T_2; \quad \Delta l_2 = \sqrt{3} \, d_0 \sqrt{k_2^2 m_1^2 \pi^2 + m_2^2} / \pi. \tag{5}$$

При использовании введенного понятия эффективной теплопроводности и метода элементарных балансов можно оценить теплофизические свойства той или иной наноструктуры, решая *обратную задачу* теплопроводности, а именно:

- с помощью МЭБ рассчитывается нестационарное поле наноструктуры и определяется температурный перепад △*T*;
- используя заданную мощность теплового потока Q = const и геометрическую характеристику Δl, по формулам вида (3)—(5) находится эффективная теплопроводность λ<sub>э</sub> рассматриваемой наноструктуры.

Теплоту нанотрубки [6, 7] проводят лучше алмаза — одного из самых эффективных проводников теплоты. Например, если покрыть микросхему оболочкой из нанотрубок, то можно упаковать ее компоненты в очень плотный объем с минимальным риском перегрева. Уникальность УНТ в том, что ток протекает по ним практически без выделения теплоты. Массив УНТ может эффективно отводить теплоту от нагретых тел любых размеров — будь то макроскопическая микросхема или микромеханический чип или наночип [6]. Матрица из нанотрубок рассеивает теплоту так же эффективно, как и медные радиаторы. При этом "радиатор" из нанотрубок гораздо эффективнее, он на порядок легче и может изгибаться в любом направлении.

Исследование тепловых процессов в рассмотренных наноструктурах необходимо для выяснения их оптимальных типов, характеристик и параметров (хиральностей, длин, теплофизических свойств и др.), например, для создания радиаторов с заданными свойствами для отвода теплоты от нано- и микрочипов с источниками теплоты.

Для таких исследований строятся тепловые модели наноструктур, математические модели на основе алгоритмов и формул (1)—(5), разрабатываются поддерживающие программные комплексы и проводятся компьютерные эксперименты и сравнительный анализ наноструктур с выбором необходимых параметров и характеристик.

### Тепловые модели наноструктур

Рассмотрим тепловые модели, с помощью которых методом элементарных балансов рассчитываются температурные поля и теплофизические характеристики наноструктур (рис. 2).

Построенные тепловые и математические модели наноструктур реализованы в программных комплексах, позволяющих рассчитывать нестационарные неоднородные температурные поля этих наноструктур, эффективные теплопроводности и другие параметры.

Исходными данными в программных комплексах являются геометрические, теплофизические и другие характеристики исследуемых наноструктур и входные данные алгоритма МЭБ.

Диалоговые окна одного из программных комплексов представлены на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

## Компьютерные эксперименты и анализ результатов

Ставится практическая задача: выбрать УНТ с необходимыми свойствами (хиральностью, геометрическими характеристиками и др.), обеспечивающими максимальную эффективность отвода теплоты от нано- и микрочипов с электроэлементами, т. е. обладающих максимально эффективными радиаторными свойствами.

В качестве основного температурного воздействия выбрано расположение источника тепловыделения с заданной постоянной мощностью Q в одной из наночастиц на краю наноструктуры. Такое расположение источника вызывает максимальные перепады в наноструктуре и позволяет оценить в ней температурные градиенты и эффективные теплопроводности.

Проводится расчет температурного поля исследуемой наноструктуры с варьированием ее теплофизических, геометрических и других характеристик и определяются выходные параметры (максимальные и минимальные температуры и температурные перепады, эффективные теплопроводности и др.) как функции входных данных.

Влияние теплопроводности на параметры тепловых процессов. Для сравнения на этом этапе выбраны УНТ с хиральностями (4, 4) и (7, 0), с одинаковой минимальной длиной и близкими диаметрами.

На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) представлены результаты моделирования нестационарных тепловых процессов УНТ с выбранными хиральностями и номинальными значениями теплопроводности  $\lambda/\lambda_{\text{ном}} = 1$ . За номинальную  $\lambda_{\text{ном}}$  в расчетах принята теплопроводность наноструктуры алмаза.

Как видим, во всех наночастицах УНТ при выбранном тепловом воздействии происходит (после переходных процессов) нарастание температуры по линейному закону и устанавливаются постоянные

> температурные перепады  $\Delta T$  между наночастицами. В зависимости от хиральности УНТ максимальные температуры, достигнутые за заданное время, и значения перепадов температур различны:

- при хиральности (4,4) T<sub>max</sub> = = 19 °C за 2 пс, ΔT = 8 °C;
- при хиральности (7,0)  $T_{\text{max}} = 23 \text{ °C}$  за 2 пс,  $\Delta T = 12 \text{ °C}$ .

На рис. 5 приведены зависимости максимального перепада температуры от относительной теплопроводности углерода  $\Delta T_{\max}(\lambda/\lambda_{HOM})$ для УНТ с хиральностями (4, 4) и (7, 0) и сферического фуллерена.



нимальной конфигурации: (m, m) = (4, 4)



Рис. 5. Зависимости  $\Delta T_{\text{max}}$  ( $\lambda/\lambda_{\text{ном}}$ ):

1 — УНТ хиральности (4, 4); 2 — УНТ хиральности (7, 0); 3 — сферический фуллерен

С ростом относительной теплопроводности  $\lambda/\lambda_{\text{ном}}$  максимальный перепад температуры уменьшается по нелинейному закону для рассмотренных наноструктур.

Поскольку эффективная теплопроводность наноструктур тем больше, чем меньше перепад  $\Delta T_{\text{max}}$ , то видно, что наибольшую теплопроводность при всех значениях  $\lambda/\lambda_{\text{ном}}$  имеет сферический фуллерен, меньшую теплопроводность имеет УНТ хиральности (4, 4), еще меньшую теплопроводность имеет УНТ хиральности (7, 0).

Таким образом, предпочтительней для радиаторов использовать УНТ с хиральностью (m, m), а не (m, 0).

Скорости нарастания температур  $\hat{T}(t)$  зависят от хиральности УНТ и от относительной теплопроводности  $\lambda/\lambda_{HOM}$  только на начальном этапе во время переходных процессов и при малых хиральностях до (m, m) = (4, 4).

В установившемся режиме, после окончания переходных процессов, и при достаточно больших хиральностях от (m, m) = (4, 4) скорости  $\dot{T}(t)$  нарастания температур наночастиц практически не зависят от хиральности УНТ и от относительной теплопроводности.

Исследование эффективной теплопроводности наноструктур. Существенное значение имеет изучение влияния хиральности и длины УНТ на введенную важную характеристику нанотрубок — ее эффективную теплопроводность  $\lambda_3$ .

На рис. 6 приведены построенные по результатам компьютерных экспериментов зависимости относительной эффективной теплопроводности  $\lambda_3(m, m)/\lambda_3^{\min}(2, 2)$  от хиральности (m, m) УНТ при различных относительных теплопроводностях  $\lambda/\lambda_{\rm HOM}$  материала нанотрубки.

Для решения поставленной задачи также важно знать, как длина нанотрубки с заданной хиральностью влияет на эффективную теплопроводность УНТ, т. е. на ее свойства как радиатора.

На рис. 7 приведены построенные по результатам компьютерных экспериментов зависимости эффективной теплопроводности  $\lambda_9$  от относительной длины  $h_1/y_1$  нанотрубки хиральности (4, 4) при различных относительных теплопроводностях  $\lambda/\lambda_{\text{ном}}$  материала нанотрубки.

Как показано на рис. 7, зависимость эффективной теплопроводности от длины нанотрубки носит характер, близкий к линейному.

При этом, как показало моделирование, эффективная теплопроводность существенно зависит от теплопроводности материала УНТ.

Обобщая проведенные исследования, приведем на рис. 8 диаграмму, на которой показаны вычисленные значения относительных эффективных теплопроводностей для рассмотренных наноструктур.

За номинальную эффективную в расчетах принята теплопроводность  $\lambda_{\mathfrak{I}}^{\text{ном}}$  — эффективная теплопроводность наноструктуры алмаза. Эффективные теплопроводности других рассмотренных наноструктур приведены по отношению к  $\lambda_{\mathfrak{I}}^{\text{ном}}$ .

Анализ полученных данных (рис. 8) показал следующее:

• эффективные теплопроводности углеродных нанотрубок при достаточно больших значениях







 $1 - \lambda/\lambda_{HOM} = 1; 2 - \lambda/\lambda_{HOM} = 1,25; 3 - \lambda/\lambda_{HOM} = 0,5$ 

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 11, 2014 –



Рис. 8. Диаграмма эффективных теплопроводностей  $\lambda_3 / \lambda_3^{HOM}$  для наноструктур:

1 — алмаз; 2 — графит; 3 — фуллерен; 4 — открытая УНТ (m, 0) = (7, 0), длина  $h = y_1$ ; 5 — открытая УНТ (m, m) = (4, 4), длина  $h = y_1$ ; 6 — открытая УНТ (m, m) = (4, 4), длина  $h = 2y_1$ ; 7 — открытая УНТ (m, m) = (4, 4), длина  $h = 4y_1$ ; 8 — открытая УНТ (m, m) = (5, 5), длина  $h = y_1$ ; 9 — полуоткрытая УНТ (m, m) = (5, 5), длина  $h = y_1$ ; 10 — открытая УНТ (m, m) = (7, 7), длина  $h = y_1$ , 11 — открытая УНТ (m, m) = (15, 15), длина  $h = y_1$ 

их хиральностей и длинах могут существенно (почти в 8 раз) превышать эффективную теплопроводность алмаза;

- предпочтительнее использовать нанотрубки хиральности (*m*, *m*) с углом α = 0°, чем нанотрубки хиральности (*m*, 0) с углом α = 30°. Эффективная теплопроводность УНТ (*m*, *m*) = (4, 4) на 53 % больше, чем УНТ (*m*, 0) = (7, 0) при примерно одинаковых размерах нанотрубок (ср. столбики 4 и 5 диаграммы рис. 8);
- закрытость торцов нанотрубок полусферическими молекулами фуллеренов незначительно (на 3 %) увеличивает эффективную теплопроводность УНТ (ср. столбики 8 и 9 диаграммы рис. 8). При увеличении длины УНТ (*h* > *y*<sub>1</sub>) это влияние будет уменьшаться;
- влияние изменений хиральности УНТ на эффективную теплопроводность более существенно, чем изменения длины нанотрубки. Так, увеличение хиральности в 3 раза от (5, 5) до (15, 15) приводит к увеличению λ<sub>3</sub> в 2 раза (ср. столбики 8 и 11 диаграммы рис. 8). Увеличение длины УНТ в 4 раза приводит к увеличению λ<sub>3</sub> в 1,8 раза (ср. столбики 5 и 7 диаграммы рис. 8).

Почему свойства элементарных форм углерода в виде нанотрубок отличаются от свойств хорошо известных структур алмаза и графита (на которые больше всего и похожи структуры нанотрубок)? Дело в особенностях структур этих соединений. Если в "классических" структурах связи геометрически являются ортогональными, то в нанотрубках и фуллеренах, за счет ненулевой кривизны их цилиндрических и сферических поверхностей, ортогональными не являются. Эта неортогональность и определяет многообразие и отличительные свойства углеродных нанотрубок и фуллеренов (например, большую теплопроводность).

### Заключение

Показана принципиальная возможность применения метода элементарных балансов к построению математических моделей тепловых процессов и расчету нестационарных температурных полей в наноструктурах.

Выявлены следующие особенности, возникающие при построении таких моделей: необходимость достаточно точного учета структуры расположения наночастиц, переход к наноразмерностям в теплофизических параметрах и мощностях тепловыделения, уменьшение характерного времени протекания тепловых процессов до наноуровня и существенное уменьшение, по сравнению с макроуровнем, коэффициентов термопроводимости в окружающую среду по отношению к внутренним коэффициентам термопроводимости между наночастицами.

Разработаны алгоритмы и поддерживающее программное обеспечение, позволяющие автоматизированно решать задачи расчета и анализа нестационарных температурных полей наноструктур. Проведены компьютерные эксперименты, подтверждающие полученные теоретические результаты и работоспособность математического, алгоритмического и программного обеспечения.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) по проекту 13-08-00355а.

#### Список литературы

1. **Нано-** и микросистемная техника. От исследований к разработкам. Сб. статей / Под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2005. 592 с.

2. Нанотехнологии в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002.

3. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.

4. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. / Под общей ред. В. Г. Пешехонова. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2005. 404 с.

5. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. О возможности применения метода элементарных балансов к расчету нестационарных температурных полей наноструктур // Нанои микросистемная техника. 2008. № 10 (99). С. 16—22.

6. **Елецкий А. В.** Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. 2002. Т. 172, № 4. 403 с.

7. Дьячков П. Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.

8. **Berber S., Kwon Y.-K., Tomanek D.** Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes // Phys. Rev. Lett. 2000. N. 84. P. 4613.

V. E. Dzhashitov, Head of Laboratory, V. M. Pankratov, Leading Researcher, A. V. Golikov, Senior Researcher, e-mail: iptmiran@san.ru

Science federal state budgetary institution - Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences

### Mathematical Modelling of Thermal Processes in Carbon Nanotubes and Fullerenes

Fundamental and applied aspects of application of a method of elementary balances to calculation of non-stationary temperature fields of nanostructures are considered. Basic possibility of application of this method to creation of mathematical models of thermal processes in nanostructures is shown. The features arising in construction of such models are revealed. Algorithms and the supporting software are developed, allowing is automated to solve problems of calculation and the analysis of non-stationary temperature fields in nanostructures. The computer experiments confirming received theoretical results and operability of mathematical, algorithmic and the software are made.

Keywords: modelling, thermal processes, nanotubes, temperature fields, method of elementary balances

### References

1. **Nano-** i mikrosistemnaja tehnika. Ot issledovanij  $\kappa$  razrabotkam. Sb. statej. Pod red. P. P. Mal'ceva. M.: Tehnosfera, 2005. 592 p.

2. **Nanotehnologii** v blizhajshem desjatiletii. Prognoz napravlenija issledovanij. Pod red. M. K. Roko, R. S. Uil'jamsa, P. Alivisatosa. M.: Mir, 2002.

3. **Dul'nev G. N., Parfenov V. G., Sigalov A. V.** *Metody rascheta teplovogo rezhima priborov.* M.: Radio i svjaz', 1990. 312 p.

4. Dzhashitov V. E., Pankratov V. M. Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo i morskogo priborostroenija v uslo-

*vijah teplovoyh vozdejstvij.* Pod obshhej red. V. G. Peshehonova. S.-Peterburg: GNC RF CNII "Elektropribor", 2005. 404 p.

5. **Dzhashitov V. E., Pankratov V. M.** O vozmozhnosti primenenija metoda elementarnyh balansov κ raschetu nestacionarnyh temperaturnyh polej nanostruktur. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika.* 2008. N. 10 (99). P. 16–22.

6. **Eleckij A. V.** Uglerodnye nanotrubki i ih emissionnye svojstva. *UFN*. 2002. V. 172. N. 4. 403 p.

7. **D'jachkov P. N.** *Uglerodnye nanotrubki: stroenie, svojstva, primenenija.* M.: BINOM. Laboratorija znanij, 2006.

8. Berber S., Kwon Y.-K., Tomanek D. Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes. *Phus. Rev. Lett.* 2000. N. 84. P. 4613.

### УДК 621.3.019.34

**М. М. Макарцева**, младший научный сотрудник, ФГБУ НПК "Технологический центр", г. Москва, M.Makarceva@tcen.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ БИБЛИОТЕКИ МАЖОРИТАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### Поступила в редакцию 13.07.2014

Рассматривается возможность повышения надежности интегральных схем с помощью функции автоматического резервирования библиотечных элементов в среде САПР БИС "Ковчег" и исследуется эффективность данного этапа маршрута проектирования в рамках разработки ИС специального назначения.

Рассмотрены параметры автоматического резервирования и его влияние на основные показатели ИС.

Ключевые слова: повышение надежности ИС, резервирование, мажоритарные элементы, HDL, CAПР

Стойкость к одиночным сбоям, вызванным радиационными эффектами, необходимое условие для схем специального назначения. В некоторых случаях невозможно достигнуть заданного уровня надежности без использования метода избыточного резервирования. Одним из самых распространенных методов является метод тройного модульного резервирования (*triple modular redundancy*, TMR) (рис. 1), основой которого является повышение надежности критического узла схемы путем дублирования его тремя копиями и результирующего сравнения выходных значений с помощью схемы голосования (*majority vote*).

Наиболее подвержены одиночным сбоям (singleevent upset, SEU) элементы памяти [1]. В отличие от комбинационной логики, где сбой скорректируется соответственно состояниям входных сигналов, в элементах памяти SEU может изменить логическое состояние и таким образом исказить текущую и дальнейшую работу схемы [2].



Рис. 1. Элемент с резервированием



Рис. 2. Блок автоматического резервирования описания схемы в формате Verilog-netlist

Для решения задачи автоматизации повышения надежности схем в НПК "Технологический центр" разработана библиотека элементов с резервированием основных триггеров, выходы которых проходят через мажоритарную ячейку, определяющую верный выходной сигнал.

При троичном резервировании возникает проблема тестирования готовой схемы. Если после производства один из трех резервирующих элементов (РЭ) в триггере не будет работоспособным, мажоритарный элемент на выходе оценит сигнал по двум корректно работающим и будет отображать правильный результат. Естественно, что в таком случае схема уже не защищена от сбоя и при выходе из строя одного из двух работающих РЭ сигнал на выходе не будет соответствовать правильной работе схемы. Для определения исправности всех трех РЭ в схему ячейки добавлены два дополнительных внешних сигнала для тестирования схемы после изготовления. Тестирование выполняется путем поочередного отключения резервирующих элементов и сравнения результатов моделирования с эталонными выходными воздействиями,

таким образом определяется работоспособность всех РЭ в изготовленной схеме.

Маршрут проектирования схем с повышенной стойкостью к SEU разрабатывается в рамках САПР БИС "Ковчег" с использованием специализированной библиотеки элементов с резервированием. В состав библиотеки входят 148 триггеров с троированием. Для каждого разработана схема, условное графическое обозначение и топология (на данный момент для технологии объемного кремния). Таким образом, разработка схемы с использованием специализированной библиотеки возможна также и в графическом редакторе САПР "Ковчег".

Применительно к разработке схем с помощью САПР "Ковчег" использование автоматической подстановки элементов с резервированием должно учитывать особенности проектирования схем для БМК. Наличие стандартных библиотек, перечень элементов которых составляет базис для разработки, предопределяет направление развития алгоритма повышения надежности. Важно поместить систему автоматиче-

ского повышения надежности на завершающий этап маршрута разработки логической схемы. Это позволит разработчику при проектировании схемы сосредоточиться на логике работы и применении обычных библиотечных элементов, сократить время разработки и в дальнейшем брать одно описание схемы как базовое для обычного и резервированного режимов [3] и повторно использовать при создании сбоеустойчивых схем готовые подсхемы и функциональные блоки, разработанные без учета резервирования элементов.

Целесообразность автоматической замены элементов на резервированные на уровне описания схемы Verilog-netlist (рис. 2) также определяется форматом файла, формализуемость структуры облегчает синтаксический разбор текста. Схожая структура обычных триггеров и триггеров с резервированием упрощает процесс замены, необходимо конечно учесть наличие тестовых сигналов. При работе с так называемым "плоским" нетлистом и при сохранении иерархической структуры схемы методы будут значительно отличаться, так как для иерархического описания схемы понадобится изменение некоторых блоков, вследствие учета распространения тестовых сигналов по схеме.

Для сокращения времени, затрачиваемого на разработку и отладку схем с резервированием, необходимо также автоматизировать модификацию тестовых воздействий, дополнительно проверяющую работоспособность каждого резервирующего элемента. Блок изменения готовых тестовых последовательностей разрабатывается как для описания тестов во внутреннем формате САПР "Ковчег", так и для описания тестов на языке Verilog.

Полная замена всех триггеров на триггеры с резервированием обеспечивает стойкость схемы к SEU на 100 %-ном уровне, что не всегда является строго необходимым. Компромиссным решением, которое позволит снизить процент увеличения площади при резервировании, выступает метод частичного резервирования (Selective TMR, STMR) [4, 5], заключающийся в резервировании только части узлов схемы, наиболее подверженных одиночным сбоям. Затраты на перебор всех возможных комбинаций резервирования и оценка устойчивости к сбоям каждого варианта для оценки растет с увеличением числа элементов в схеме, в связи с этим становится обоснованным исследование эвристических методов, позволяющих сократить время и получить приемлемые результаты.

При очевидном повышении надежности в схеме непосредственный перевод всех триггеров в резервируемые имеет явные недостатки: ухудшение временных параметров схемы за счет введения дополнительных элементов; увеличение энергопотребления; значительное увеличение площади результирующей схемы. Эти изменения делают методику полного резервирования неподходящей для множества применений с ограниченными параметрами. Частичное же резервирование не всегда может гарантировать, что будет найдено оптимальное решение за разумное время. Но несмотря на это при разработке схем с высокими требованиями по стойкости к сбоям эффективно используется метод резервирования. Автоматизация процесса повышения надежности, интегрированная в готовый маршрут проектирования, вместе с системами тестирования модифицированных схем позволит сократить время разработки при полном контроле пользователем.

#### Список литературы

1. Юдинцев В. Радиационно-стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на земле // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2007.

2. **Carmichael C.** Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs. http://www.xilinx.com/support/documentation/application\_notes/xapp197.pdf

3. **Ruano P., Maestro J. A., Reviriego P. A.** Methodology for Automatic Insertion of Selective TMR in Digital Circuits Affected by SEUs // Nuclear Science, IEEE Transactions on - 2009. Vol. 56, Is. 4.

4. **Samudrala P. K., Ramos J., Katkoori S.** Selective Triple Modular Redundancy for SEU Mitigation in FPGA. URL: http://www.klabs.org/richcontent/MAPLDCon03/abstracts/ samudrala\_a.pdf

5. Samudrala P. K., Ramos J., Katkoori S. Selective Triple Modular Redundancy (STMR) Based Single-Event Upset (SEU) Tolerant Synthesis for FPGAs // Nuclear Science, IEEE Transactions on - 2004. Vol. 51, Is. 5.

**M. M. Makarceva**, Junior Research Scientist, Research and Production Complex "Technological center", M.Makarceva@tcen.ru

# Study of Efficiency for Design Automation Using Library of Fault Tolerant Cells with Redundancy

The need for integrated mechanism providing automated insertion of fault-tolerant structures in digital circuit is a major concern due to the sensitivity of the circuits to the radiation effects. In this paper, a methodology to perform automatic TMR insertion in a Verilog netlist description of the design using Kovcheg EDA tool is described. This paper also reports on a study of a evaluating fault tolerance of the circuit to enhance productivity and development time.

**Keywords:** triple modular redundancy (TMR), single event upset (SEU), fault tolerance (FT), reliability, EDA, automation, HDL

#### References

1. **Judincev V.** Radiacionno-stojkie integral'nye shemy. Nadezhnost' v kosmose i na zemle. *ELEKTRONIKA: Nauka, Tehnologija, Biznes.* 2007.

2. **Carmichael C.** Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs. <u>http://www.xilinx.com/sup-port/documentation/application notes/xapp197.pdf</u>

3. Ruano O., Maestro J. A., Reviriego P. A. Methodology for Automatic Insertion of Selective TMR in Digital Circuits

Affected by SEUs. Nuclear Science, IEEE Transactions on – 2009. Vol. 56, Is. 4.

4. **Samudrala P. K., Ramos J., Katkoori S.** Selective Triple Modular Redundancy for SEU Mitigation in FPGA. URL: http://www.klabs.org/richcontent/MAPLDCon03/ab-stracts/samudrala\_a.pdf

5. Samudrala P. K., Ramos J., Katkoori S. Selective Triple Modular Redundancy (STMR) Based Single-Even Upset (SEU) Tolerant Synthesis for FPGAs. *Nuclear Science, IEEE Transactions on* -2004. Vol. 51, Is. 5.

# Материаловедческие и технологические основы MHCT Science of materials and technological basics of MNST

УДК 531.78.084.2

С. А. Гурин, нач. лаборатории, Е. В. Песков, нач. тех. бюро, И. Р. Вергазов, вед. инженер-технолог, Научно-исследовательский институт физических измерений, г. Пенза, e-mail: teslananoel@rambler.ru

### МЕТОДИКА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР

Поступила в редакцию 29.05.2014

Рассматриваются механизмы возникновения переходных процессов в гетерогенных структурах металлопленочных датчиков давления. Определены возможные причины нестабильности тонкопленочных тензорезисторов, связанные с методами получения тонких пленок и воздействующими факторами. Представлена методика определения влияния взаимодиффузии в тонких слоях на стабильность параметров различных типов тензорезисторов.

**Ключевые слова:** тонкопленочная структура, технология получения, переходные процессы, взаимодиффузия, чувствительный элемент

### Введение

В настоящее время для получения чувствительных элементов датчиков давления, используемых в авиационно-космической технике, широкое распространение получила технология тонких пленок [1].

Формирование тонкопленочных гетерогенных структур в вакууме вне зависимости от метода создания потока компонентов пленки состоит из следующих стадий:

- зарождение частиц новой фазы;
- рост размера частиц без изменения их числа;
- увеличение размера островков и уменьшение их плотности;
- стадия коалесценции или оствальдовского созревания;
- формирование сплошной пленки [2].

Учитывая, что протекание процессов при формировании тонкопленочных структур нанометровых размеров в вакууме происходит за доли секунды и носит неуправляемый характер (в результате чего образуются неравновесные структуры), необходимо соблюдать технологические условия, зависящие от материалов пленки и подложки, температуры осаждения, наличия молекул остаточных газов в вакуумной камере, атомов с высокой энергией окислообразования. В результате в процессе эксплуатации датчиков давления эти явления оказывают влияние на временную стабильность характеристик датчиков и проявляются в виде возникновения отказов. К одной из таких неравновесных структур относится структура металл—диэлектрик—металл [3], где в качестве подложки выступает сплав 36НХТЮ, диэлектриком служит монооксид кремния с подслоем хрома и двуоксид кремния, в качестве тензорезисторов выступает сплав X20H75Ю, а контактные площадки выполнены на основе золота с подслоем ванадия.

### Экспериментальная часть

Исследование неравновесности системы конденсат—подложка раскрывает различные процессы, протекающие в тонких пленках под воздействием внешних факторов, которые изменяют параметры электрической схемы. Основными причинами возникновения переходных процессов являются:

- механические напряжения в тонких пленках и подложке;
- температурные воздействия в процессе изготовления и эксплуатации.

Механические напряжения, возникающие под воздействием внешней нагрузки в структурах чувствительных элементов, со временем релаксируют, что в итоге может привести к потере сплошности пленки. Термические напряжения выявляются при воздействии нестационарных температур (термоудар в процессе встречи упругого элемента датчика давления со средой), перепадов температур и длительного воздействия критических температур при изготовлении, тренировках и эксплуатации датчиков, приводящих к процессам взаимодиффузии, изменяющих их проводимость. Особенно ярко выражено влияние термомеханических напряжений на стабильность параметров тонкопленочных гетерогенных структур в поликристаллических и многокомпонентных пленках [4]. Зерна в поликристаллических пленках имеют беспорядочную кристаллографическую ориентацию, и в них с течением времени происходят процессы рекристаллизации. В многокомпо-



Рис. 1. Топологическая схема тензомоста чувствительного элемента с полосковыми тензорезисторами (a) и составными тензорезисторами с золотыми перемычками ( $\delta$ )

нентных пленках при их получении в условиях вакуума содержатся значительное число молекул остаточных газов, например азота и кислорода, и атомы с высокой энергией окислообразования. В диэлектриках к ним относятся кремний в монооксиде, двуоксиде кремния, нитриде кремния и алюминий в сапфире [5]. В резистивных пленках это может быть хром в хромосодержащих резистивных сплавах Х20Н80, П65ХС, Х20Н75Ю. В процессе тренировок и эксплуатации чувствительных элементов датчиков за счет температурных воздействий и энергий, возникающих при релаксации температурных и механических напряжений, пленки взаимодиффундируют, образуют между собой новые химические соединения, что приводит к изменению проводимости тензорезисторов, изоляционных слоев, а значит, их сопротивлений.

Для снижения влияния диффузионных процессов на стабильность тонкопленочных тензорезистивных датчиков авторами предложена методика термостабилизации чувствительных элементов с контролем изменения выходных параметров. Результаты сравнивали с параметрами аналогичных элементов, полученных по стандартным технологическим режимам. Термостабилизация структуры проведена на чувствительных элементах двух типов датчиков (рис. 1), разработанных в ОАО "НИИФИ", для проведения сравнительного анализа изменения номиналов тензорезисторов: полосковых из сплава X20H75Ю (рис. 1, *a*) и составных из сплава X20H75Ю с золотыми перемычками (рис. 1, *б*).

Согласно разработанной методике проведена имитация условий превышения допустимого влияния внешних факторов путем воздействия температур на чувствительные элементы датчиков давления с последующей технологической тренировкой. Чувствительные элементы (ЧЭ) подвергали циклическому воздействию перепадов температур в три цикла (5, 10, 10 ч) при давлении  $P = 1 \cdot 10^{-5} ... 5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. в вакуумной камере с выдержкой в течение 30 мин после достижения максимальной температуры  $350 \pm 10$  °C. Затем чувствительные элементы подвергались термостабилизации на воздухе в течение 4...6 ч при температуре  $250 \pm 10$  °C.

По окончании термостабилизации проводили измерение номиналов резисторов, изготовленных по разработанной методике, и резисторов, прошедших термостабилизацию по стандартным технологическим режимам (табл. 1, 2). Затем чувствительные элементы подвергали температурным воздействиям (испытаниям) на воздухе при температуре T = 200 °C.

По достижении определенного времени элементы изымались для проведения измерений номиналов и оценки изменения их значений. После

RESUME TO THE TOP DESIGNATION AND THE STATEMENT OF THE STATEMENT OF

c (	с составными резисторами после термостабилизации				
№ ЧЭ Тип стабилизации -		Значени	е номин	алов резі	исторов
		<i>R</i> <sub>1</sub> , Ом	<i>R</i> <sub>2</sub> , Ом	<i>R</i> <sub>3</sub> , Ом	<i>R</i> <sub>4</sub> , Ом
4282	По разработанной метолике	714,7	719,0	714,4	709,0
4317	По разработанной методике	788,8	800,4	798,2	784,4
4216	По стандартным режимам	725,9	729,1	726,1	721,5
4952	По стандартным режимам	687,6	687,1	684,3	684,3

Таблица 2

Таблина 1

Значение номиналов	резисторов чуво	ствительных элементов
с полосковыми рез	зисторами после	е термостабилизации

Ne IID The sector		Значение номиналов резисторов			
₩49	тип стабилизации	<i>R</i> <sub>1</sub> , Ом	<i>R</i> <sub>2</sub> , Ом	<i>R</i> <sub>3</sub> , Ом	<i>R</i> <sub>4</sub> , Ом
9398	По разработанной методике	668,4	666,8	670,1	664,6
9596	По разработанной метолике	691,8	689,4	690,0	687,7
10204	По стандартным режимам	635,1	630,7	633,9	631,0
10251	По стандартным режимам	674,6	674,9	681,4	676,0



Рис. 2. Результаты замеров изменения номиналов чувствительного элемента с составными резисторами после циклической тренировки в течение 25 ч:

a — изменение номинала резистора  $R_1$  после 5, 10, 10 ч испытаний;  $\delta$  — изменение номинала резистора  $R_2$  после 5, 10, 10 ч испытаний; s — изменение номинала резистора  $R_3$  после 5, 10, 10 ч испытаний; s — изменение номинала резистора  $R_4$  после 5, 10, 10 ч испытаний

измерения сопротивлений элементы ставили на следующий цикл испытаний. Результаты измерений после каждого цикла тренировки отражены на рис. 2, 3.

На рис. 2 видно, что изменения номиналов составных тензорезиторов с золотыми перемычками чувствительного элемента датчика давления после термообработки по разработанной методике значительно меньше, чем выполненных по стандартным режимам. Причем изменение сопротивлений после двух циклов тренировок (5, 10 ч) у элементов, изготовленных согласно разработанной методике, составляет от 0,1 до 0,3 Ом, что сравнимо с погрешностями приборов при измерениях. Небольшой уход номиналов тензорезисторов в сторону уменьшения после 5 ч тренировок (от 1,2 до 1,3 Ом) указывает на завершение окислительных процессов на поверхности и упорядочение структуры внутри пленки тензорезитора, связанные с рекристаллизацией.

Изменение номиналов составных резисторов, изготовленных по стандартным режимам, после проведения первого цикла испытаний составило от 8,8 до 11,3 Ом. После второго цикла испытаний номиналы резисторов изменились от 3,0 до 3,7 Ом, причем разброс между резисторами сжатия  $R_1$  и  $R_3$  чувствительного элемента № 4952 составил 0,5 Ом, что может привести к разбалансу мостовой схемы.

Уход номиналов полосковых тензорезисторов датчиков давления, изготовленных как по разработанной методике, так и по действующим технологическим режимам, практически идентичен (рис. 3), что свидетельствует о достаточности режимов термообработки для завершения процессов окисления и взаимодиффузии.

Сравнительный анализ показал возможность влияния переходных процессов на надежность тензорезисторов, обусловленного дестабилизирующими факторами при эксплуатации. Переходные процессы в тонкопленочных составных тензорезисторах с золотыми перемычками протекают более длительное время, чем в простых полосковых тензорезиторах. Это связано с дополнительной диффузией золота в процессе температурных воздействий, образованием дополнительных химических соединений в материале тензорезитора, подслоя и контакта. Нагрев, осуществляемый согласно вышеприведенной методике, позволил стаби-



Рис. 3. Результаты замеров изменения номиналов чувствительного элемента с полосковыми резисторами после циклической тренировки в течение 25 ч:

a — изменение номинала резистора  $R_1$  после 5, 10, 10 ч испытаний;  $\delta$  — изменение номинала резистора  $R_2$  после 5, 10, 10 ч испытаний;  $\epsilon$  — изменение номинала резистора  $R_3$  после 5, 10, 10 ч испытаний;  $\epsilon$  — изменение номинала резистора  $R_4$  после 5, 10, 10 ч испытаний

лизировать процессы, проходящие внутри пленок тензорезисторов после формирования схемы и влияющие на изменение проводимости, выявить скрытые дефекты в пленках на ранней стадии изготовления и стабилизировать (завершить) диффузионные процессы, связанные с окислообразованием внутри пленок. Нагрев на воздухе обеспечил завершение процессов (стабилизацию), связанных с окислением поверхности пленки.

### Заключение

Представленная методика позволяет существенно снизить возможные отказы датчиков в процессе эксплуатации, связанные с изменением сопротивления в результате взаимодиффузии между слоями в гетерогенной структуре. Анализ зависимости изменения сопротивлений составных и полосковых резисторов чувствительных элементов наглядно показал протекание диффузионных процессов.

#### Список литературы

1. Баринов И. Н., Волков В. С., Евдокимов С. П. Разработка и изготовление микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации // Датчики и системы. 2014. № 2. С. 49—61.

2. Аверин И. А., Волохов И. В., Мокров Е. А., Печерская Р. М. Влияние переходных процессов в тонкопленочной гетерогенной структуре на надежность чувствительных элементов тензорезисторных датчиков давления // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2008. № 2. С. 123—127.

3. Волохов И. В. Технологические методы повышения надежности тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления // Сб. докл. научно-техн. конф. "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий" 21—23 июня 2007. М.: ФГУП РНИИ КП, 2007.

4. Аверин И. А., Печерская Р. М. Управление составом многокомпонентных систем // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2006. № 5. С. 184—190.

5. Волохов И. В. Исследование технологий получения многослойных гетероструктур с применением различных методов осаждения в вакууме изолирующих покрытий на корпусные элементы датчико-преобразующей аппаратуры для авиационно-космической техники // Нано- и микро-системная техника. 2014. № 1. С. 30–39.

S. A. Gurin, Chief of Laboratory, E. V. Peskov, Head of Production Control Office, I. R. Vergazov, Leading Engineer, Penza, e-mail: teslananoel@rambler.ru

Research institute of physical measurements

### Methods of Temperature Setting for Thin Film Heterogeneous Structures

The present work analyzes the technology of producing thin film structures of multicomponent films on the example of making sensitive elements of metal film pressure sensors with various topological design of piezoresisotrs. We have studied major mechanisms of transition processes in heterogeneous structures of metal film pressure sensors, that influence the metrological characteristics of sensors. We have defined possible factors that lead to the instability of thin film piezoresistors, connected with the production methods, materials used for creating structures and the influence of destabilizing factors. We offer the procedure that identifies the influence of diffusion processes between the layers of thin film structure on temporary stability of parameters of various piezoresistors of the sensitive element. The procedure allows to lower significantly the potential sensor failure due to changes in resistance as a result of diffusion in heterogeneous structure.

Keywords: thin film structure, process technology, transition processes, interdiffusion, sensitive elements

### References

1. **Barinov I. N., Volkov V. S., Evdokimov S. P.** Razrabotka i izgotovlenie mikroelektronnyih datchikov davleniya dlya osobo zhestkih usloviy ekspluatatsii. *Datchiki i sistemyi.* 2014. N. 2. P. 49–61.

2. Averin I. A., Volohov I. V., Mokrov E. A., Pecherskaya R. M. Vliyanie perehodnyih protsessov v tonkoplenochnoy geterogennoy strukture na nadezhnost chuvstvitelnyih elementov tenzorezistorayih datchikov davleniya. *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Povolzhskiy region. Tehnicheskie nauki.* 2008. N. 2. P. 123–127.

3. Volohov I. V. Tehnologicheskie metodyi povyisheniya nadezhnosti tonkoplenochnyih tenzorezistomyih datchikov davleniya. *Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskoy konferentsii* 

"Aktualnyie problemyi raketno-kosmicheskogo priborostroeniya i informatsionnyih tehnologiy" 21–23 iyunya 2007. M.: FGUP "RNII KP", 2007.

4. Averin I. A., Pecherskaya R. M. Upravlenie sostavom mnogokomponentnyih sistem. *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennyie nauki.* 2006. N. 5. P. 184–190.

5. Volohov I. V. Issledovanie tehnologiy polucheniya mnogosloynyih geterostruktur s primeneniem razlichnyih metodov osazhdeniya v vakuume izoliruyuschih pokryitiy na korpusnyie elementyi datchiko-preobrazuyuschey apparaturyi dlya aviatsionno-kosmicheskoy tehniki. *Nano- i mikrosistemnaya tehnika.* 2014. N. 1. P. 30–39.

### УДК 539.23: 539.24

**В. В. Трегулов**, канд. техн. наук, доц., Рязанский государственный университет им. С. А. Есенина, e-mail: trww@yandex.ru, **В. В. Гудзев**, ст. преподаватель, **Н. В. Вишняков**, доц.,

Ю. В. Воробьев, аспирант, Н. М. Толкач, магистрант,

Рязанский государственный радиотехнический университет

### СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ НА ОСНОВЕ НF С ДОБАВКОЙ КМnO4

### Поступила в редакцию 20.06.2014

Представлены результаты исследования методом атомно-силовой микроскопии поверхности толстых пленок пористого кремния, изготовленных анодным электрохимическим травлением в электролите на основе HF и  $C_2H_5OH$  с добавкой KMnO<sub>4</sub>. Установлено, что, формируя пленку пористого кремния при освещении кремниевой подложки либо в темноте, можно изменять морфологические особенности ее поверхности при постоянном составе электролита.

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, пористый кремний, поверхность, электрохимическое травление, механические напряжения

### Введение

Пористый кремний (*por*-Si) имеет перспективы широкого применения в современной нано- и микросистемной технике для создания химических датчиков, высокоэффективных солнечных элементов, светоизлучающих приборов, генераторов второй и третьей гармоник лазерного излучения. В то же время основной проблемой, препятствующей широкому применению *por*-Si, является нестабильность его оптических и электрофизических характеристик, обусловленная наличием нестабильных связей Si—H. В целях стабилизации свойств *por*-Si предпринимались попытки пассивации кремниевых кристаллитов галогенами [1], а также внедрения в матрицу *por*-Si металлов Au, Ag, Cu, Al, In, Fe [2]. В работе [3] для получения пленок *por*-Si со стабильной фотолюминесценцией предложено вводить в стандартный электролит (HF +  $C_2H_5OH$ ) водный раствор KMnO<sub>4</sub>. В результате стабильную фотолюминесценцию в видимой области спектра имели образцы, изготовленные как при освещении поверхности кремниевой пластины в ходе роста пленки *por*-Si, так и без него [3].

Цель данной работы — исследование структуры поверхности пленок *por*-Si, сформированных в электролите HF +  $C_2H_5OH$  с добавкой водного раствора KMnO<sub>4</sub>.

### Технология изготовления образцов

Технологический процесс изготовления пленок *por*-Si, исследуемых в данной работе, полностью аналогичен представленному в работе [3].

В качестве подложек использовали монокристаллические кремниевые пластины с текстурированной поверхностью *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом · см и ориентацией (100). Текстурированный рельеф создавался предварительным химическим травлением в водном растворе КОН. Пленки *por*-Si формировали методом анодного электрохимического травления в гальваностатическом режиме в электролите состава HF (48 %) +  $C_2H_5OH$  + водный раствор KMnO<sub>4</sub> (содержание компонентов 0,5:0,5:1,0). Концентрация водного раствора KMnO<sub>4</sub> составляла 0,04 М.

Рост пленки *por*-Si происходил при плотности тока 12,5 мА/см<sup>2</sup> в течение 60 мин. Было изготовлено две партии образцов (по 10 образцов в каждой партии).

Партия № 1 была изготовлена без освещения поверхности кремниевой пластины в ходе электрохимического травления, партия № 2 — при освещении галогенной лампой мощностью 100 Вт.

После изготовления образцы промывали в водном растворе плавиковой кислоты HF (20 %), затем в дистиллированной воде и высушивали на воздухе.

Толщина пленок *por*-Si образцов обоих партий составляла 25 ± 3 мкм.

## Исследование поверхности методом атомно-силовой микроскопии

Исследования структуры поверхности пленки *por*-Si проводили с помощью зондовой нанолаборатории NTEGRA Aura (НТ-МДТ, Россия) в режиме полуконтактной атомно-силовой микроскопии. Анализ результатов сканирования проводили с помощью программного обеспечения Image Analysis Р9 (НТ-МДТ, Россия). Изображение типичных областей поверхности образцов партий № 1 и № 2 (далее по тексту — образец № 1 и образец № 2) представлены на рис. 1. Видно, что структура поверхности пленок *por*-Si исследуемых образцов заметно отличается.

Поверхностный слой пленки *por*-Si образца № 1 образован более крупными фрагментами, расстояние между которыми не превышает их горизонтальных размеров (рис. 1, *a*). На рис. 2 представлены профили фрагмента поверхности образца № 1 в двух взаимно перпендикулярных направлениях в виде графиков функций Z = f(a) и Z = f(b), где Z – координата высоты фрагмента, перпендикулярная поверхности образца, оси *a* и *b* лежат в плоскости поверхности образца (рис. 1, *a*).

Профили поверхности (рис. 2, *a*, *б*) показывают кратерообразный характер рельефа фрагмента поверхностного слоя пленки *por*-Si (рис. 1, *a*), что можно объяснить присутствием в пленке *por*-Si образца № 1 значительных механических напряжений. В процессе формирования при анодном электрохимическом травлении, удаления остатков электролита, хранения на воздухе в пленке *por*-Si возникают значительные механические напряжения, которые приводят к ее растрескиванию и частичному или полному отслаиванию. Согласно работе [4], причиной механических напряжений является большая внутренняя поверхность *por*-Si, пассивация которой при анодном травлении при-



Рис. 1. Структура поверхности пленки por-Si образцов № 1 (а) и № 2 (б)



Рис. 2. Профиль типичного фрагмента поверхности образца № 1 вдоль взаимно перпендикулярных направлений a (a) и b (b) на рис. 1, a



Рис. 3. Профиль типичного фрагмента поверхности образца № 2 вдоль взаимно перпендикулярных направлений a (a) и b (b) на рис. 1, b

водит к увеличению параметра решетки и возникновению напряжений несоответствия на границе *por*-Si/Si. Также следует принимать во внимание механические напряжения, возникающие между поверхностным и внутренним слоями *por*-Si [5]. Релаксация этих напряжений формирует характерный рельеф поверхностного слоя пленки *por*-Si (рис. 2).

Поверхность образца № 2 (см. рис. 1,  $\delta$ ) образована фрагментами со скругленными вершинами. Это хорошо заметно на рис. 3, где представлены профили типичного фрагмента поверхности образца № 2 в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Вид профилей свидетельствует о том, что поверхностный слой пленки *por*-Si, в отличие от слоя образца № 1, не подвержен значительным механическим напряжениям.

В результате обработки изображений, представленных на рис. 1, с помощью программы Ітаде Analysis P9 были определены значения средней шероховатости поверхности пленки *por*-Si. У образца № 1 указанная шероховатость равна 1021 нм, у образца № 2 — 700 нм. Соответственно, удельная площадь поверхности (отношение полной площади поверхности к площади проекции этой поверхности на горизонтальную плоскость) для образца № 1 составила 1,223, для образца № 2 — 1,301. Значение удельной площади поверхности рассчитывалось в программе Gwyddion (http://gwyddion.net) методом триангуляции.

Таким образом, пленки *por*-Si, сформированные при освещении кремниевой пластины в ходе электрохимического травления, имеют меньшую шероховатость и большую удельную площадь поверхности по сравнению с пленками, изготовленными в темноте.

### Обсуждение результатов эксперимента

Формирование морфологических особенностей поверхности пленок *por*-Si при освещении кремниевой пластины и в темноте в электролите  $HF + C_2H_5OH$  с добавкой водного раствора  $KMnO_4$  может быть связано с различной интен-

сивностью электрохимического травления. Добавление  $KMnO_4$  в электролит способствует более интенсивному окислению кремния, так как согласно [6] в кислотной среде перманганат-ион  $MnO_4^-$  является сильным окислителем. Под действием света  $KMnO_4$  превращается в диоксид марганца и интенсивность процесса окисления кремния снижается [6]. По-видимому высокая интенсивность процесса формирования пленки *por*-Si, имеющая место при отсутствии освещения поверх-

ности в электролите, содержащем КМпО<sub>4</sub>, способствует возникновению значительных механических напряжений, приводящих к деформации поверхности образца № 1. Снижение интенсивности электрохимического окисления при освещении кремниевой пластины способствует формированию пленки *por*-Si с малыми внутренними механическими напряжениями и более развитой поверхностью (образец № 2).

### Заключение

Таким образом, формируя пленки *por*-Si анодным электрохимическим травлением кремниевой пластины в электролите  $HF + C_2H_5OH$  с добавкой водного раствора  $KMnO_4$  при освещении или в темноте, можно менять морфологические особенности их поверхности. Это имеет важное прикладное значение. Пленки *por*-Si с более шероховатой поверхностью актуальны для применения в качестве антиотражающих слоев перспективных солнечных элементов и оптических датчиков. Пленки с более высокими значениями удельной площади поверхности (более развитой поверхностью) важны для создания химических датчиков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ: в части отработки технологических режимов травления кремниевой пластины и формирования экспериментальных структур — в рамках государственного задания по НИР "Исследование механизмов стабилизации оптических и электрофизических характеристик гетероструктур, содержащих пористые полупроводники", в части экспериментальных измерений методами атомно-силовой микроскопии — в рамках Соглашения № 14.BBB.21.0023 по теме "Разработка методов комплексной диагностики полупроводниковых материалов, микро- и наноструктур для солнечной энергетики". Исследования поверхности образцов выполнены на оборудовании Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета.

#### Список литературы

1. Белогорохов А. И., Белогорохова Л. И. Оптические свойства слоев пористого кремния, полученных с использованием электролита HCl:HF:C2H5OH // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33, № 2. С. 198-204

2. Шевченко О. Ю., Горячев Д. Н., Беляков Л. В. и др. Оптические свойства нанопористого кремния, пассивированного железом // Физика и техника полупроводников. 2010. T. 44, № 5. C. 669–673.

3. Трегулов В. В. Улучшение и стабилизация оптических характеристик пористого кремния // Научно-технические

ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 2 (170). С. 130-136.

4. Ратников В. В., Сорокин Л. М., Соколов В. И. и др. Рентгеновская дифрактометрия и электронная микроскопия слоев пористого Si на разных стадиях окисления на воз-

духе // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, № 12. С. 2289—2295. 5. Горячев Д. Н., Беляков Л. В., Сресели О. М. Формирование толстых слоев пористого кремния при недостаточной концентрации неосновных носителей // Физика и тех-ника полупроводников. 2004. Т. 38, № 6. С. 739—744.

6. Лидин Р. А., Молочко В. А., Андреева Л. Л. Химические свойства неорганических веществ. М.: КолосС, 2006. 480 с.

V. V. Tregulov, PhD in Tech., Associate Professor, Ryazan state university named for S. Yesenin, e-mail: trww@yandex.ru, V. V. Gudzey, Senior Lecturer, N. V. Vishnyakov, Associate Professor, Yu. V. Vorobjov, Post Graduate, N. M. Tolkach, Master Student,

Ryazan State Radioengineering University

### The Surface of Porous Silicon Films Formed by (HF + KMnO<sub>4</sub>) Electrolyte

In present paper we demonstrate results of the thick porous silicon films investigation by atomic force microscopy. The films was produced by anodizing silicon wafer in  $HF + C_2H_5OH$  electrolyte with addition of  $KMnO_4$ . It is shown that presence of illumination during forming a porous silicon film allows us to control morphological features of growing film.

Keywords: atomic force microscopy, porous silicon, surface, electrochemical etching, mechanical stress

#### References

1. Belogorokhov A. I., Belogorokhova L. I. Opticheskie svojjstva sloev poristogo kremnija, poluchennykh s isporzovaniem ehlektrolita HCl:HF:C2H5OH. Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1999. V. 33, N. 2. P. 198-204.

2. Shevchenko O. Ju., Gorjachev D. N., Beljakov L. V. et al. Opticheskie svojjstva nanoporistogo kremnija, passivirovannogo zhelezom. Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2010. V. 44, N. 5. P. 669-673.

3. Tregulov V. V. Uluchshenie i stabilizacija opticheskikh kharakteristik poristogo kremnija. Nauchno-tekhnicheskie

vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. 2013. N. 2 (170). P. 130-136.

4. Ratnikov V. V., Sorokin L. M., Sokolov V. I. et al. Rentgenovskaja difraktometrija i ehlektronnaja mikroskopija sloev poristogo Si na raznykh stadijakh okislenija na vozdukhe. Fizika tverdogo tela. 2009. V. 51, N. 12. P. 2289–2295.
5. Gorjachev D. N., Beljakov L. V., Sreseli O. M. Formi-

rovanie tolstykh sloev poristogo kremnija pri nedostatochnojj koncentracii neosnovnykh nositeleij. *Fizika i tekhnika polu-*provodnikov. 2004. V. 38, N. 6. P. 739–744. 6. Lidin R. A., Molochko V. A., Andreeva L. L. Khim-icheskie svojjstva neorganicheskikh veshhestv. M.: KolosS,

2006. 480 p.

### УДК 66.088::620.183.2

**Д. В. Вертянов**, вед. инженер, e-mail: evolutionden@mail.ru, **С. П. Тимошенков**, д-р техн. наук, проф., e-mail: spt@miee.ru, В. С. Петров, аспирант, инженер, e-mail: petrovvasiliy.s@yandex.ru, **Е.** П. Горюнова, аспирант, вед. инженер, e-mail: aviary@mail.ru,

Национальный исследовательский университет "МИЭТ"

### СВОЙСТВА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИИМИАНЫХ МИКРОСТРУКТУР

Поступила в редакцию 25.04.2014

Исследуются параметры травления полиимидной пленки в плазме различного газового состава как одного из ключевых процессов технологии изготовления микроэлектронных узлов на гибкопластичном носителе с применением беспаечного и бессварочного монтажа кристаллов. Получен оптимальный состав плазмы, режимы и технологические параметры травления для наиболее эффективного формирования микроструктур, углублений, сквозных отверстий, исключая боковое подтравливание материала.

Ключевые слова: микроструктуры, полиимидная пленка, плазменное травление, плазменный разряд, беспаечный и бессварочный монтаж

### Введение

В настоящее время в авиакосмическом приборостроении, в телекоммуникационной отрасли, в робототехнике все шире используются сверхбыст-

родействующие многоканальные бескорпусные микросхемы с расстоянием между контактными площадками (КП) 50 мкм и менее, что открывает возможность создания устройств с повышенной

функциональной емкостью. Как правило, к таким устройствам предъявляются жесткие требования по массогабаритным характеристикам, объему и возможности компоновки изделия в трех плоскостях в виде многослойных структур, модулей и 3D-сборок. Соответствие таким высоким требованиям возможно за счет применения новых конструктивно-технологических решений на основе технологии, которая является прогрессивным развитием технологии "кристалл на гибкой плате" или "chip on flex" (COF) [1, 2]. Это технология изготовления микроэлектронных узлов на гибкопластичном носителе с применением беспаечного и бессварочного монтажа кристаллов [3]. Монтаж осуществляется за счет выполнения трех основных оригинальных операций:

- установка кристаллов активной стороной вниз на фольгированный полиимид (ПИ) с помощью полиимидного лака;
- формирование отверстий через металлическую маску в полиимидной пленке до контактных площадок кристаллов и проводников верхнего и последующих слоев плазмохимическим способом;
- формирование коммутации методом магнетронного напыления структуры металлов.

В качестве гибкопластичного носителя в микроэлектронных узлах используется безадгезивный фольгированный ПИ, который стал практически незаменимым материалом для создания функционально сложных электронных изделий с высокими требованиями к радиационной стойкости, термостойкости, быстродействию и долговременной надежности. Технологическое преимущество таких материалов заключается в отсутствии адгезивных слоев между медью и ПИ, что улучшает качество обработки носителя в процессе производства.

В литературе имеются данные [4—7] о формировании регулярных поверхностных и пористых полиимидных микроструктур с использованием различных методов литографии и плазменного травления, в том числе наиболее эффективного для ПИ реактивного ионного травления (РИТ) в индуктивно связанной высокоплотной плазме. Однако отсутствуют сведения об операционных режимах глубокого плазменного травления, обеспечивающих необходимые значения технологических параметров процесса (скорость травления, селективность к маске, анизотропия травления) при формировании микроструктур (микроэлектронных узлов) на основе полиимидной пленки.

Таким образом, сочетание широких возможностей практического применения микроэлектронных узлов на основе безадгезивного фольгированного ПИ и необходимости разработки оптимальных режимов формирования межслойных соединений в ПИ обусловливает актуальность тематики данной работы.

### Экспериментальная часть

Для глубокого плазменного травления (ГПТ) полиимида использовалась установка MBУ TM РИТ 100, в которой реализован механизм РИТ. Конструкция реактора представляет собой двухэлектродную систему с ассиметричным возбуждением ВЧ разряда между электродом-подложкодержателем и корпусом реактора.

Поскольку свойства обработанных плазмой полиимидных материалов зависят не только от используемого типа плазменного разряда, параметров проведения процесса обработки, но и от химического состава и структуры исходных образцов, то для исследования процесса травления были выбраны полиимидные пленки двух марок со сформированной металлической маской (см. таблицу), представляющей собой регулярные структуры с линейными размерами от 40 до 150 мкм. Операционные параметры при проведении процесса ГПТ ПИ:

Расход элегаза (SF <sub>6</sub> ) <i>Q</i> <sub>SF6</sub>	01,1 л/ч;
Расход кислорода $Q_{O2}$	01,8 л/ч;
Процентное содержание элегаза в рабочей смеси O <sub>2</sub> + SF <sub>6</sub>	от 0 до 100 %;
ВЧ мощность, подводимая к столику-подложко- держателю $W_{\rm Tp}$	100300 Вт;
Рабочее давление Р	512 Па.

Для ускорения протекания химической реакции между рабочими газами и полиимидной пленкой в качестве газовой добавки использовали аргон.

Время травления было постоянным во всех экспериментах и составляло 30 мин.

Свойства двух типов фольгированных полиимидных пленок

Национарациа	Тип полиимидной пленки		
параметра	ПМ ТУ 6-19-121—85	DuPont, Pyralux AP8535	
Толщина пленки, мкм	25	76	
Отклонение от толщи- ны пленки, %	± 2	± 4	
Прочность при разрыве, МПа	Не менее 153	137	
Относительное удлине- ние при разрыве, %	Не менее 60	60	
Электрическая про- чность, кВ/мм	Не менее 169	Не менее 236	
Тип металлизации	Односторонний	Односторонний	
Материал металлизации	Хром + медь (напыленная)	Медь	
Толщина слоя металли- зации, мкм	1	18	

Профили и геометрические параметры формируемых в полиимидных пленках структур до и после плазменного травления исследовались с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV с приставкой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy X-MAX 20.

### Обсуждение и заключения

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при небольших расходах кислорода поток продуктов реакций с поверхности ПИ, содержащего кислород, превышал поток молекул O<sub>2</sub>, поступающий в плазменный разряд. При этом значения скорости травления полиимидной пленки лежали левее прямой *1* (рис. 1), соответствующей равенству потоков молекул кислорода и продуктов реакций, выделяющихся в плазму при травлении.

Установлено, что чем больше была энергия падающих ионов, тем более высоким был расход кислорода, с которого начиналось уменьшение скорости травления ПИ (кривая 2). Полученные результаты подтверждали выводы исследований [5, 8, 9], утверждающие, что при плазменном травлении ПИ основным реагентом являются молекулы, а не атомы кислорода. Выявлено, что при небольшой концентрации атомов кислорода невозможно обеспечить высокую скорость травления ПИ, а наблюдаемое увеличение скорости травления ПИ при низком содержании кислорода в плазме можно объяснить тем, что в реакции плазменного травления кроме молекул кислорода принимают участие и продукты травления, а именно радикалы ОН.

Ионно-стимулированный характер травления ПИ в плазме O<sub>2</sub> свидетельствует о том, что в такой







Рис. 2. Зависимость скорости  $V_{\rm TP}$  травления ПИ в плазме O<sub>2</sub>/Ar от концентрации Ar при разном напряжении самосмещения на ВЧ электроде:  $1 - U_{\rm CM} = -800$  B;  $2 - U_{\rm CM} = -400$  B

плазме можно реализовать их анизотропное травление. Так как коэффициент анизотропности травления увеличивается с увеличением энергии бомбардирующих ионов, то наличие в плазме атомов кислорода затрудняло реализацию процесса анизотропного травления, поскольку чистый  $O_2$  способствует изотропному травлению ПИ. Для уменьшения содержания атомов кислорода в плазме и увеличения плотности ионного потока в кислородную плазму добавляли инертный газ — аргон. С увеличением его концентрации в смеси скорость травления ПИ линейно уменьшалась при разных энергиях ионов (рис. 2).

Из приведенного рисунка следует, что отношение скоростей травления ПИ при интенсивной  $(U_{cM} = -400 \text{ и} - 800 \text{ B})$  плазме с большим содержанием Ar гораздо выше, чем в чистой кислородной плазме. Так, при 70 % содержании Ar в смеси для ПИ оно равняется ~2,6, в то время как плазме  $O_2/20$  % Ar отношение более чем в два раза меньше и составляет 1,2. Как показал дальнейший анализ, эти результаты свидетельствуют о том, что в плазме  $O_2/70$  % Ar можно реализовать анизотропное травление полиимидных пленок. Коэффициент анизотропности *A* травления ПИ определялся выражением

$$A = 1 - l_0 / h,$$
 (1)

где  $l_0$  — боковое подтравливание под маску; h — глубина травления.

Если  $v_{\rm r}$  — скорость травления ПИ в горизонтальном направлении и  $v_{\rm B}$  — скорость травления в вертикальном направлении, то коэффициент анизотропности

$$A = 1 - v_{\rm r} / v_{\rm B}$$



Рис. 3. Вид структур травления полиимидной пленки в плазме  $O_2/75$  % Ar при W = 300 BT: *a* — диаметр отверстия 100 мкм; *б* — диаметр отверстия 130 мкм

Из данной формулы следует, что чем выше скорость травления ПИ в вертикальном направлении, т. е. в направлении падающих ионов на поверхность, тем выше *А*. Поэтому коэффициент анизотропности травления полимерной пленки можно определить из зависимости скорости травления ПИ от энергии ионов.

Изотропная составляющая процесса травления, обусловленная скоростью реакции атомов кислорода с молекулами полимерной пленки, обычно в несколько раз меньше вследствие низкой концентрации атомов кислорода в реакторе (~0,3 %). Скорость изотропного или бокового травления полиимидной пленки определяется тепловой энергией ионов ( $kT_i \sim 0, 1...0, 5$  эВ, где  $T_i$  — температура ионов, к — постоянная Болцмана) и энергией отраженных от дна канавки ионов. Влиянием последних обусловлен, как правило, различный профиль боковых стенок канавок травления. Но при низкой энергии падающих ионов ( $E_i < 100$  эВ), когда боковые стенки вертикальны, влиянием отраженных ионов можно пренебречь. При энергии падающих ионов, равной ~100 эВ, влиянием тепловых ионов также можно пренебречь. Однако кроме тепловых ионов стенки бомбардируются также ионами, падающими на нее под скользящими углами. Именно этим обусловлено возникновение канавок вблизи стенок.

При травлении полиимидной пленки высокоанизотропное (A = 0,95) травление ПИ достигалось в смеси O<sub>2</sub>/60 % Ar при энергии ионов, равной ~170 эВ. Скорость травления при этом достигала 2 нм/с. При энергии ионов 50 эВ такое травление осуществлялось в смеси O<sub>2</sub>/75 % Ar, но скорость травления падала до ~0,5 нм/с. Для реализации анизотропного травления процесс проводили при низкой температуре держателя и обеспечении хорошего теплового его контакта с образцом, так как изотропное травление ПИ атомами кислорода увеличивалось с увеличением температуры подложки. Профили отверстий после плазменного травления ПИ, полученные с помощью метода растровой электронной спектроскопии, показывают, что в плазме  $O_2/75$  % Аг при энергии ионов около 50 эВ наблюдаются вертикальные стенки отверстий (рис. 3).

Необходимо отметить, что при травлении ПИ в условиях увеличения "эффекта загрузки" степень анизотропности травления уменьшалась. Это объясняется возрастанием в объеме реактора концентрации радикалов ОН и атомов

кислорода, выделяющихся в процессе РИТ, которые способствуют боковому подтравливанию.

Получены зависимости скорости травления ПИ  $V_{\rm Tp}$  от ВЧ-мощности  $W_{\rm Tp}$  в смеси O<sub>2</sub>/7 % SF<sub>6</sub> при рабочем давлении P = 8 Па и суммарном расходе смеси Q = 0.8 л/ч (рис. 4).

Выявлено, что при изменении ВЧ мощности от 100 до 300 Вт скорость травления ПИ линейно возрастает примерно до 0,35 мкм/мин. Это объясняется тем, что при увеличении мощности, подводимой к плазменному разряду, происходит рост энергии свободных электронов плазмы. Последние, сталкиваясь с атомами и молекулами рабочего газа, с большей вероятностью осуществляют процессы ионизации и диссоциации, увеличивая тем самым число ионов и химически активных частиц, т. е. плотность травящих частиц. В результате этого возрастает скорость травления полиимидной пленки.



Рис. 4. Зависимость скорости  $V_{\rm rp}$  травления ПИ от ВЧ мощности W: рабочее давление P=8 Па; расход смеси Q=0,8 л/ч; содержание элегаза в смеси 7 %



Рис. 5. Зависимость скорости  $V_{\rm Tp}$  травления ПИ от процентного содержания гексафторида серы в рабочей смеси (O<sub>2</sub> + SF<sub>6</sub>): 1 - W = 300 Вт; P = 12 Па; Q = 1,4 л/ч; марка ПИ ПМ ТУ 6-19-121-85; 2 - W = 200 Вт; P = 8 Па; Q = 0,8 л/ч; марка ПИ DuPont, Pyralux AP8535

Известно, что для повышения скорости травления ПИ используют смеси кислорода с фторсодержащими газами [7]. Такой рост связан с увеличением скорости образования атомов кислорода из-за изменений электрофизических параметров плазмы и, в первую очередь, функции распределения электронов по энергиям. Кроме того, при РИТ ПИ радикалы фтора участвуют в химических реакциях, образуя стабильные летучие фтороуглеродсодержащие соединения и фтороводород, что также способствует увеличению скорости плазменного травления ПИ. Зависимость скорости травления ПИ от процентного содержания гексафторида серы в рабочей смеси  $O_2 + SF_6$  представлена на рис. 5.

Установлено, что при низких значениях процентного содержания SF<sub>6</sub> в рабочей смеси скорости травления ПИ небольшие и составляют ~0,1...0,15 мкм/мин, поскольку в рабочем объеме недостаточно концентрации радикалов фтора и, соответственно, плотности химически активных частиц. При увеличении концентрации SF<sub>6</sub> в смеси O<sub>2</sub> + SF<sub>6</sub> до 20 % скорость ГПТ ПИ линейно возрастает до ~0,6...0,8 л/ч в зависимости от рабочего давления, суммарного расхода рабочей смеси и ВЧ мощности. Однако при дальнейшем увеличении процентного содержания элегаза в смеси до 40 % скорость травления ПИ начинает падать и составляет порядка 0,45 мкм/мин для ПИ марки DuPont Pyralux AP8535, что связано с уменьшением концентрации основных травящих частиц молекул кислорода — в  $O_2 + SF_6$ . Кроме того, если проанализировать полученные значения скоростей травления для полиимидов ПМ ТУ 6-19-121-85 и Pyralux AP8535 с учетом зависимостей на рис. 4 и 5, то можно сделать вывод, что скорости травления ПИ данных марок приблизительно одинаковы.

В ходе экспериментов при проведении глубокого травления полиимидных структур было установлено, что элементы с различными линейными размерами травятся по-разному. При этом структуры с меньшими размерами травились медленнее. Этот эффект связан с механизмом "задержки РИТ", который возникает вследствие:

- ионного затенения, делающего поступающие ионы изотропными в результате рассеивания и зарядового обмена в области пространственного заряда. Снижение рабочего давления снижает вероятность столкновений, позволяя большему числу входящих ионов достигать нижней поверхности структуры;
- столкновения как с другими частицами, так и с боковыми стенками структуры замедляет поток химически активных нейтралов (например, F) внутрь структуры. Доступ нейтральных частиц к нижней части структуры, необходимый для удаления полимера и формирования летучих продуктов травления, затрудняется;
- транспортировки нейтральных продуктов травления. Обратный поток продуктов химической реакции со дна структуры может сталкиваться с входящими частицами или переосаждаться на дне структуры, значительно увеличивая высадку полимера.

### Заключение

В работе были исследованы ионно-инициированные процессы травления полимерных пленок на основе ПИ в кислородсодержащей плазме, в элегазе и в кислородно-аргоновых смесях низкого давления (~10...12 Па). При РИТ полиимидных пленок различного состава (Pyralux AP8535 фирмы DuPont и ПМ ТУ 6-19-121-85 фирмы НТЦ "ЭЛИФОРМ") каких-либо отличий в достигнутых значениях технологических параметров процесса травления не установлено.

В результате исследований были установлены операционные режимы глубокого плазмохимического травления ПИ на МВУ ТМ РИТ 100 и определены оптимальные значения основных технологических параметров: скорость травления — 0,8 мкм/мин; равномерность травления на образцах — не менее 92 %; коэффициент анизотропии — 0,95.

Полученные результаты работы имеют практическую значимость при разработке плазменных процессов травления полиимидных пленок в технологии изготовления микроэлектронных узлов на гибкопластичном носителе различного назначения.

#### Список литературы

1. Vertyanov D. V., Tikhonov K. S., Timoshenkov S. P., Petrov V. S. Peculiarities of multichip micro module frameless design with ball contacts on the flexible board // IEEE 33 International Conference ELECTRONICS AND NANOTECH-NOLOGY (ELNANO–2013). Kyiv. Ukraine. 15–18 April, 2013. P. 417–419.

2. Vertyanov D. V., Tikhonov K. S., Timoshenkov S. P., Petrov V. S., Blinov G. A. 3D multichip memory modules based on flexible board with ball leads // Proc. Second Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials. Vladivostok, Russia, 20–27 August, 2013. P. 253–254.

3. Вертянов Д. В., Петров В. С., Константинов П. Н. Сравнительный анализ двух технологий монтажа бескорпусных кристаллов на гибкую подложку многокристального модуля // Тез. докл. 20-й Всероссийской межвузовской научно-техн. конф. студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика—2013". Москва, Зеленоград. 2013. С. 83.

4. Голишников А. А., Путря М. Г. Применение реакторов высокоплотной плазмы в технологии СБИС // Шестая международная научно-техн. конф. "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники. Геленджик. Сентябрь, 1999. С. 11.

5. Амиров И. И. Плазменные процессы формирования высокоаспектных структур для микро-наномеханических устройств // Автореф. док. дисс. Москва. 2010.

6. Гринькин Е. А., Жуков А. А., Шаповал С. Ю., Бабаевский П. Г. Адгезионное взаимодействие твердых поверхностей и создание полимерных "сухих" адгезивов. Практические аспекты // Нано- и микросистемная техника. № 9. 2006. С. 13—20.

7. **Mimoun B.** et al. Residue-free plasma etching of polyimide coatings for small pitch vias with improved step coverage // J. Vac. Sci. Technol. B 31(2). Mar/Apr. 2013. P. 021201–021201-6.

8. Амиров И. И., Изюмов М. О. Ионно-инициированное травление полимерных пленок в кислородсодержащей плазме высокочастотного индукционного разряда // Химия высоких энергий. 1999. Т. 33. № 2. С. 147—151.

9. Жукова С. А., Жуков А. А., Четверов Ю. С. Особенности плазмохимического травления полимерных слоев в микро- и наноразмерных зазорах // Матер. IV Междунар. симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново. 13—18 Май, 2005. С. 184—187.

D. V. Vertyanov, Leading Engineer, e-mail: evolutionden@mail.ru,

S. P. Timoshenkov, Professor, e-mail: spt@miee.ru,

V. S. Petrov, Engineer, e-mail: petrovvasiliy.s@yandex.ry,

E. P. Goryunova, Leading Engineer, e-mail: aviary@mail.ru,

National Research University of Electronic Technology

### Properties and Practical Application of Polyimide Microstructures

Investigated the parameters of etching polyimide film in different plasma gas composition, as one of the key processes of technology of microelectronic assembly unit on flexible-plastic carrier using assembly of crystals without weld and without solder. Received optimal composition of the plasma, modes and technological parameters of etching for the most effective formation of microstructures, recesses, through holes, except the lateral etching.

Keywords: microstructures, polyimide film, plasma etching, plasma discharge, assembly without weld and without solder

#### References

1. Vertyanov D. V., Tikhonov K. S., Timoshenkov S. P., Petrov V. S. Peculiarities of multichip micro module frameless design with ball contacts on the flexible board. *IEEE 33 International Conference ELECTRONICS AND NANOTECH-NOLOGY (ELNANO–2013)*. Kyiv. Ukraine. 15–18 April, 2013. P. 417–419.

2. Vertyanov D. V., Tikhonov K. S., Timoshenkov S. P., Petrov V. S., Blinov G. A. 3D multichip memory modules based on flexible board with ball leads. *Proc. Second Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials.* Vladivostok, Russia, 20–27 August, 2013. P. 253–254.

3. Vertyanov D. V., Petrov V. S., Konstantinov P. N. Sravnitel'nyy analiz dvukh tekhnologiy montazha beskorpusnykh kristallov na gibkuyu podlozhku mnogokristal'nogo modulya. *Tez. dokl. 20-y Vserossiyskaya mezhvuzovskaya nauchno-tekhn. konf. studentov i aspirantov "Mikroelektronika i informatika — 2013".* Moscow, Zelenograd. P. 83.

4. Golishnikov A. A., Putrya M. G. Primenenie reaktorov vysokoplotnoy plazmy v tekhnologii SBI. *Shestaya mezhd-unarodnaya nauchno-tekhn. konf. "Aktual'nye problemy tverdo-tel'noy elektroniki i mikroelektroniki"*. Gelendzhik. Sept 1999. P. 11.

5. Amirov I. I. Plazmennye protsessy formirovaniya vysokoaspektnykh struktur dlya mikro-nanomekhanicheskikh ustroystv (Plasma processes of formation of high aspect structures for micro-nanomechanical devices), Avtoref. dok. diss. Moscow, 2010.

6. Grin'kin E. A., Zhukov A. A., Shapoval S. Yu., Babaevskiy P. G. Adgezionnoe vzaimodeystvie tverdykh poverkhnostey i sozdanie polimernykh "sukhikh" adgezivov. Prakticheskie aspect. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2006. N. 9. P. 13–20.

7. **Mimoun B.** et al. Residue-free plasma etching of polyimide coatings for small pitch vias with improved step coverage. *J. Vac. Sci. Technol. B 31 (2).* Mar/Apr 2013. P. 021201–021201-6.

8. **Amirov I. I., Izyumov M. O.** Ionno-initsiirovannoe travlenie polimernykh plenok v kislorodsoderzhashchey plazme vysoko-chastotnogo induktsionnogo razryada. *Khimiya vysokikh energiy.* 1999. T. 33, N. 2. P. 147–151.

9. Zhukova S. A., Zhukov A. A., Chetverov Yu. S. Osobennosti plazmokhimicheskogo travleniya polimernykh sloev v mikro- i nanorazmernykh zazorakh. *Mat. IV Mezhdunarodnogo simpoziuma po teoreticheskoy i prikladnoy plazmokhimii.* Ivanovo. 13–18 May, 2005. P. 184–187.

# Элементы MHCT *M*icro-AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 658.274

**С. П. Тимошенков**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., зав. каф., **А. А. Шерченков**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., **А. А. Нальский**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., **А. А. Ревина**<sup>2</sup>, д-р хим. наук, проф., **Р. Е. Лобус**<sup>1</sup>, инженер, e-mail: lobus\_ruslan@mail.ru

1 Национальный исследовательский университет "МИЭТ", г. Зеленоград

<sup>2</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, г. Москва

### ИСТОЧНИК ТОКА НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ С ПОВЫШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

### Поступила в редакцию 30.04.2014

Рассматривается физический источник тока на фотоэлектрическом эффекте, предназначенный для прямого преобразования световой энергии в электроэнергию с повышенными показателями эффективности, на основе модифицированных кремниевых элементов. За базовые технические характеристики для оценки эффективности разработанного образца принят КПД кремниевого фотопреобразователя 10 %. Приводится обоснование выбранных материалов и конструкции, а также описываются основные этапы технологии изготовления и нанообработки солнечной батареи (СБ).

**Ключевые слова:** фотоэлектрический эффект; фотоэлектрический преобразователь (ФЭП); солнечная батарея (СБ); фотоэлектрический элемент; монокристаллический кремний; p-n переход; наночастицы металлов

### Введение

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе *c*-Si в настоящее время являются лидерами по показателю КПД среди некаскадных ФЭП. КПД серийно выпускаемых образцов ФЭП составляет в среднем от 12 до 18 %. Рекорд для коммерческих элементов принадлежит компании *SunPower* (США, www.sunpowercorp.com). Ее солнечные элементы, согласно измерениям *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, США), имеют КПД 24,2 %. Максимальный КПД, достигнутый в лабораторных условиях с использованием концентратора, находится на уровне 27 %.

Мировыми лидерами как по объему установленных мощностей, так и по реальному производству солнечных батарей (СБ) являются компании *First Solar* (США), *Suntech Power* (Китай) и *Sharp* (Япония). На их долю приходится около 25 % мирового рынка. В общем объеме мирового рынка СБ доля России составляет около 0,1 %. Большинство российских компаний (в том числе ОАО "ПОЗИТ", ООО "Солнечный ветер", ОАО "ПХМЗ", ООО "Солтек", ЗАО "Телеком-СТВ", НПП "Квант", ВИЭСХ) в своей деятельности ориентированы на экспорт ФЭП и СБ. Доля потребления их продукции в России не превышает 5...10 % от выпуска.

Таким образом, анализ параметров серийных СБ приводит к выводу, что  $\Phi$ ЭП с КПД, равным 12 % и выше, является востребованным на отечественном рынке источников электроэнергии, получаемой от солнечного света [1].

Цель работы — создание оптимальной конструкции и технологии изготовления физического источника тока на фотоэлектрическом эффекте с повышенными показателями эффективности на основе модифицированных кремниевых элементов.

### Постановка задачи

Существует ряд конструкционных методов повышения эффективности ФЭП.

1. Использование концентраторов солнечного света, что дает повышение КПД каскадных ФЭП.

2. Использование систем слежения за Солнцем, представляющих собой сложную конструкцию, которая обеспечивает поворот СБ под оптимальным углом по отношению к текущему положению Солнца.

3. Создание ФЭП с двусторонней чувствительностью способно увеличить КПД в среднем на



Рис. 1. Схема стандартного  $\Phi$ ЭП на основе пластины монокристаллического кремния с *p*-*n*-переходом (*a*) и  $\Phi$ ЭП с нанесенными наночастицами металла ( $\delta$ ) (А. А. Ревина)

10...20 % по сравнению с односторонней ФЭП. Они позволяют преобразовывать не только энергию падающих, но и энергию отраженных от поверхности Земли лучей (или от отражающей поверхности, располагающейся снизу по отношению к панелям). Такой подход эффективен для СБ, используемых в авиакосмической отрасли.

4. Раздельное преобразование нескольких участков спектра. Метод заключается в предварительном разложении солнечного спектра на несколько спектральных областей и последующем преобразовании каждого участка спектра отдельным ФЭП.

Перечисленные методы заметно усложняют технологию производства и/или использования СБ.

Одним из перспективных методов повышения КПД ФЭП на основе пластин *c*-Si является модифицирование поверхности стандартного ФЭП путем нанесения на нее фотоактивного слоя или наночастиц (НЧ) металла (рис. 1).

Наночастицы металлов поглощают свет в полосе локального плазмонного резонанса. При этом вблизи наночастицы на расстоянии, не превышающем ее размер, значительно возрастает электромагнитное поле, что приводит к повышению поглощения света и в материале, окружающем наночастицы [1—3].

### Эксперимент

В работе было исследовано влияние наночастиц Ag, Pt, Ru, Pd на фотовольтаические характеристики солнечного элемента при нанесении наночастиц на освещаемую поверхность пластин кристаллического кремния.

Один из перспективных методов получения, стабилизации и целенаправленного регулирования размеров наночастиц в процессе синтеза связан с использованием в качестве микрореактора обратных мицелл [4—6]. Размер водного пула в зависимости от условий получения обратномицеллярной системы и природы стабилизатора, в качестве которого используют различные поверхностно-активные вещества (ПАВ), может меняться в широких пределах (от нескольких десятков нанометров до сотен нанометров). Микрокаплю в данном случае можно рассматривать как микрореактор, в котором образуется новая фаза. Этот метод успешно применяется для синтеза различных наночастиц металлов и их сплавов как сферической, так и несферической формы [4]. Образование наночастиц может происходить в результате химического, радиационно-химического или фотохимического восстановления ионов соответствующих металлов [5].

Были проведены исследования физико-химических свойств наночастиц: Zn, Fe, Ag, Pt, Ru, Pd, синтезированных методом "молекулярной сборки" в обратных мицеллах на основе реакций радиационно-химического восстановления ионов  $Me^{n+}$  и последующего формирования наноразмерных структур в обратных мицеллах. Схема обратной мицеллы приведена на рис. 2. Измерения спектров оптического поглощения и люминесценции проводили с помощью UV-VIS спектрофотометра Hitachi U-3010 и спектрофлюориметра Hitachi F-7000.

Раствором сравнения был раствор 0,15 М бис (2-этилгексил) сульфосукцината натрия (AOT) в изооктане. Атомно-силовой микроскоп EnviroScope (*Veeco Instruments*) применяли для определения размеров и формы наночастиц  $Me^{n+}$ . На рис. 3 (см. третью сторону обложки) представлены спектры оптического поглощения исследуемых металлов, характерные полосы которых лежат в области 200...600 нм. В случае наночастиц Pt интенсивная полоса поглощения прослеживается в области длин



Рис. 2. Схема обратной мицеллы: параметр  $\omega$ , определяющий соотношение ядро/оболочка (H<sub>2</sub>O/AOT);  $r_{w.p.} = 10...40$  нм — радиус водного пула;  $r_m = 15...60$  нм — радиус мицеллы; n-C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> — изооктан (А. А. Ревина)

волн короче 500 нм (рис. 4, см. третью сторону обложки).

Для первого варианта эксперимента на *с*-Si ФЭП покрытие ZnS с пластин кремния было смыто 10 %-ным раствором соляной кислоты. Радиационно-химический синтез обратномицеллярных наночастиц серебра был проведен следующим образом. В ячейку вместе с реагентами были помещены пластины кремния обоих типов (недопированный *п*-кремний и *p*-допированный кремний со смытым покрытием ZnS). При этом согласно косвенным данным происходит абсорбция наночастиц в объем кремниевой пластины. Поскольку образцы, изготовленные описанным выше способом, имели на поверхности раствор АОТ с обратными мицеллами серебра в изооктане, часть образцов отмывали под струей дистиллированной воды и сушили на воздухе при комнатной температуре.

Во втором варианте эксперимента наночастицы металла наносили поверх слоя ZnS с образованием структуры, показанной на рис. 1,  $\delta$ .

### Результаты и обсуждение

Испытания полученных образцов проводили на специализированном стенде для измерений вольтамперных характеристик (ВАХ) ФЭП с использованием имитатора солнечного излучения. Измерения ВАХ выполняли, подавая к выходным контактам напряжение и регистрируя ток с помощью блока источник-измеритель Keithley 2400, соединенного с компьютером.

На рис. 5 показан эквивалентный электрический контур для ФЭП. Фототок изображен генератором тока  $I_{\phi}$ , который действует противоположно току, текущему через диод под действием прямого смещения  $I_{\text{темн}}$ . Шунтирующее сопротивление  $R_{\text{ш}}$  обусловлено поверхностными утечками, диффузионными потерями на контакте. Включенное последовательно сопротивление  $R_{\text{посл}}$  соответствует сопротивлению контакта, объемному сопротивлению нейтральной области полупроводника, сопротивлению тонких электродов. Соотношение между выходным напряжением  $U_{\text{вых}}$  и выходным током  $I_{\text{вых}}$  имеет вид:

$$I_{\text{Bbix}}[1 + (R_{\text{посл}}/R_{\text{III}})] = I_{\phi} - (U_{\text{Bbix}}/R_{\text{III}}) - I_{\text{темн}}.$$

Параметры, характеризующие ФЭП, определяли из ВАХ, представленной на рис. 6 (см. третью сторону обложки). На кривой фототока при нулевом значении приложенного напряжения определяли плотность тока короткого замыкания  $J_{\rm K3}$ (A/M<sup>2</sup>). Напряжение, которое нужно приложить, чтобы скомпенсировать ЭДС ячейки (т. е. привести ток к нулю), называется напряжением открытой цепи (холостого хода)  $U_{\rm out}$  (В). При освещении ФЭП световой мощностью P (Вт/м<sup>2</sup>) ВАХ проле-



Рис. 5. Эквивалентныи электрическии контур для ФЭП (А. А. Ревина)

гает через IV квадрант, что означает выделение полезной мощности из устройства. На этом участке ВАХ имеется рабочая точка, в которой произведение  $J \cdot U$  максимально по абсолютной величине. Эта точка ( $U_{\rm MT}$ ,  $J_{\rm MT}$ ) называется точкой максимальной мощности и определяет КПД ФЭП согласно формуле

КПД (%) = 
$$J_{\rm K3} \cdot U_{\rm OII} \cdot FF \cdot 100/P$$
, (\*)

где  $FF = (J_{\rm MT} \cdot U_{\rm MT})/(J_{\rm K3} \cdot U_{\rm OII})$  — фактор заполнения. Графически фактор *FF* представляется как отношение площади прямоугольника со сторонами  $J_{\rm MT}$  и  $U_{\rm MT}$  к площади прямоугольника со сторонами  $J_{\rm K3}$  и  $U_{\rm OII}$  (рис. 6).

В табл. 1 приведены фотоэлектрические характеристики образцов ФЭП с абсорбированными в процессе радиационно-химического синтеза наночастицами серебра.

Как видно из табл. 1, абсорбция серебра в образцах увеличивает ток короткого замыкания. Видно также, что, чем выше концентрация наночастиц серебра (параметр  $\omega$ ), тем выше и фототок короткого замыкания образцов *p*-допированного кремния. Тем не менее характеристики образца без серебра, но покрытого слоем ZnS, выше.

Как видно из табл. 2, *адсорбция* наночастиц Ag, Pd, Pt и Ru также повышает фототок в образцах кремния с *p-n*-переходом. Но эти значения тоже ниже, чем на образцах ФЭП, покрытых слоем ZnS.

Фототок короткого замыкания на образцах  $\Phi \Im \Pi$ , полученных во втором варианте экспери-

	Таблица 1	L
Влияние наночастиц серебра на фотоэлектрич	еские	
характеристики образцов ФЭП на основе кре	мния	
с <i>p</i> — <i>n</i> -переходом; $P = 100 \text{ Bt/m}^2$		

Образец ФЭП	$J_{\rm K3},{\rm A/m}^2$	<i>U</i> <sub>оц</sub> , В
Si/Ag ( $\omega = 1,5$ )	147	0,52
Si/Ag ( $\omega = 5$ )	153	0,52
Si/Ag ( $\omega = 8$ )	166	0,52
Si/ZnS	183	0,56
Si	130	0,52

Таблица 2 Фотовольтаические характеристики образцов p—n-кремния с адсорбированными наночастицами металла; P = 100 Вт/м<sup>2</sup>

Образец ФЭП	$J_{\rm K3},{\rm A/m}^2$	<i>U</i> <sub>оц</sub> , В	КПД, %
Si	144	0,52	9,3
Si/Ag ( $\omega = 8$ )	150	0,52	9,5
Si/Pd ( $\omega = 3$ )	161	0,54	10
Si/Pt ( $\omega = 5$ )	167	0,54	10,3
Si/Ru	161	0,54	10

Таблица 3

Влияние наночастиц металлов на фотовольтаические характеристики в образцах пластин, покрытых слоем ZnS;  $P = 100 \text{ Br/m}^2$ 

Образец ФЭП	$J_{\rm K30},  {\rm A/m^2}$	$J_{\rm K3},{\rm A/m^2}$	<i>U</i> <sub>оц</sub> , В	КПД, %
$Si/ZnS/Pd (\omega = 1,5)$	179	187	0,54	11,4
$Si/ZnS/Pd (\omega = 5)$	175	183	0,54	11,3
$Si/ZnS/Pd (\omega = 3)$	167	187	0,54	11,4
$Si/ZnS/Pt (\omega = 5)$	179	194	0,54	12,0
$Si/ZnS/Pt (\omega = 3)$	179	191	0,54	11,8

мента, измеряли до  $(J_{K30})$  и после  $(J_{K3})$  нанесения наночастиц. Полученные результаты, приведенные в табл. 3, показывают, что из всех изученных наночастиц металлов (Ag, Pd, Pt, Ru) адсорбция наночастиц Pd или Pt повышает фототок короткого замыкания кремниевых образцов, покрытых слоем ZnS. Максимальные значения фототока обеспечивались модификацией поверхности наночастицами платины.

### Заключение

Предложен метод повышения КПД стандартных солнечных батарей на основе пластин из монокристаллического кремния и разработана технология изготовления СБ с КПД = 12 %, рассчитанному по формуле (\*). Мощность в номинальном режиме составила 50 Вт. Разработанная СБ по своим характеристикам превосходит имеющиеся отечественные серийные аналоги. Лучший из аналогов СБ производства ОАО "ПОЗИТ" имеет КПД, равный 10 %. Такое преимущество разрабатываемой СБ достигнуто в результате нанесения на освещаемую поверхность пластины фотопреобразователя наночастиц платины.

#### Список литературы

1. Schaadt D. M., Feng B., Yu E. T. Enhanced semiconductor optical absorption via surface plasmon excitation in metal nanoparticles // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 063106.

2. Catchpole K. R., Polman A. Design principles for particle plasmon enhanced solar cells // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 191113.

3. Catchpole K. R., Polman A. Plasmonic solar cells // Opt. Express. 2008. V. 16, Is. 26. P. 21793–21800.

4. Bekasova O. D., Revina A. A., Rusanov A. L. et al. Effect of gamma-ray irradiation on the size and properties of CdS quantum dots in reverse micelles // Radiation Physics and Chemistry. 2013. V. 92. P. 87–92.

5. Revina A. A., Kuznetsov M. A., Chekmarev A. M. Physicochemical properties of rhenium nanoparticles obtained in reverse micelles // Doklady Chemistry. Springer. May 2013. V. 450, part 1. P. 119–121.

6. **Яштулов Н. А., Большакова А. Н., Флид В. Р.** и др. Металлополимерные электрокатализаторы на основе наночастиц палладия // Вестник МИТХТ. 2011. Т. 6, № 4.

S. P. Timoshenkov<sup>1</sup>, Professor, Head of the Chair, A. A. Sherchenkov<sup>1</sup>, Professor, A. A. Nalsky<sup>1</sup>, Professor,

A. A. Revina<sup>2</sup>, Professor, R. E. Lobus<sup>1</sup>, Engineer,

<sup>1</sup> National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, e-mail: lobus\_ruslan@mail.ru

<sup>2</sup> Russian academy of sciences A. N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS (IPCE RAS)

### **Current Source Based on Photoelectric Effect with Enhanced Efficiency**

The development of the physical current source with enhanced efficiency based on photoelectric effect is discusses in this article. This source intended for direct conversion of light energy into electricity by modified silicon elements. The 10 % efficiency of the silicon solar cell was accepted as basic specifications to assess the efficiency of the developed model. The rationale for the selected materials and structures as well as description of the main stages of manufacturing technology and processing of solar cells (SC) were made.

**Keywords:** photoelectric effect; photoelectric cell (PEC); solar cell (SC); photoelectric element; p-n junction; single-crystal silicon; metal nanoparticles

### References

1. Schaadt D. M., Feng B., Yu E. T. Enhanced semiconductor optical absorption via surface plasmon excitation in metal nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86. P. 063106.

2. Catchpole K. R., Polman A. Design principles for particle plasmon enhanced solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93. P. 191113.

3. Catchpole K. R., Polman A. Plasmonic solar cells. *Opt. Express.* 2008. V. 16, Is. 26. P. 21793–21800.

4. Bekasova O. D., Revina A. A., Rusanov A. L. et al. Effect of gamma-ray irradiation on the size and properties of CdS quantum dots in reverse micelles. *Radiation Physics and Chemistry*. 2013. V. 92. P. 87–92.

5. **Revina A. A., Kuznetsov M. A., Chekmarev A. M.** Physicochemical properties of rhenium nanoparticles obtained in reverse micelles. *Doklady Chemistry*. Springer. May 2013. V. 450, part 1. P. 119–121.

6. Yashtulov N. A., Bolshakova A. N., Flid V. R. et al. Metal-electrocatalysts based on palladium nanoparticles. *Vestnik MITXT*. 2011. V. 6. N. 4.

**Ю. А. Новиков**, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., e-mail: nya@kapella.gpi.ru Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва

### ВИРТУАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Поступила в редакцию 20.05.2014

Приведены определение виртуальных измерительных приборов и описание их работы в процессе измерения характеристик исследуемых объектов. Рассмотрены цели и задачи, которые стоят перед виртуальными измерительными приборами при доказательстве правильности решения некорректных обратных задач.

**Ключевые слова:** измерительный прибор, виртуальный измерительный прибор, виртуальный тест-объект, моделирование, имитация, симуляция

### Введение

Измерения являются основой науки, техники и технологии, поэтому все новейшие достижения науки и техники применяют для создания измерительных приборов. В последнее время в процессы измерений внедряются компьютерные технологии. Практически все современные измерительные приборы работают под управлением компьютеров. Однако компьютеры можно использовать и в другом качестве.

Настоящая работа посвящена новому направлению в современной науке и технике — виртуальным измерительным приборам. Это направление возникло более 20 лет назад и в последние годы бурно развивается. Однако до сих пор в научной литературе отсутствует последовательное описание этого направления, целей и задач, которые стоят перед виртуальными измерительными приборами, методов их создания, самих виртуальных измерительных приборов, их свойств и применения в научной и технической деятельности человека. Данная работа является попыткой устранения этого пробела.

### Основная задача измерительного процесса

В науке и технике осуществляются измерения четырех характеристик исследуемых объектов. К таким характеристикам относятся: геометрия (координата точки измерения, форма и рельеф измеряемого объекта, размеры элементов, из которых состоит объект), состав объекта, его структура и

свойства. Измерения всех этих характеристик осуществляется по одной общей схеме (рис. 1).

Реальный измерительный прибор осуществляет измерения характеристик измеряемого объекта. На выходе измерительного прибора получается измерительная информация, в которой содержатся параметры измеряемых характеристик объекта. Однако для получения этих параметров необходимо решение обратной задачи по данным измерительной информации надо определить параметры измеряемых характеристик. Решение обратной задачи позволяет создать модель измеряемого объекта с измеренными характеристиками. Именно создание модели измеряемого объекта является окончанием измерения.

Главным недостатком такой схемы является то, что решение обратной задачи в большинстве случаев представляет собой некорректную задачу. То есть небольшие изменения во входной информации (в нашем случае — измерительной информации) может привести к большим погрешностям в конечном результате (параметрах измеряемых характеристик). Некорректность решаемой обратной задачи не позволяет убедительно доказать, что полученный при решении этой задачи результат правильно воспроизводит характеристики исследуемого объекта.

Для обычных измерений существуют альтернативные источники информации, которые могут давать дополнительную информацию о характеристиках измеряемого объекта и, тем самым, обосновывать правильность решения обратной задачи. Однако это не всегда можно осуществить. Так, в нанотехнологии альтернативных источников информации практически нет, поскольку характеристики объекта измерений зависят от его размеров и формы, которые у других объектов отличаются. Кроме того, дополнительная информация, полу-



Рис. 1. Общая схема измерения характеристик измеряемого объекта

ченная на других приборах, обычно сама является решением некорректной задачи.

В связи с этим необходимо иметь источники дополнительной информации, которые обеспечат убедительное доказательство правильности решения измерительной задачи — определения характеристик измеряемых объектов. Такими источниками могут быть виртуальные измерительные приборы.

### Методы решения некорректных задач

В настоящее время для решения некорректных задач используют три метода:

- поиск диапазона корректности;
- коррекция решения задачи в процессе самого решения;
- использование виртуальных измерительных приборов.

Рассмотрим эти методы более подробно.

Поиск диапазона корректности. В ряде случаев у некорректной задачи при изменении параметров этой задачи наблюдаются области корректности. Приведем в качестве примера анализ экспериментов на растровых электронных микроскопах (РЭМ).

В работах [1, 2] приведена модель формирования изображения в РЭМ. В этой модели было показано, что при сканировании в РЭМ выступов (рис. 2, *a*) с трапециевидным профилем и большими углами ф наклона боковых стенок [3] электронным зондом с квадратным сечением и равномерной плотностью распределения электронов при выполнении условий

$$d \ll s, \, u, \, b, \tag{1}$$



Рис. 2. Схемы выступа (*a*) с трапециевидным профилем и большими углами  $\varphi$  наклона боковых стенок и сигнала (*б*), получаемого в режиме сбора ВМЭ при сканировании этого выступа на высоковольтном РЭМ. Параметры сигнала и их связь с параметрами выступа показаны штриховыми линиями



Рис. 3. Формы реальных ВМЭ сигналов, полученных в РЭМ при сканировании выступов с большими (a) и малыми (b) углами  $\phi$  наклона боковых стенок; E — энергия электронов зонда, при которой получен соответствующий сигнал

где d — поперечный размер зонда [4], в РЭМ образуется сигнал вторичных медленных электронов (ВМЭ), схема которого представлена на рис. 2,  $\delta$ . Связь граничных точек выступа (см. рис. 2, a) с контрольными точками сигнала (точки 1-4 на рис. 2,  $\delta$ ) показана на рис. 2 штриховыми линиями. В этом случае размеры элементов выступа и поперечный размер зонда можно определить из выражений

$$u = mU, \quad b = mB, \quad s = mS, \quad d = mD, \tag{2}$$

где m — размер пикселя [5] на изображении (определяется при калибровке РЭМ), а параметры выступа (обозначены строчными буквами) и сигнала (прописные буквы) определены на рис. 2.

Использование выражений (2) для определения размеров выступа делает обратную задачу корректной. Поэтому, если экспериментальные сигналы подобны модельному сигналу на рис. 2, *б*, то обратная задача корректна.

На рис. 3, *а* показаны экспериментальные формы ВМЭ сигналов РЭМ от выступа тест-объекта [5, 6], для которого выполняются условия (1), при разных энергиях *E* электронов зонда [7]. Хорошо видно, что при низких энергиях ( $E \le 2$  кэВ) форма реального сигнала похожа на форму модельного сигнала. Значит, в этой области энергий первичных электронов задача определения координат граничных точек рассматриваемого выступа корректна, и можно проводить измерения размеров исследуемой структуры.

В области энергий электронов зонда  $E \ge 10 \text{ кэВ}$ форма реального сигнала (рис. 3, *a*) имеет такие же особенности, что и модельная форма сигнала (см. рис. 2, *б*). Значит, при высоких энергиях электронов зонда задача определения характеристик трапециевидных структур с большими углами наклона боковых стенок также вполне корректна. Поэтому и в этой области энергий электронов зонда РЭМ можно проводить измерения линейных размеров.

В диапазоне энергий электронов зонда 2 кэВ < E < 10 кэВ особенности формы реального сигнала (рис. 3, *a*) не соответствуют особенностям формы модельного сигнала (см. рис. 2,  $\delta$ ). В этой области энергий первичных электронов задача восстановления профиля и определения размеров элементов исследуемой структуры является некорректной.

При переходе от структур с трапециевидным профилем и большими углами ф наклона боковых

стенок к структурам с малыми углами наклона этих стенок задача восстановления характеристик структуры становится некорректной. На рис. 3, *б* приведены ВМЭ сигналы [8], полученные в РЭМ при разных энергиях электронов зонда для такой структуры. Сигналы при всех энергиях электронов зонда сильно отличаются от модельной формы, представленной на рис. 2. Поэтому задача восстановления характеристик структуры в этом случае является некорректной при всех энергиях электронов зонда.

Таким образом, при изменении параметров некорректной задачи для одних измеряемых объектов можно найти такие области параметров, в которых задача становится корректной, а для других объектов таких областей параметров нет. Поэтому требуются другие методы решения некорректной задачи.

Коррекция решения задачи в процессе самого решения. В этом методе ищется минимум некоего функционала *fun* при вариации параметров A (измеряемые характеристики объекта). Функционал описывает отклонение экспериментальных данных от модельной функции F(X, Y, A), переводящей для данного эксперимента входные данные X в выходные данные Y:

$$\Psi = \min_{A} (fun(X_i, Y_i, \Delta_i, F(X_i, Y, A))), \qquad (3)$$

где  $X_i$  — экспериментальные входные данные;  $Y_i$  — экспериментальные выходные данные;  $\Delta_i$  — ошибки выходных данных. Функционал можно выбирать по-разному. В физике в большинстве случаев применяется функционал

$$\chi^{2} = \sum_{i} \frac{(Y_{i} - Y(X_{i}, A))^{2}}{\Delta_{i}^{2}}, \qquad (4)$$



Для некорректной задачи функционал имеет несколько локальных минимумов. На рис. 4 они обозначены цифрами 1 и 2. Решением задачи является достижение абсолютного минимума 1. Но при разных начальных значениях искомых параметров A (рис. 4, a) могут быть достигнуты разные минимумы. Так, при начальных значениях 3 этот абсолютный минимум будет достигнут, а при значениях 4 — нет. Для устранения этой неоднозначности в некий момент 5 (рис. 4, б) решения задачи параметры А скачком меняются (например, переходят в положение 6 или 7). Далее поиск минимума продолжается, и абсолютный минимум может быть достигнут. Обычно для более надежного поиска абсолютного минимума в процессе решения выполняется несколько таких коррекций. Достижение абсолютного минимума произойдет только в том случае, если будет правильно выбрана коррекция значений параметров, что крайне затруднительно, так как эта коррекция зависит от вида модельной функции F(X, Y, A), значений экспериментальных данных  $X_i$ ,  $Y_i$  и  $\Delta_i$ , выбора начальной точки поиска минимума и выбора момента выполнения коррекции и ее вида.

Несмотря на универсальность данного метода его решения не дают доказательств правильности решения некорректной задачи.

В настоящее время общепризнанным методом решения некорректных задач в физике является использование функционала  $\chi^2$  (см. выражение (4)) и использование программы FUMILI [10], которая удачно выполняет коррекцию решения задачи в



Рис. 4. Схема поиска минимума функционала

процессе самого решения для большого класса физических задач.

Применение виртуальных измерительных приборов. Для выяснения сущности виртуальных измерительных приборов рассмотрим общую схему измерения, изображенную на рис. 1, и определим, что необходимо в ней изменить для того, чтобы иметь убедительные доказательства правильности решения некорректной обратной задачи в процессе измерения. Легко понять, что таким доказательством было бы наличие некоторого объекта, характеристики которого хорошо известны. Такие объекты получили название "тест-объекты".

Новая модифицированная схема измерений приведена на рис. 5. Ее работа осуществляется следующим образом. Проводится измерение характеристик тест-объекта и получается измерительная информация. Решается обратная задача. Проводится построение модели измеряемого тестобъекта. Наконец, осуществляется сравнение характеристик модели и тест-объекта. В случае, если они совпадают, то принимается решение о правильности измерения. Если совпадения нет, то меняются параметры метода решения обратной задачи или меняется сам метод до тех пор, пока не будет совпадения модели и тест-объекта.

Однако при использовании тест-объектов возникает ряд вопросов. Во-первых, откуда мы знаем характеристики тест-объектов? Из измерений на других приборах. Но эти измерения в большинстве случаев сами содержат решение некорректной задачи и, следовательно, требуют доказательства правильности этого решения. Во-вторых, необходимо измерять характеристики измеряемого объекта, а не тест-объекта. Поэтому необходимо, чтобы характеристики тест-объекта были очень близки к характеристикам измеряемого объекта. Но мы эти характеристики не знаем. Кроме того, такие тест-объекты надо изготовить и измерить. А это задача измерения, при которой опять надо доказывать правильность решения некорректной задачи. Поэтому использование тест-объектов не столь хорошо, как кажется на первый взгляд.



Рис. 5. Общая схема измерения характеристик тест-объекта

И все-таки решение проблемы лежит именно в этой области. Просто нам нужны объекты, обладающие следующими свойствами:

- постоянство характеристик объектов во времени и пространстве;
- объекты можно сделать с любыми характеристиками;
- характеристики объектов должны быть известны.

Несмотря на экзотичность свойств такие объекты существуют. Это числа. Конкретное число постоянно. Оно не зависит ни от времени, ни от положения в пространстве. Его значение мы знаем, так как сами его задали. Это значение можно легко изменить, и мы опять будем его знать. Однако у числа есть один недостаток. Его нельзя вставить в реальный измерительный прибор. Число можно вставить только в компьютерную программу. Вот здесь и появляется виртуальный измерительный прибор.

Виртуальный измерительный прибор — это компьютерная программа, которая, используя входные данные, воспроизводящие характеристики объекта, исследуемого на реальном измерительном приборе, генерирует выходные данные, аналогичные выходным данным реального измерительного прибора.

Схема работы виртуального и реального измерительных приборов в процессе измерения показана на рис. 6. Она состоит из двух ветвей — реальной и виртуальной. Реальная ветвь совпадает с общей схемой измерений, представленной на рис. 1. Виртуальная ветвь подобна реальной, но в ней все реальные составляющие заменены на виртуальные. Связь реальной и виртуальной ветвей осуществляется в трех местах. Во-первых, выходные данные реальной ветви являются входными данными виртуальной. Во-вторых, метод решения обратной задачи и параметры этого метода являются общими для реальной и виртуальной ветвей схемы измерений. В-третьих, решение о правильности выполнения измерительной задачи осуществляется путем сравнения моделей измеряемого и виртуаль-

ного объектов. Работает новая общая схема измерений следующим образом.

Реальный измерительный прибор проводит измерения некоторых характеристик объекта измерений. В результате его работы получается измерительная информация, которая несет в себе информацию об измеряемых характеристиках объекта. Параметры этих характеристик определя-



Рис. 6. Общая схема работы реального и виртуального измерительных приборов в процессе измерений

ют из решения обратной задачи. В результате этого процесса получается модель объекта измерений с его характеристиками. Так как модель была получена в результате решения некорректной задачи, то требуется доказательство правильности модели (правильности решения некорректной задачи). Это доказательство предоставляет работа виртуального измерительного прибора.

На основе полученной модели объекта измерений создается виртуальный объект (рис. 6), который используется виртуальным измерительным прибором для получения виртуальной информации, аналогичной реальной, получаемой на реальном измерительном приборе. Далее эта виртуальная информация используется для решения обратной задачи тем же методом и при тех же параметрах метода, что и при обработке измерительной информации. В результате этого получается модель виртуального объекта. На основании сравнения моделей измеряемого и виртуального объектов принимается решение о достоверности решения задачи измерения характеристик измеряемого объекта, если эти модели совпадают.

В противном случае проводится новое решение обратной задачи для измерительной информации другим методом или при других параметрах метода решения обратной задачи и строится новая модель измеряемого объекта и новый виртуальный объект. Далее получается новая виртуальная информация, решается обратная задачи при новом методе решения обратной задачи и строится новая модель виртуального объекта. И так проводится до тех пор, пока модели измеряемого и виртуального объектов не совпадут.

Отметим, что отличие виртуальной информации от измерительной заключается в том, что для

виртуальной информации мы знаем, какой объект имеется на входе виртуального измерительного прибора, а для измерительной информации мы не знаем, какой объект был на входе реального измерительного прибора. Поэтому применение виртуальных измерительных приборов является гарантией правильности решения обратной некорректной задачи и, следовательно, всего измерительного процесса в целом.

## Методы создания виртуальных измерительных приборов

В настоящее время существуют два типа компьютерных программ, с помощью которых можно создать виртуальные измерительные

приборы. Они основаны на имитации и симуляции работы реального измерительного прибора.

Имитация работы реального измерительного прибора. Имитация — от латинского слова "imitatio" подражание. Имитация — это моделирование некоторых (основных) действий, происходящих в реальном измерительном приборе в процессе измерения. Другими словами, имитация — это моделирование того, как работает измерительный прибор.

В основе работы программ, моделирующих некоторые реальные измерительные приборы методом имитации, лежит метод статистического моделирования (метод Монте-Карло). В настоящее время существует много разных программ, которые моделируют с помощью метода Монте-Карло работу реальных измерительных приборов [11]. Однако для их корректного применения необходимо проводить проверку трех принципов построения и работы соответствующих программ:

 время генерации виртуальной информации на современном персональном компьютере не должно быть очень большим. Оно должно быть того же порядка, что и время работы реального измерительного прибора, или менее;

2) объем независимых случайных чисел, создаваемых современными генераторами, должен быть достаточен для получения виртуальной информации;

3) метод Монте-Карло должен быть корректно применен для имитационного моделирования работы реального измерительного прибора.

Отсутствие или невыполнение любого из этих принципов не позволяет использовать метод имитации для создания виртуального измерительного прибора. Рассмотрим эти принципы более подробно.



Рис. 7. Гистограмма распределения 10<sup>7</sup> псевдослучайных чисел с нормальным распределением и наложенное на гистограмму нормальное распределение

Традиционное моделирование по методу Монте-Карло основано на программном копировании работы реального измерительного прибора. Однако такое моделирование занимает очень много времени, так как метод Монте-Карло — самый медленный метод численных расчетов на компьютерах. Применение суперкомпьютеров для этой цели может дать положительный эффект, однако это очень дорого и не может выполняться при регулярных измерениях. Для реализации виртуальных измерительных приборов больше всего подходят персональные компьютеры. Однако скорость их работы значительно меньше скорости суперкомпьютеров. Поэтому в ряде случаев применение метода Монте-Карло для создания виртуальных измерительных приборов невозможно из-за большой затраты времени.

В методе Монте-Карло необходимо использовать случайные числа. Но современные генераторы "случайных" чисел, входящие в математические библиотеки программ всех языков программирования, генерируют псевдослучайные числа. На рис. 7 приведена гистограмма распределения  $10^7$  псевдослучайных чисел X с нормальным распределением, полученных генератором, входящим в библиотеку языка программирования FORTRAN. Для сравнения на гистограмму наложено гауссовское распределение

$$g(X) = \frac{I}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(M-X)^2}{2\sigma^2}\right)$$
(5)

с интегралом  $I = 10^7$ , средним значением M = 0 и стандартным отклонением  $\sigma = 1$ . Это гауссовское распределение хорошо описывает гистограмму практически во всем диапазоне псевдослучайных чисел. Небольшие отклонения имеются в области значений |X| > 2. Но такие отклонения есть у всех известных генераторов.

Главным свойством псевдослучайных чисел является периодичность. Так, генератор, представленный выше, имеет периодичность ~30 млн. Эта величина периодичности обусловлена не только методом создания псевдослучайных чисел, но и тем, что для их хранения и применения используются элементы памяти, имеющие ограниченный размер (обычно 4 или 8 байт).

Для моделирования конкретного процесса может не хватить 30 млн псевдослучайных чисел. Так, например, для генерации методом Монте-Карло РЭМ изображения размером 1000×1000 ріх необходимо не менее 600 млрд псевдослучайных чисел. Поэтому в информации, сгенерированной виртуальным измерительным прибором, будут заложены неизвестные периодичные искажения. Можно увеличить период генератора псевдослучайных чисел (например, увеличив длину таких чисел), но это приводит к резкому (в десятки или сотни раз) возрастанию времени работы программы, что крайне нежелательно.

Метод статистического моделирования получил широкое распространение для моделирования различных процессов [11]. Однако при проведении таких моделирований обычно не проверяется возможность применения этого метода в конкретных условиях. Это может привести к сложностям при реализации моделирования и интерпретации его результатов. Рассмотрим простейший пример применения метода Монте-Карло для моделирования взаимодействия электронов и позитронов с твердым телом.

Метод Монте-Карло создавался для частиц, которых в веществе в обычных условиях не существует. Например, для позитронов в растровом позитронном микроскопе [12] метод действительно применим, так как позитронов в обычном веществе нет (если отсутствует рождение электрон-позитронных пар). В результате взаимодействия позитронов с веществом (рассеяние, потери энергии на ионизацию атомов вещества) позитрон остается; меняются только его координаты, энергия и направление движения, которые нас и интересуют. Что происходит с потерянной энергией и рожденными за счет ионизации электронами нас может не интересовать. Поэтому мы должны моделировать траектории только позитронов.

Для движения электронов в веществе ситуация принципиально другая. Ионизационный (вторичный) электрон ничем не отличается от первичного электрона. За каким электроном нам следить (моделировать траекторию)? В принципе надо моделировать траектории всех электронов. А это невозможно вследствие нескольких причин.

Во-первых, это приводит к резкому увеличению времени моделирования. Так, для начальной энергии электронов 30 кэВ (обычная энергия первичных электронов в РЭМ) время моделирования возрастает в сотни раз по сравнению с моделированием траекторий только первичных электронов. Во-вторых, требуется дополнительное число псевдослучайных чисел, которых обычно и так не хватает. Увеличить число псевдослучайных чисел можно, например, путем увеличения длины псевдослучайного числа. Но это опять потребует увеличения времени расчетов в десятки или даже сотни раз. В-третьих, для моделирования траекторий вторичных электронов надо знать вероятности ионизации электронов с любых оболочек любых атомов. Для этого необходимо знать волновые функции атомов. Но до настоящего времени эта задача все еще не решена. Существует еще много других эффектов генерации вторичных электронов, которые мы знаем недостаточно хорошо, но которые необходимо моделировать для электронов, но не для позитронов. Следовательно, виртуальный позитронный микроскоп можно сделать на основе метода Монте-Карло, а виртуальный растровый электронный микроскоп нельзя.

Таким образом, имитатор не всегда может выполнять функции виртуального измерительного прибора.

Симуляция работы реального измерительного прибора. Симуляция — от латинского слова "simulatio" — видимость, притворство. Симуляция — это моделирование основных свойств реального процесса без имитации его действия.

Симуляция возможна только тогда, когда известна функциональная связь входной и выходной информации решаемой задачи. Обычно это выражается в виде соответствующих уравнений, связывающих входную и выходную информации. Однако и в симуляции приходится использовать метод Монте-Карло, например, при моделировании шумовой составляющей сигнала виртуального измерительного прибора.

При симуляции моделирование работы реального прибора не происходит. Компьютерная программа создает только информацию, аналогичную информации, получаемой на реальном измерительном приборе, за время, сравнимое со временем получения информации на нем.

Главным свойством симуляции является малое время работы компьютерной программы. Резкое уменьшение этого времени может быть обеспечено несколькими путями:

- универсальность программы ограничивается за счет целенаправленности работы для какоголибо одного или нескольких видов измеряемых объектов;
- использование моделей формирования виртуальной информации, где большую часть информации дают аналитические формулы, расчет по которым является самым быстрым;
- интегральные выражения необходимо исключить вообще или свести их к необходимому минимуму, так как расчет интегралов в большинстве случаев придется делать численным методом, который резко (в сотни раз для одномерных интегралов или в миллионы раз для трехмерных интегралов) увеличивает время работы программы;
- использование моделирования по методу Монте-Карло (самый медленный процесс) сводится к необходимому минимуму — например, только для моделирования шумовой составляющей сигнала виртуального измерительного прибора;
- часть информации можно взять из таблиц, составленных по результатам специальных экспериментов с модельными объектами, если расчет этой информации занимает много времени или затруднен вследствие недостаточного знания физических процессов, происходящих в измерительном приборе.

Только при выполнении этих условий возможно реализовать виртуальный измерительный прибор методом симуляции.

### Заключение

Появление виртуальных измерительных приборов обусловлено усложнением проводимых в настоящее время измерений характеристик различных объектов, особенно объектов нанотехнологии, которые меняют свои характеристики с изменением своих размеров и формы. Целью создания и применения виртуальных измерительных приборов является доказательство правильности результатов измерений, выполненных на реальных измерительных приборах. Создать виртуальный измерительный прибор можно с помощью метода имитации работы реального измерительного прибора или симуляции информации, получаемой на реальном измерительном приборе.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 11-08-01217).

#### Список литературы

1. Novikov Yu. A., Rakov A. V., Todua P. A. Metrology in linear measurements of nanoobject elements // Proc. SPIE. 2006. V. 6260. P. 626013-1-626013-8.

2. Novikov Yu. A., Ozerin Yu. V., Rakov A. V., Todua P. A. Method for linear measurements in the nanometre range // Measurement science and technology. 2007. V. 18. P. 367–374.

3. **Новиков Ю. А., Раков А. В., Тодуа П. А.** Классификация тест-объектов для калибровки растровых электронных микроскопов в нанометровом диапазоне // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 22—26.

4. Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А., Плотников Ю. И., Раков А. В., Тодуа П. А. Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа // Тр. ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 77—120.

5. Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В. Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах // Микроэлектроника. 2002. Т. 31, № 4. С. 243—262.

6. Gavrilenko V. P., Mityukhlyaev V. B., Novikov Yu. A., Ozerin Yu. V., Rakov A. V., Todua P. A. Test object of the linewidth with a trapezoidal profile and three certified sizes for an SEM and AFM // Measurement science and technology. 2009. P. 20-1–20-7.

7. Волк Ч. П., Митюхляев В. Б., Новиков Ю. А., Раков А. В., Тодуа П. А. Изображение тест-объекта ширины линии в РЭМ при разных энергиях электронов зонда // Измерительная техника. 2009. № 7. С. 20—23.

8. **Новиков Ю. А., Раков А. В., Филиппов М. Н.** Линейные измерения в РЭМ элементов с трапециевидным профилем при разных энергиях электронов зонда // Изв. РАН. Сер. Физ. 1998. Т. 62, № 3. С. 543—548.

9. Идье В., Драпард Д., Джеймс Ф., Рус М., Садуле Б. Статистические методы в экспериментальной физике: Пер. с англ. / Под ред. А. А. Тяпкина. М.: Атомиздат. 1976. 335 с.

10. Соколов С. Н., Силин И. Н. Нахождение минимумов функционалов методом линеаризаци. Препринт ОИЯИ. Д810. 1964.

11. **Applications** of Monte Carlo Method in Science and Engineering / Ed. S. Mordechai. In-Tech. 2011. 950 p. URL: http://www.intechopen.com

12. Brandes G. R., Canter K. F., Horsky T. N., Lippel P. H., Mills A. P. Scanning positron microbeam // Rev. Sci. Instrum. 1988. V. 59, N. 2. P. 228–232.

Yu. A. Novikov, Chief Researcher, e-mail: nya@kapella.gpi.ru,

A. M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

### **Virtual Measuring Instruments**

The advent of virtual measuring instruments is caused by the complex character of measurements of characteristics of different objects, particularly objects of nanotechnology. Such objects change characteristics with variation of their size and shape. The definition of virtual measuring instruments and description of their work in the process of measurements of the characteristics of investigated objects are given. The virtual measuring instrument is a computer program, which uses the input data, reproducing the characteristics of the object, investigated on the real measuring device. The program generates output data, similar to those of the measuring device. The goals and problems of virtual measuring instruments in proving the correctness of solution of inverse incorrect tasks are considered. The virtual measuring instrument can be developed either by imitation of the work of the real measuring instrument or by simulation of information from the real measuring instrument.

Keywords: measuring instrument, virtual measuring instrument, virtual test object, modeling, imitation, simulation

#### References

1. Novikov Yu. A., Rakov A. V., Todua P. A. Metrology in linear measurements of nanoobject elements. *Proc. SPIE.* 2006. V. 6260. P. 626013-1–626013-8.

2. Novikov Yu. A., Ozerin Yu. V., Rakov A. V., Todua P. A. Method for linear measurements in the nanometre range. *Measurement science and technology*. 2007. V. 18. P. 367–374.

3. **Novikov Yu. A., Rakov A. V., Todua P. A.** Klassifikatsiya test-ob'ektov dlya kalibrovki rastrovykh elektronnykh mikroskopov v nanometrovom diapazone. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2009. N. 2. P. 22–26.

4. Volk Ch. P., Gornev E. S., Novikov Yu. A., Plotnikov Yu. I., Rakov A. V., Todua P. A. Problemy izmereniya geometricheskikh kharakteristik elektronnogo zonda rastrovogo elektronnogo mikroskopa. Tr. IOFAN. 2006. V. 62. P. 77– 120.

5. Volk Ch. P., Gornev E. S., Novikov Yu. A., Ozerin Yu. V., Plotnikov Yu. I., Prokhorov A. M., Rakov A. V. Lineinaya mera mikronnogo, submikronnogo i nanometrovogo diapazonov dlya izmerenii razmerov elementov SBIS na rastrovykh elektronnykh i atomno-silovykh mikroskopakh. *Mikroelektronika*. 2002. V. 31, N. 4. P. 243–262.

6. Gavrilenko V. P., Mityukhlyaev V. B., Novikov Yu. A., Ozerin Yu. V., Rakov A. V., Todua P. A. Test object of the linewidth with a trapezoidal profile and three certified sizes for an SEM and AFM. *Measurement science and technology*. 2009. P. 20-1-20-7.

7. Volk Ch. P., Mityukhlyaev V. B., Novikov Yu. A., Rakov A. V., Todua P. A. Izobrazhenie test-ob'ekta shiriny linii v REM pri raznykh energiyakh elektronov zonda. *Izmeritel'naya tekhnika.* 2009. N. 7. P. 20–23.

8. Novikov Yu. A., Rakov A. V., Filippov M. N. Lineinye izmerenuya v REM elementov s trapetsievidnym profilem pri raznykh energiyakh elektronov zonda. *Izv. RAN. Ser. Fizicheskaya.* 1998. V. 62, N. 3. P. 543–548.

9. Eadie W. T., Dryard D., James F. E., Roos M., Sadoulet B. Statisticheskie metody v eksperimental'noi fizike: Per. s angl. Pod red. A. A. Tyapkina. M.: Atomizdat. 1976. 335 p.

10. Sokolov S. N., Silin I. N. Nakhozhdenie minimumov funktsionalov metodom linearizatsii. Preprint OIYaI. D810. 1964.

11. **Applications** of Monte Carlo Method in Science and Engineering. / Ed. S. Mordechai. 2011. 950 p. URL: http://www.intechopen.com

12. Brandes G. R., Canter K. F., Horsky T. N., Lippel P. H., Mills A. P. Scanning positron microbeam. *Rev. Sci. Instrum.* 1988. V. 59, N. 2. P. 228–232. В. А. Васильев, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ФГБОУ ВПО "Пензенский государственный университет", С. А. Москалев, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского комплекса, И. В. Ползунов, начальник сектора, В. А. Шокоров, инженер-конструктор ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений", г. Пенза e-mail: opto@bk.ru

# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 08.07.2014

Проведен анализ современного состояния и перспектив создания датчиков давления на базе полупроводниковых МЭМС. Выделены основные параметры и характеристики современных датчиков давления. Определены тенденции и направления совершенствования датчиков на основе МЭМС.

**Ключевые слова:** микроэлектромеханическая система (МЭМС), датчик давления, полупроводниковый датчик, совершенствование, параметры, характеристики

### Введение

Разработка и создание новых датчиков давления с улучшенными качественными и эксплуатационными показателями обусловлена растущими потребностями в ракетно-космической и авиационной отраслях, автомобилестроении, атомной, нефтяной и газовой промышленности, медицине, бытовой сфере. Эти потребности в значительной мере обеспечиваются датчиками давления на основе полупроводниковых микроэлектромеханических систем (МЭМС). Преимуществами таких датчиков являются высокая чувствительность, малые габаритные размеры, невысокая стоимость, возможность крупносерийного производства.

За рубежом среди ведущих производителей полупроводниковых датчиков давления можно выделить фирмы Honeywell International. Inc. (США), Kulite Semiconductor Products (США), Motorolla (США), Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. (Япония), Druck (Великобритания) и ряд других компаний [1]. Среди российских производителей полупроводниковых датчиков давления можно выделить ОАО "НИИФИ" (г. Пенза), ПГ "МИДА" (г. Ульяновск), ЗАО НПК "ВИП" (г. Екатеринбург), ПГ "Метран" (г. Челябинск), НПП "Элемер" (г. Зеленоград), ОАО Энгельское опытно-конструкторское бюро "Сигнал" им. А. И. Глухарева (г. Энгельс, Саратовская обл.), "БД Сенсорс РУС" (г. Москва).

## Состояние разработок датчиков давления на базе полупроводниковых МЭМС

Исследование современного состояния в области создания полупроводниковых МЭМС для датчиков давления показывает, что в настоящее время производятся полупроводниковые МЭМС на основе структур объемного кремния, "кремний на диэлектрике", "поликремний на диэлектрике", "кремний на сапфире", "карбид кремния на диэлектрике". Производители характеризуют датчики давления на основе МЭМС следующими основными параметрами: диапазон измерения, диапазон рабочих температур, выходной сигнал, основная погрешность. Именно эти параметры определяют состав единичных показателей качества таких датчиков.

В процессе изучения датчиков ведущих отечественных и зарубежных производителей были выбраны датчики с наиболее высокими техническими параметрами:

- 26PCF (Honeywell International, Inc., США), PDCR 800 (Druck, Великобритания), MPX2200DP (Motorolla, США), ДАЭ-100 ОАО "НИИФИ", г. Пенза) — на основе объемного кремния;
- XTEL-375 (Kulite, США), Туре 4007В ("Kistler", Швейцария) структура "кремний на диэлектрике";
- серии Д (ЗАО "НПК ВИП", г. Екатеринбург), МИДА-ПИ-52 (ПГ МИДА, г. Ульяновск), Радон ВБ ДИ (НПП "Интор", г. Новочеркасск, Ростовская обл.) — "кремний на сапфире";
- ДАЭ 101 (ОАО "НИИФИ", г. Пенза), SML-30,0 (ADZ Nagano GmbH, Германия) "поликремний на диэлектрике";
- преобразователь давления серии "Карборунд" (ЛЭТИ, г. Санкт-Петербург) — "карбид кремния на диэлектрике".

Проведена их сравнительная оценка дифференциальным методом, который основан на сравнении единичных показателей качества оцениваемого и базового образцов [2]. По результатам сопоставления основных параметров датчиков сделан вывод о том, что на сегодняшний день можно считать идеальным датчик давления со следующими параметрами:

- диапазон измерения 0...250 МПа;
- число диапазонов измерения 25;
- основная погрешность 0,05 %;
- диапазон рабочих температур -80...600 °C;
- выходной сигнал 40 мВ/В.

Это тот предел параметров датчиков давления, который востребован и к которому стремятся разработчики.

Таким образом, задачами совершенствования полупроводниковых датчиков давления в большинстве случаев являются: повышение чувствительности (увеличение номинального выходного сигнала), повышение точности (уменьшение погрешностей), расширение температурного диапазона, увеличение числа диапазонов измерения.

## Перспективные разработки датчиков давления на базе полупроводниковых МЭМС

Наиболее широко распространенной структурой полупроводниковых МЭМС датчиков давления как в России, так и за рубежом является структура, сформированная в объемном кремнии. Большая распространенность полупроводниковых МЭМС на базе объемного кремния объясняется отработанностью данной технологии. В таких МЭМС резистивные элементы формируются в кремниевой мембране путем диффузии примеси, обычно бора (В), в кремний (Si) *n*-типа.

МЭМС на основе объемного кремния давно используется в датчиках давления фирмы Honeywell [3]. Эта фирма производит термокомпенсированные и калиброванные датчики давления, которые отличаются от базовых датчиков более сложной структурой МЭМС (датчики типа 40РСхх и 4040 РСхх). Структура таких МЭМС содержит набор тонкопленочных термисторов и резисторов, формируемых на том же кристалле, из которого выполнена мембрана. Точная подгонка их сопротивлений осуществляется лазером в процессе изготовления МЭМС. В диапазоне температур 0...85 °С выходной сигнал таких датчиков значительно стабильнее, чем у базовых датчиков. Разброс начального напряжения смещения не превышает ±1 мВ при выходном напряжении 70...100 мВ, тогда как у базовых датчиков он составляет ±20...30 мВ. Достоинством датчиков данной категории является возможность их замены без дополнительной калибровки устройства или системы.

На основе объемного кремния фирма Druck (Великобритания) выпустила серию датчиков PDCR с "мВ"-выходом [4]. В серии таких датчиков используется высокотехнологичный базовый модуль с кремниевыми тензорезистивными элементами. При производстве модулей применяется ориги-

нальная технология микромеханической обработки, которая позволяет изготавливать МЭМС с различными принципами преобразования давления: тензорезистивный, емкостной, индукционный, резонансный.

В датчике давления XTEL-SD-625 фирмы Kulite [5] на одном объемном кристалле изготовлены две мембраны одинаковой толщины, но разных размеров, для измерения динамического и статического давлений. Чувствительность мембраны для измерения динамического давления намного больше, чем чувствительность мембраны для измерения статического давления (из-за различия их размеров). Благодаря этому датчик может измерять низкие динамические давления при одновременном измерении высокого статического (квазистатического) давления.

С использованием объемного кремния фирма Motorolla paзpaботала чувствительный элемент MЭМС — "X-ducer" с крестообразным расположением четырех выводов, на основе которого изготавливаются серии датчиков давления MPX2200, MPX2001, MPX5999 [6, 7]. Термокомпенсированные и калиброванные МЭМС датчиков Motorolla содержат на кристалле кроме элемента "X-ducer" терморезисторы для коррекции температурной погрешности нуля и чувствительности датчика. Кроме того, в них имеются подгоночные резисторы, с помощью которых осуществляется лазерная подгонка разброса нулевого смещения и чувствительности датчиков в процессе производства.

Достоинством датчиков давления с МЭМС на базе объемного кремния, выпускаемых ОАО "НИИФИ", являются: высокая точность измерений, миниатюрность, возможность работы в агрессивных средах [8, 9]. Основой конструкций датчиков абсолютного давления ДАЭ 100, ДАЭ 107 и др. являются оригинальные полупроводниковые МЭМС, состоящие из профилированного кристалла со сформированной в нем мостовой измерительной цепью и стеклянного основания (рис. 1). Технология изготовления таких полупроводниковых МЭМС обеспечивает групповое электростатическое соединение профилированной кремниевой и стеклянной пластин в вакууме с последующим разделением на отдельные чувствительные элементы. При этом в случае изготовлении датчиков абсолютного давления образуется герметичная вакуумированная полость опорного давления.

Другой распространенной структурой полупроводниковых МЭМС датчиков давления является структура "кремний на диэлектрике" [10]. В отличие от структур на базе объемного кремния, где изоляция тензорезисторов осуществляется за счет свойств обратносмещенного *p*-*n*-перехода, в структурах "кремний на диэлектрике" изоляция тензоэлементов (тензорезисторов) обеспечивается сло-

![](_page_38_Picture_0.jpeg)

Рис. 1. Полупроводниковая МЭМС на базе структуры объемного кремния

ем диэлектрика (оксид кремния, нитрид кремния и др.). Это позволяет практически исключить токи утечки, а наличие диэлектрической изоляции и принятие дополнительных мер позволяют расширить температурный диапазон работы датчиков. Так, датчики серии XTEH-10LAC-190 (М) фирмы Kulite, предназначенные для измерения пульсаций давления в жидкостях и газах, работают при температуре контролируемой среды до 500 °C (диапазон частот 10...25000 Гц) [11, 12].

Однако датчики давления со структурой "кремний на диэлектрике" фирмы Kulite являются дорогостоящими изделиями. В Европе получили распространение более простые и относительно дешевые датчики (сенсоры) таких фирм, как Honeywell и STS. В России данная технология не нашла широкого применения.

В нашей стране получила распространение структура "кремний на сапфире" — частный случай структуры "кремний на диэлектрике". Такая структура положена в основу МЭМС датчиков давления ПГ "МИДА", НПК "ВИП", НПП "Интор" и др. [13—16]. Среди иностранных производителей МЭМС на базе структур "кремний на сапфире" следует отметить японскую фирму Minebea [17].

Для датчиков давления высокотемпературных жидкостей и газов МИДА-ДИ-12П-12 температура измеряемой среды может достигать 350 °С, а для датчиков давления газов в цилиндрах двигателей МИДА-ДИ-55П и датчиков давления расплавов полимеров и вязких жидкостей МИДА-ДИ-12П-06 и МИДА-ДИ-12П-08 — до 600 °С (в них полупроводниковый чувствительный элемент удален от воспринимающей давление мембраны) [13].

Микроэлектромеханические системы тензопреобразователей давления НПК "ВИП" серии Д представляют собой сапфировую мембрану с кремниевыми тензорезисторами, которая по всей плоскости соединена с металлической (титановой) мембраной [14]. Такая двухслойная мембрана жестко закреплена в корпусе датчика и имеет механическую связь с мембраной, воспринимающей измеряемое давление. Деформация двухслойной мембраны приводит к изменению сопротивлений кремниевых тензорезисторов.

В основе полупроводниковых МЭМС датчиков давления ДАЭ-101, ДАЭ-104 и др., разработанных в ОАО "НИИФИ", лежит структура "поликремний на диэлектрике". Подслой диэлектрика в такой структуре получают путем окисления кремния в сухом кислороде, а слой поликремния формируют методом эпитаксиального выращивания. Датчики давления со структурой "поликремний на диэлектрике" способны работать при температурах до 200 °С. Новые технические решения по повышению чувствительности и уменьшению погрешностей таких датчиков описаны в [18-20]. Оригинальным техническим решением по повышению точности и надежности является полупроводниковый датчик давления с частотным выходным сигналом [18]. В МЭМС этого датчика на профилированной мембране квадратной формы с центральной тонкой частью (рис. 2) сформированы две мостовые измерительные цепи из тензорезисторов (рис. 3) в форме меандра (*R*1, *R*2, *R*3, *R*4 и *R*5, *R*6, R7, R8), причем тензорезисторы измерительных цепей размещены так, что соответствующие тензорезисторы цепей оказываются вставленными друг в друга. Обе мостовые измерительные цепи подключены к частотному интегрирующему развертывающему преобразователю (ЧИРП), который содержит интегратор на базе операционного усилителя X1, емкость интегратора  $C_{\rm M}$ , два сопротивления интегратора R<sub>II</sub>, сравнивающее устройство на

![](_page_38_Figure_9.jpeg)

Рис. 2. Мембрана под воздействием давления:

A — размер стороны мембраны;  $R_{\rm kp1}$  и  $R_{\rm kp2}$  — радиусы кривизны деформированного кристалла; P — воздействующее (измеряемое) давление;  $\alpha$  — угол травления кремния;  $b_n$  — расстояние от тонкой части кристалла до жесткой заделки; H — толщина кристалла

![](_page_39_Figure_0.jpeg)

Рис. 3. Расположение тензорезисторов на мембране

базе операционного усилителя X2 и дозирующий конденсатор  $C_{\rm Д}$  (рис. 4). При таком соединении сигналы с мостовых измерительных цепей складываются и относительное изменение выходного сигала с ЧИРП увеличивается. Разработанный датчик давления с частотным выходным сигналом по сравнению с традиционными датчиками обладает более высокой точностью измерения за счет повышения чувствительности при сохранении независимости параметров выходного сигнала от напряжения питания тензомоста. Кроме того, данный датчик имеет более высокую надежность за счет

наличия двух тензометрических мостов, находящихся в зонах одинаковых деформаций и рабочих температур.

Структуру "поликремний на диэлектрике" использует также фирма ADZ Nagano в серии датчиков давления SML [21]. Чувствительность исходного сигнала составляет 15 мВ/В. высокая точность измерения до 0,05 % достигается за счет цифровой обработки сигнала. Общая погрешность преобразования измерений с учетом нелинейности, гистерезиса, влияния температуры не превышает 1,0  $\pm$  0,7 % и возрастает до уровня 2,5...3,0 % в области крайних температур (+85...+100 °С, -20...-40 °C).

Перспективным направлением является использование карбида

кремния (SiC) для изготовления МЭМС датчиков давления, которое открывает возможность измерения давлений в более широком температурном диапазоне. Эта возможность обусловлена свойствами самого материала, так как ширина запрещенной зоны SiC много больше, чем у Si (обычного кремния), при этом обеспечивается относительно высокая радиационная стойкость.

Структуры "карбид кремний на диэлектрике" МЭМС датчиков давления ОАО "НИИФИ" представляют собой профилированный кремниевый кристалл, соединенный со стеклянным основанием [22]. С планарной стороны кристалла формируется слой оксида кремния (SiO<sub>2</sub>) для изоляции тензоэлементов (тензорезисторов) от подложки. Тензорезисторы из SiC формируются на слое SiO<sub>2</sub> методом магнетронного распыления через маску при температуре подогрева подложки до 350 °C. Металлический слой для формирования контактных площадок и проводников наносят из алюминия (Al). Созданные датчики давлений на основе структур "карбид кремния на диэлектрике" способны устойчиво работать при температурах измеряемой среды до 400 °С.

В конструкции МЭМС, разработанной и технически реализованной ЛЭТИ (Санкт-Петербург), на основе структуры "карбид кремния на диэлектрике", контактные площадки вынесены из зоны измерений, что позволяет осуществить термомеханическую развязку и защитить контакты от внешних воздействий [23]. Контроль температуры здесь ведется по силе тока, протекающего через мостовую схему. Для подгонки измерительного моста и термокомпенсации в схему введены две линейки подгоночных резисторов, включенных в противолежа-

![](_page_39_Figure_9.jpeg)

Рис. 4. Функциональная схема

![](_page_40_Figure_0.jpeg)

Рис. 5. Структура МЭМС на основе карбида кремния (SiC)

щие плечи моста и вынесенные на одну сторону кристалла. Это не только позволяет правильно сбалансировать схему, но также исключить возможность возникновения теплового разбаланса, так как все резисторы находятся в одинаковых условиях. В схеме предусмотрены контактные площадки для подачи электрического импульса в ходе подгонки. Они расположены с одной стороны кристалла в одну линию, что позволяет автоматизировать процесс подгонки. Лицевая сторона кристалла защищена кремниевой крышкой. Такие МЭМС обеспечивают измерение давлений при температуре до 450 °C.

Фирма Kulite подошла с другой стороны к вопросу проектирования датчиков давления на основе карбида кремния (SiC). В их разработках карбид кремния используется не только в качестве материала для приборного слоя МЭМС, но также в качестве материала для механической мембраны (рис. 5) [24]. Такие датчики способны работать до температуры 600 °C. Также фирмой Kulite была решена проблема формирования тонких мембран из карбида кремния толщиной менее 20 мкм с помощью сочетания глубокого реактивного ионного травления (DRIE) и электрохимического травления.

### Заключение

Анализ полупроводниковых датчиков давления показал, что наиболее широко применяемой структурой полупроводниковых МЭМС датчиков давления как в России, так и за рубежом остается использование объемного кремния. Большая распространенность полупроводниковых МЭМС на базе структуры объемного кремния объясняется отработанностью данной технологии. Такие датчики давления отличает высокая точность измерения (на уровне 0,2 %) и высокий уровень выходного сигнала (порядка 10...15 мВ/В), однако их применение ограничивает температура измеряемой среды (до 120 °C). Использование в полупроводниковых МЭМС структур "кремний на диэлектрике", "кремний на сапфире" позволило практически расширить диапазон рабочих температур до 300 °С,

вместе с тем, в данных структурах возникает погрешность нелинейности, что ведет к возрастанию относительной погрешности, которая в среднем достигает 1 %. МЭМС на основе структур "кремний на диэлектрике" широко распространена за рубежом, в России наибольшее распространение получили МЭМС на основе структур "кремний на сапфире". Использование структуры "поликремний на диэлектрике" позволило производителям датчиков давления изготавливать технологичные полупроводниковые МЭМС с выходным сигналом, аналогичным датчикам на базе объемного кремния (7...10 мВ /В), низкой погрешностью нелинейности, а также погрешностью измерения на уровне 0,5 % в диапазоне температур от -60 до +200 °C. Перспективным направлением создания полупроводниковых МЭМС является использование структур "карбид кремний на диэлектрике", которое открывает возможность измерения давлений при температурах измеряемой среды до 600 °С.

### Список литературы

1. Белозубов Е. М., Васильев В. А., Громков Н. В., Чернов П. С. Датчики давления в России и за рубежом // Метрология, 2010. № 10. С. 15—24.

2. ГОСТ 15467—79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.

3. **Маргелов А.** Датчики давления компании Honeywell // Chip News 2005. № 7 (100). С. 11—12.

4. **PDCR 800** Series. URL: http://www.fzk.uni-hannover.de/fileadmin/institut/Ausstattung/Messinstrumente/Druckmessge-raete/PDCR800.pdf. (Дата обращения — 25.06.2014 г.).

5. **XTEL-1-SD-625.** URL: http://www.kulite.com/products. asp?p=4-1 (Дата обращения — 25.06.2014 г.).

6. **Semiconductor** Technical Data. URL: http://www.west-l. ru/uploads/tdpdf/ty647374\_e.pdf (Дата обращения — 25.06.2014 г.).

7. **Semiconductor** Technical Data. URL: http://www.kon-test.ru/datasheet/motorola/ mpx5999.pdf (Дата обращения — 25.06.2014 г.).

8. Каталог ОАО "НИИФИ". Датчики, преобразователи, системы. URL: http://www.niifi.ru/Pdfs/Catalogue\_2011.pdf. (Дата обращения — 25.06.2014 г.).

9. Баринов И. И., Пауткин В. Е., Козин С. А., Федулов А. В. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий // Компоненты и технологии. 2010. № 1. С. 24—27.

10. **Лурье Г. И.** Датчики давления для общепромышленного применения. Часть 1. URL: http://www.manometr.com/ lematt/r174-1.pdf. (Дата обращения — 25.06.2014 г.).

11. Kurtz Anthony D., Ned Alexander A., Epstein Alan H. Ultra High Temperature, Miniature, SOI Sensors for Extreme Environments // IMAPS International HiTEC 2004 Conference Santa Fe, New Mexico, May 17–20, 2004. P. 1–11.

12. **XTEH-10LAC-190 (M)** SERIES. URL: http://www.a-tech.ca/doc\_series/XTEH-10LAC-190\_SuperHighTempLow GSensitivity\_ATI.pdf. (Дата обращения — 25.06.2014 г.).

13. **ПГ "МИДА".** Каталог. URL: http://midaus.com/docs/ katalog.pdf. (Дата обращения — 25.06.2014 г.).

14. **НПК "ВИП".** Первичные преобразователи давления и силы. URL: http://www.zaovip.ru/products/pressure\_transducers/. (Дата обращения — 25.06.2014 г.).

15. **НПП "Интор".** Датчики давления. URL: http://www. intor.ru/catalog/index/0/45. (Дата обращения — 25.06.2014 г.). 16. **Преобразователи** давления с нормированным сигналом. URL: http://www.oooproma.ru/3.html (Дата обращения: 25.06.2014).

17. **Minebea** Core Technology. Pressure sensors. URL: http:// www.minebea-med.com/en/product/press/index.html (Дата обращения: 26.06.2014).

18. Патент РФ № 2430342 МПК G01L 9/00. Полупроводниковый датчик давления с частотным выходным сигналом / В. А. Васильев, Н. В. Громков, С. А. Москалев // Бюл. № 27 от 27.09.2011 г.

19. Патент РФ № 2451270 МПК G01L 9/04. Полупроводниковый датчик давления повышенной точности / В. А. Васильев, Н. В. Громков, С. А. Москалев // Бюл. № 14 от 20.05.2012 г.

20. Громков Н. В. Математическая модель и анализ влияния собственных шумов элементов схемы корректирующего канала на выходной сигнал измерительных преобразователей // Изв. высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2007. № 4. С. 152–165.

21. ADZ NAGANO. Pressure transmitter. URL: http:// www.adz.de/pressure-transmitter.html. (Дата обращения: 26.06.2014).

22. Баринов И. Н. Высокотемпературные тензорезистивные датчики давлений на основе карбида кремния. Состояние разработок и тенденции развития // Компоненты и технологии. 2010. № 8. С. 64—71.

23. Корляков А. В. Физико-технологические основы формирования базовых элементов микросистемной техники. Дисс. ... на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург: С.-Петерб. гос. электротехн. ун-т (ЛЭТИ), 2010. 290 с.

24. Ned Alexander A., Kurtz Anthony D., Beheim Glenn, Masheeb Fawzia, Stefanescu Sorin. Improved SiC Leadless Pressure Sensors For High Temperature, Low and High Pressure Applications // Twenty-First Transducer Workshop Lexington, Maryland. June 22–23. 2004. P. 5–11.

V. A. Vasiliev, Head of the Department "Machine", e-mail: opto@bk.ru, Penza State University,

S. A. Moskaliev, Chief of the Research complex, e-mail: sa\_moskalev@mail.ru, I. V. Polzunov, Head of Sector,

e-mail: ivan.polzunov@mail.ru, V. A. Shokorov, Design Engineer, e-mail: vad\_pnz@mail.ru

Research Institute of Physical Measurements (Penza)

### Semiconductor Microelectromechanical Systems of Modern and Prospective Pressure Sensors

The analysis of the current state and prospects of creating pressure sensors based on semiconductor MEMS. It was noted that currently produced semiconductor MEMS-based bulk silicon structures, "silicon-on-insulator", "polysilicon-on-insulator", "silicon on sapphire", "silicon carbide-on-insulator".

Studies have shown that the task of improving semiconductor transducering pressure in most cases — increased sensitivity (increasing the output signal), to increase the accuracy (reduce errors), dis-extension of the temperature range, the increase in the number of measuring ranges. In this case, today is a perfect pressure transducer with parameters: Measuring range 0...250 MPa, the number of measuring ranges of 25, the main error of 0,05 %, operating temperature range -80...600 °C; output 40 mV/V. This is the limit of the parameters of pressure sensors that is in demand and sought by developers.

During the analysis considered pressure sensors based on semiconductor MEMS with the highest technical parameters, as well as original technical solutions for their creation of the following manufacturers: Honeywell International, Inc. (USA), Druck (England), Kulite Semiconductor Products (USA), Motorolla (USA), "NIIFI" (Penza), PG "MIDA" (Ulyanovsk), NPK "VIP" (Ekaterinburg) and others. The basic parameters and characteristics of modern pressure sensors. Identified trends and areas for improvement of sensors based on MEMS.

Keywords: microelectromechanical systems (MEMS), pressure sensor, a semiconductor sensor, improvement, parameters, characteristics

### References

1. Belozubov E. M., Vasil'ev V. A., Gromkov N. V., Chernov P. S. Datchiki davleniya v Rossii i zarubezhom (Pressure sensors in Russia and abroad). *Metrologiya*, 2010, N. 10. P. 15–24.

2. **GOST 15467–79** Upravlenie kachestvom produktsii. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya (Product quality control. The basic concepts. Terms and definitions).

3. **Margelov A.** Datchiki davleniya kompanii Honeywell (Pressure Sensors from Honeywell), *Chip News* 2005. N. 7 (100). P. 11-12.

4. **PDCR** 800 Series URL: http://www.fzk.uni-hannover. de/fileadmin/institut/Ausstattung/Messinstrumente/Druckmes-sgeraete/PDCR800.pdf. (Data obrashcheniya — 25.06.2014).

5. **XTEL-1-SD-625.** URL: http://www.kulite.com/products.asp?p=4-1 (Data obrashcheniya – 25.06.2014).

6. **Semiconductor** *Technical Data*. URL: http://www.west-1. ru/uploads/tdpdf/ty647374\_e.pdf (Data obrashcheniya – 25.06.2014).

7. **Semiconductor** *Technical Data*. URL: http://www.kon-test.ru/datasheet/motorola/ mpx5999.pdf (Data obrashcheni-ya - 25.06.2014).

8. **Katalog** OAO "NIIFI". *Datchiki, preobrazovateli, sistemy* (Catalogue of "NIIFI." Sensors, transmitters, systems), URL:

http://www.niifi.ru/Pdfs/Catalogue\_2011.pdf. (Data obrashcheniya – 25.06.2014).

9. Barinov I. I., Pautkin V. E., Kozin S. A., Fedulov A. B. Mikroelektronnye datchiki fizicheskikh velichin na osnove MEMS-tekhnologii (Microelectronic sensors of physical quantities on MEMS technology), *Komponenty i tekhnologii*. 2010. N. 1. P. 24–27.

10. **Lur'e G. I.** *Datchiki davleniya dlya obshchepromyshlennogo primeneniya* (Pressure sensors for general industrial use), URL: http://www.manometr.com/lematt/rl74-1.pdf. (Data of Access — 25.06.2014).

11. **Kurtz Anthony P., Ned Alexander A., Epstein Alan H.** Ultra High Temperature, Miniature, SOI Sensors for Extreme Environments. *IMAPS International HiTEC 2004 Conference Santa Fe.* New Mexico, May 17–20, 2004. P. 1–11.

12. **XTEH-10LAC-190 (M)** *SERIES.* URL: http://www.a-tech.ca/doc\_series/XTEH-10LAC-190\_SuperHighTempLow GSensitivity\_ATI.pdf. (Data of Access - 25.06.2014).

13. **PG "MIDA".** *Katalogue*, URL: http://midaus.com/ docs/katalog.pdf. (Data obrashcheniya – 25.06.2014).

14. **NPK "VIP".** *Pervichnye preobrazovateli davleniya i sily* (Pressure transducer and force), URL: http://www.zaovip.ru/products/pressure\_transducers/. (Date of Access – 25.06.2014).

15. **NPP "Intor"**. *Datchiki davleniya* (Pressure sensors), URL: http://www.intor.ru/catalog/index/0/45. (Data of Access — 25.06.2014).

16. **Preobrazovateli** davleniya s normirovannym signalom (Pressure transmitters with normalized signal), URL: http://www.oooproma.ru/3.html (Date of Access - 25.06.2014).

17. **Minebea** Core Technology. Pressure sensors. URL: http://www.minebea-mcd.com/en/product/press/index.html (Date of Access – 26.06.2014).

18. **Patent RF** № 2430342 MPK G01L 9/00 Poluprovodnikovyi datchik davleniya s chastotnym vykhodnym signalom (A semiconductor pressure sensor frequency output signal), V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov, S. A. Moskalev. *Byul.* N. 27 ot 27.09.2011.

19. **Patent RF** № 2451270 MPK G01L 9/04 Poluprovodnikovyi datchik davleniya povyshennoi tochnosti (A semiconductor pressure sensor of high accuracy), V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov, S. A. Moskalev. *Byul.* N. 14 ot 20.05.2012.

20. **Gromkov N. V.** Matematicheskaya model' i analiz vliyaniya sobstvennykh shumov elementov skhemy korrektiruyushchego kanala na vykhodnoi signal izmeritel'nykh preobrazovatelei (Mathematical model and analysis of the effect of intrinsic noise correction circuit elements on the channel output signal transducers). *Izv. vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2007. N. 4. P. 152–165.

21. **ADZ NAGANO.** *Pressure transmitter.* URL: http://www. adz.de/pressure-transmitter.html. (Date of Access – 26.06.2014).

22. **Barinov I. N.** Vysokotemperaturnye tenzorezistivnye datchiki davlenii na osnove karbida kremniya. Sostoyanie razrabotok i tendentsii razvitiya (High Temperature Thin-film sensors based on silicon carbide. Development status and trends of). *Komponenty i tekhnologii.* 2010. N. 8. P. 64–71.

23. **Korlyakov A. V.** *Fiziko-tekhnologicheskie osnovy formirovaniya bazovykh elementoy mikrosistemnoi tekhniki* (Physical and technological basis for the formation of the basic elements of microsystems technology): Diss. na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk, LETI. 2010. 290 p.

24. Ned Alexander A., Kurtz Anthony D., Beheim Glenn, Masheeb Fawzia, Stefanescu Sorin. Improved SiC Leadless Pressure Sensors For High Temperature, Low and High Pressure Applications. *Twenty-First Transducer Workshop Lexington*, Maryland, June 22–23. 2004. P. 5–11.

### УДК 621.382.323

И. А. Глинский, инженер-исследователь, О. А. Рубан, инженер-исследователь,

**А. Н. Алёшин**, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб., **Н. В. Зенченко**, инженер-исследователь, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва **А. А. Мельников**, д-р тех. наук, проф., МГТУ МИРЭА

# РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ НЕМТ-ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Algan/Gan

Поступила в редакцию 17.07.2014

Представлены результаты расчета тепловых режимов сверхвысокочастотного HEMT-транзистора на основе гетероструктуры AlGaN/GaN, сформированной на подложках из SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Рассмотрены способы оптимизации тепловых режимов. Предложены различные варианты геометрии теплоотвода. Определена геометрия теплоотводящего элемента конструкции, позволяющего добиться наименьших значений максимальной температуры в HEMT-транзисторе. Результаты выполненных расчетов дают возможность численно оценить температуру нагрева HEMT-транзистора при различных вариантах конструкции, входных данных и внешних условиях на ранних стадиях проектирования.

Ключевые слова: НЕМТ-транзистор, удельное тепловыделение, тепловые режимы

### Введение

При проектировании изделий электронной техники (ИЭТ), таких как монолитные нтегральные схемы (МИС), проводится экспериментальная оптимизация гетероструктурных СВЧ-транзисторов в целях достижения заданных в техническом задании параметров и характеристик путем изготовления различных вариантов готовых устройств и их последующих испытаний.

Однако такой способ оптимизации является сложной, трудоемкой и затратной процедурой.

Поэтому для создания перспективных ИЭТ необходимо использовать современные программы проектирования [1—3]. Такие системы позволяют численно оценивать влияние различных конструктивных и технологических решений, что существенно уменьшает затраты и время на разработку устройства.

Один из этапов проектирования *HEMT*-транзистора это расчет его тепловых режимов, которые определяют значение максимальной температуры. Допустимыми режимами работы транзистора будут такие, при которых его температура нигде не превышает предельно допустимую, т. е. ту температуру, вплоть до которой гарантируется надежность прибора и соответствие электрических параметров техническим условиям.

Известно, что высокая температура оказывает негативное влияние на электронную систему, так как при нагреве:

— уменьшается мобильность носителей заряда, что приводит к ухудшению частотных характеристик устройства [4, 5];

- возрастают потери энергии вследствие экспоненциального роста тока утечки с увеличением температуры;

— возрастает сопротивление соединительных линий, что приводит к увеличению падений напряжения и возрастанию задержек в линиях, ухудшая тем самым характеристики и усложняя временной анализ и анализ шума;

- возникают необратимые процессы, связанные с дополнительным вплавлением и диффузией или же с потерей термической устойчивости, приводящей к выходу прибора из строя [6].

Цель настоящей работы — проведение расчета тепловых режимов работы НЕМТ-транзистора с точки зрения электрических и тепловых эффектов и их взаимосвязей, в том числе расчет распределения температур в НЕМТ-транзисторе. Результаты расчетов тепловых режимов НЕМТ-транзистора позволяют определить наиболее эффективный способ отвода теплоты.

### Описание математической модели *НЕМТ*-транзистора

Процессы, лежащие в основе работы НЕМТтранзистора, описываются уравнениями Максвелла, уравнением Пуассона, уравнением непрерывности и уравнением дрейфа-диффузии элементарных носителей электрического заряда.

В НЕМТ-транзисторе эффекты Пельтье и Томсона, а также нагрев в результате рекомбинации электронов и дырок пренебрежительно малы. В этом случае суммарное выделение теплоты на единицу объема, описывается выражением:

$$H = \left[ q_n \frac{\overline{|J_n|^2}}{\mu_n n} + q_p \frac{\overline{|J_p|^2}}{\mu_p p} \right], \tag{1}$$

где  $q_n$ ,  $q_p$  — заряд электрона и дырки, соответственно;  $J_n$ ,  $J_p$  — плотность электронного и дырочного тока, включающая дрейфовую и диффузионную компоненты;  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  — подвижность электронов и дырок, соответственно; р, n — концентрация электронов и дырок, соответственно. Единица измерения удельного тепловыделения — Вт/м<sup>3</sup>.

Вопрос определения зависимости сопротивления от температуры требует использования зависимости проводимости примесного GaN от температуры, в которой в общем случае следует учитывать зависимость от температуры подвижности основных носителей заряда:

$$\lambda(N, T) = \left(q_e N \mathbf{e}^{\frac{-\Delta E}{2k_B T}} \mu(N, T)\right)^{-1}, \qquad (2)$$

где  $\lambda$  — удельное сопротивление примесного полупроводника; N — концентрация легирующей примеси; T — температура; q<sub>e</sub> — модуль заряда электрона;  $\Delta E$  — глубина залегания энергетического уровня примеси относительно соответствующей зоны; k<sub>B</sub> — постоянная Больцмана; µ — подвижность соответствующего носителя заряда.

Следующее соотношение описывает зависимость подвижности одновременно от концентрации легирующей примеси N и температуры T:

$$\mu_{i}(N, T) = \mu_{\max,i}(T_{0}) \times \left[\frac{\mu_{\min,i} + \mu_{\max,i}\left(\frac{N_{g,i}}{N}\right)^{\gamma_{i}}}{\mu_{\max,i} - \mu_{\min,i}}\right] \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{\beta_{i}}, \quad (3)$$

$$\times \frac{1 + \left[\frac{\mu_{\min,i} + \mu_{\max,i}\left(\frac{N_{g,i}}{N}\right)^{\gamma_{i}}}{\mu_{\max,i} - \mu_{\min,i}}\right] \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{\alpha_{i} + \beta_{i}}, \quad (3)$$

где i = n, p — концентрация электронов и дырок, соответственно; N — концентрация легирующей примеси; T — температура;  $T_0 = 300$  K;  $\mu_{\max,i}$  характеризует подвижность в слаболегированных образцах; µ<sub>min,i</sub> — характеризует подвижность в условиях сильного легирования;  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$  — постоянные коэффициенты исходной гетероструктуры; N<sub>g,i</sub> — концентрация соответствующих носителей заряда исходной гетероструктуры.

### Расчет тепловых режимов НЕМТ-транзистора

Расчет тепловых режимов НЕМТ-транзистора, состоит из двух этапов:

- нахождение значения удельного тепловыделе-• ния в канале транзистора;
- определение распределения температуры в транзисторе.

Для определения значений удельного тепловыделения была построена структура НЕМТ-транзистора (рис. 1, см. четвертую сторону обложки) в программе для моделирования полупроводниковых приборов на основе модели, приведенной в ра-

![](_page_44_Figure_0.jpeg)

Рис. 2. Распределение удельного тепловыделения, при значении напряжения на затворе –1 В

боте [7, 8]. Исходными данными для геометрии послужили топология и структура *HEMT*-транзистора, входящего в состав усилителя мощности *L*-диапазона.

Структура *HEMT*-транзистора состоит из слоев и в каждом заложены свойства соответствующего материала. Свойства материалов взяты из справочника [9]. Структура *HEMT*-транзистора имеет следующие типичные параметры:

Материал подложки	SiC и Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Толщина буферного слоя GaN	1 мкм
Толщина легированного слоя <i>n</i> -GaN	10 нм
Концентрация донорной примеси	$10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Толщина нелегированного слоя AlGaN	30 нм
Мольная доля AlN в AlGaN	0,28
Подвижность основных носителей заряда	$2000 \text{ cm}^2/\text{B}\cdot\text{c}$

Спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации в *HEMT*-транзисторе имитируются с помощью области пространственного заряда на границе раздела барьерного AlGaN и буферного GaN слоев.

Рабочий режим данного *HEMT*-транзистора соответствует напряжению на стоке 15 В и напряжениям на затворе от -1 до -5 В. При напряжениях на затворе от -1 до -3 В транзистор открыт с разной степенью сужения канала, а при значении напряжения на затворе от -4 В транзистор закрыт.

В результате сужения канала в подзатворной области возникает источник теплоты, рассчитанное распределение удельного тепловыделения которого представлено на рис. 2.

На этом рисунке видно, что распределение удельного тепловыделения неравномерно и максимального значения оно достигает в правой части подзатворной области, в слое *n*-GaN. Рассчитанные значения удельного тепловыделения сведены в табл. 1.

Из полученных результатов видно, что в случае с подложкой из SiC при сдвиге напряжения от -1 и до -3 В, т. е. при сужении канала, значение удельного тепловыделения возрастает. При перекрытом канале значение удельного тепловыделения незначительно снижается и при дальнейшем сдвиге напряжения в отрицательную сторону остается практически неизменным. В случае, когда материал подложки —  $Al_2O_3$ , значения удельного тепловыделения несколько выше.

Для расчета распределения температуры была создана упрощенная геометрия *HEMT*-тран-

зистора по топологии усилителя мощности L-диапазона в программе для теплового моделирования. Кристалл усилителя мощности L-диапазона имеет следующие размеры:  $3000 \times 2000 \times 100$  мкм. В расчетах использовали три типа геометрии: без теплоотвода, с теплоотводом толщиной 500 мкм и с теплоотводом толщиной 1000 мкм. Теплоотвод выполнен из меди и имеет площадь  $9 \times 6$  мм.

В расчетах сделаны следующие допущения:

- материалы, используемые в конструкции, имеют изотропную теплопроводность;
- теплофизические свойства материалов не зависят от температуры;
- во внутренних частях конструкции теплообмен осуществляется только за счет теплопроводности;
- между слоями нет контактных сопротивлений. В расчет заложены следующие начальные условия:
- свойства материалов (теплопроводность, теплоемкость, плотность);

Рассчитанные значения удельного тепловыделения

в <i>HEMT</i> -транзисторе на подложках из SiC и $Al_2O_3$				
Напряжение на затворе, В	Значение удельного тепловыделения в <i>HEMT</i> -транзисторе на подложке из SiC, Bт/м <sup>3</sup>	Значение удельного тепловыделения в <i>HEMT</i> -транзисторе на подложке из Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Bт/м <sup>3</sup>		
-1	$1,91 \cdot 10^{17}$	$2,05 \cdot 10^{17}$		
-2	$3,41 \cdot 10^{17}$	$3,75 \cdot 10^{17}$		
-3	$4,25 \cdot 10^{17}$	$4,43 \cdot 10^{17}$		
-4	$3,73 \cdot 10^{17}$	$3,91 \cdot 10^{17}$		
-5	$3,67 \cdot 10^{17}$	$3,89 \cdot 10^{17}$		

Таблица 1

![](_page_45_Figure_0.jpeg)

Рис. 3. Распределение температуры в модели *HEMT*-транзистора на подложке из  $Al_2O_3$  и с теплоотводом толщиной 1 мм, при напряжении на затворе -3 В и времени работы 1 с

- конвективный теплообмен с окружающей средой, характеризуемый коэффициентом теплоотдачи, равным 10 Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует естественной конвекции в воздухе;
- температура окружающей среды 22 °С;
- начальная температура модели 22 °С;
- источником теплоты в *HEMT*-транзисторе является подзатворная область в канальном слое, для которой задано значение удельного тепловыделения.

Расчет выполнен для *HEMT*транзистора на подложке из SiC и  $Al_2O_3$  при напряжениях на затворе -1 и -3 В. Рассчитанные данные представлены в табл. 2.

Из полученных результатов видно, что при времени включения транзистора на 1 с максимальная температура, при напряжении −1 В составляет 383 °С, и соответственно устройство перегорит. Использование теплоотвода позволяет ограничить максимальные значения температур в пределах ≈28...30 °С.

Необходимо отметить разницу в максимальных температурах при различных напряжениях: для геометрии с теплоотводом 1 мм, при времени работы 15 с она достигает 47 °С.

Из табл. 2 видно, что в *HEMT*транзисторе с подложкой из

 $Al_2O_3$  при времени работы 1 с максимальные температуры больше на 25...30 °С, по сравнению с максимальными температурами в транзисторе с подложкой из SiC. Это объясняется разницей между свойствами материалов. По сравнению с SiC,  $Al_2O_3$  имеет более высокую плотность (3960 и 3200 кг/м<sup>3</sup>, соответственно), в 2 раза большую теплоемкость (соответственно 850 и 490 Дж · кг/К) и меньшую теплопроводность (35 и 490 Вт/м · К, соответственно).

Таблица 2

Время	Толщина	$T_{\text{max}},^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}},^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}$ , °C
работы, с	теплоотвода, мкм	( $U_g = -1$ B; SiC)	( $U_g = -3$ B; SiC)	$(U_g = -1 \text{ B}; \text{Al}_2\text{O}_3)$	( $U_g = -3$ B; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
$1 \cdot 10^{-6}$	_	22,8	23,8	23,5	25,4
	500	23,6	25,6	24,1	26,6
	1000	23,6	25,5	24,0	26,5
$3 \cdot 10^{-4}$		25,4	29,6	36,2	53,8
	500	25,2	29,1	36,8	55,1
	1000	25,2	29,1	36,5	54,4
1		383,4	830,4	268,6	573,6
	500	30,9	41,9	47,8	79,6
	1000	28,2	35,9	44,5	72,4
15	_	959,7	2119,6	921,4	2033,9
	500	89,2	172,3	105,5	208,7
	1000	60,2	107,5	76,4	143,7
45	_	995,1	2198,7	1021,3	2257,4
	500	164,8	341,5	180,8	377,2
	1000	111,3	221,8	127,3	257,4

Рассчитанные значения температуры в *НЕМТ*-транзисторе на подложках из SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

На рис. 3 продемонстрирован характер распределения температуры в модели *HEMT*-транзистора на подложке из  $Al_2O_3$ , на котором видно, что максимальный нагрев происходит в середине секций *HEMT*-транзистора и составляет 75 °C, а в крайних подзатворных областях нагрев на несколько градусов ниже и равен 55 °C. Это происходит потому, что секции транзистора расположены близко друг к другу, т. е. возникает эффект саморазогрева. Когда подложка из SiC, разница температуры в центре и на периферии секций транзистора ниже и составляет около 5 °C, и само распределение более равномерное.

Одним из способов повышения эффективности конвективного теплообмена с окружающей средой является создание оптимальной геометрии теплоотвода. Были сравнены различные варианты теплоотводов: толщиной 0,25 и 0,5 мм, площадью  $12 \times 9$  мм и толщиной 0,5 и 1 мм, площадью  $9 \times 6$  мм. Рассчитанные данные приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что при времени работы от 15 с оптимальным оказался теплоотвод толщиной 0,5 мм и площадью  $12 \times 9$  мм. Интересно также, что теплоотводы  $9 \times 6 \times 1$  мм и  $12 \times 9 \times 0.25$  мм имеют схожее максимальное значение температуры, при времени работы 15 с разница составляет 2 °С, т. е. можно подобрать теплоотвод под конструкторские требования к устройству в целом.

Другим способом оптимизации тепловых режимов является использование теплоотводящего элемента конструкции (ТЭК), который расположен между ИЭТ и теплоотводом, из материала обладающего высокой теплопроводностью. Между теплоотводом толщиной 500 мкм и подложкой толщиной 100 мкм был добавлен ТЭК из алмаза толщиной 100 мкм, площадью  $3 \times 2$  мм. Также был рассчитан *HEMT*-транзистор без ТЭК с теплоотводом толщиной 500 мкм, но с подложкой толщи-

Таблица	ι3
Рассчитанные значения температуры в НЕМТ-транзисторе	
на подложке из SiC и напряжении на затворе –3 В	
с различными вариантами геометрии теплоотвола	

P	Варианты геометрии теплоотвода, мм						
время работы,	$0,5 \times 9 \times 6$	$1 \times 9 \times 6$	$0,25 \times 12 \times 9$	$0,5 \times 12 \times 9$			
С	T <sub>max</sub> , °C						
$1 \cdot 10^{-6}$	25,6	25,5	26,5	26,5			
$3 \cdot 10^{-4}$	29,1	29,1	30,2	30,1			
1	41,9	35,9	44,3	37,6			
15	172,3	107,5	160,8	105,2			
45	341,5	221,8	280,9	199,5			

Рассчитанные значения температуры в *HEMT*-транзисторе с ТЭК при толщине подложки 100 мкм и без ТЭК при толщине подложки 200 мкм, с разными вариантами материала подложки — SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

при напряжении на затворе –3 В

		Варианты материала подложки	
Время работы, с	Варианты геометрии (толщина подложки, мкм)	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		$T_{\rm max}$ ,°C	
$1 \cdot 10^{-6}$	Без ТЭК, подложка — 200	25,5	26,4
	С ТЭК, подложка — 100	23,3	23,2
$3 \cdot 10^{-4}$	Без ТЭК, подложка — 200	29,1	54,7
	С ТЭК, подложка — 100	26,5	47,5
1	Без ТЭК, подложка — 200	41,5	87,3
	С ТЭК, подложка — 100	38,5	69,1
15	Без ТЭК, подложка — 200	170,7	214,0
	С ТЭК, подложка — 100	165,9	195,4
45	Без ТЭК, подложка — 200	338,7	380,5
	С ТЭК, подложка — 100	327,2	355,8

ной 200 мкм. Рассчитанные данные приведены в табл. 4.

Из результатов расчета видно, что данный ТЭК позволяет снизить значения максимальной температуры в НЕМТ-транзисторе: при времени работы 1 с в случае подложки из SiC — на 3 °C и в случае с подложкой из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — на 18,2 °С. Наибольшую эффективность теплоотводящий элемент конструкции показал в сочетании с подложкой из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Таким образом, есть возможность применить сапфировую подложку, снизив ее негативные тепловые характеристики, такая подложка имеет преимущества в виде распространенности и более низкой цены. Тем не менее сравнение геометрии *НЕМТ*-транзистора с подложкой из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ТЭК и теплоотводом 500 мкм, и транзистора с подложкой из SiC и теплоотводом 500 мкм показало, что при времени работы 1 с значение максимальной температуры в первом варианте составило 69 °C, а во втором варианте — 41 °C, т. е. последний вариант будет более предпочтителен.

### Заключение

По результатам выполненной работы определены следующие рекомендации:

 для ИЭТ, работающих в СВЧ диапазоне, оптимальным является использование SiC в качестве материала подложки;

- для повышения надежности работы ИЭТ необходимо использование теплоотвода;
- для повышения эффективности работы теплоотвода необходимо добавить ТЭК между ИЭТ и теплоотводом из материала, обладающего высокой теплопроводностью, например алмаза.

Таким образом, результаты выполненных расчетов дают возможность численно оценить температуру нагрева *HEMT*-транзистора при различных вариантах конструкции, входных данных, а также внешних условий на ранних стадиях проектирования, что позволяет отказаться от дорогостоящих и часто трудновыполнимых экспериментов.

Работа выполнена в организации Головного исполнителя ОКТР — ИСВЧПЭ РАН в рамках реализации Постановления Правительства России от 09 апреля 2010 года № 218, договора № 02.G36.31.0005 от 23 мая 2013 г. между ОАО "НПП "Исток" им. Шокина" и Минобрнауки России и договора № 33/211-13 от 22 февраля 2013 г. между ИСВЧПЭ РАН и ОАО "НПП "Исток" им. Шокина".

### Список литературы

1. **Synopsys** TCAD. URL: <u>http://www.synopsys.com/tools/</u> tcad/Pages/default.aspx

2. Silvaco TCAD Atlas. URL: http://www.silvaco.com

3. ANSYS. URL: <u>http://www.ansvs.com</u>

4. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990, 678 с.

5. Pernot J., Zawadski W., Contreras S., Robert J. L., Neyret E., Di Cioccio L. Electrical transport in *n*-type 4H silicon carbide // J. Appl. Phys. 2001. V. 90, N. 4. P. 1869–1878.

6. **Tsai S. H., Kang S. M.** Cell-Level Placemen for Improving Substrate Thermal Distribution // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2000. V. 19, N. 2. P. 253–266.

7. **Newham W. S.** Development of AlGaN/GaN high electron mobility transistors (HEMTS) on diamond substrates. — Master thesis. Monterey, California, USA: Naval Postgraduate School, 2006.

8. **Salm R. P.** Thermal modeling of GaN HEMTS on sapphire and diamond. Master thesis. Naval Postgraduate School. Monterey, California, USA, 2005.

9. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

I. A. Glinskiy, Research Engineer IUHFSE RAS, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru

O. A. Ruban, Research Engineer IUHFSE RAS, e-mail: myx.05@mail.ru

A. N. Aleshin, Head of the Laboratory IUHFSE RAS, e-mail: a.n.aleshin@mail.ru

N. V. Zenchenko, Research Engineer IUHFSE RAS, e-mail: morfeus812@mail.ru

A. A. Melnikov, Professor MGTU MIREA, e-mail: melnikov@mirea.ru

Institute of Ultra-High-Frequencies Semiconductor Electronics Russian Academy of Science (IUHFSE RAS)

### Calculation of the Thermal Modes in the HEMT Based Heterostructure AlGaN/GaN

This paper presents calculation results of the thermal modes in the HEMT based heterostructure AlGaN/GaN, grown on a SiC or a  $Al_2O_3$  substrate. Examined ways to optimize thermal operating modes. Different versions of the geometry of the heatsink were proposed. The geometry heatsink element that allows to achieve lowest values of the maximum temperature in the HEMT-transistor is determined. The results of the calculations allow us to estimate numerically the temperature HEMT of different design, input data, and external conditions in the early development stages.

Keywords: HEMT; specific heat; thermal modes

### References

1. **Synopsys** TCAD. URL: <u>http://www.synopsys.com/</u> tools/tcad/Pages/default.aspx

2. Silvaco TCAD Atlas. URL: http://www.silvaco.com

3. ANSYS. URL: http://www.ansys.com

4. Bonch-Bruebich B. L., Kalahnikov C. G. Phisika poluprovodnikov. M.: Nauka, 1990, 678 c.

5. Pernot J., Zawadski W., Contreras S., Robert J. L., Neyret E., Di Cioccio L. Electrical transport in *n*-type 4H silicon carbide. *J. Appl. Phys*, 2001. V. 90, N. 4. P. 1869–1878.

6. **Tsai S. H., Kang S. M.** Cell-Level Placemen for Improving Substrate Thermal Distribution. *IEEE Transactions on* 

Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2000. V. 19, N. 2. P. 253–266.

7. Newham W. S. Development of AlGaN/GaN high electron mobility transistors (HEMTS) on diamond substrates — Master thesis. Naval Postgraduate School. Monterey, California, USA, 2006.

8. **Salm R. P.** Thermal modeling of GaN HEMTS on sapphire and diamond — Master thesis. Naval Postgraduate School. Monterey, California, USA, 2005.

9. Babichev A. P., Babuhkina N. A., Bratkovckiy A. M. i dr. *Phisicheckie velichini*. Cpravochnik. M.: Energoatomisdat, 1991. 1232 c.

А. Н. Семёнов, мл. науч. сотр., ФГБУ НПК "Технологический центр", г. Москва, e-mail: A.Semenov@tcen.ru, А. С. Шалимов, канд. техн. наук, науч. сотр., Е. В. Зуев, аспирант, НИУ "МИЭТ", г. Москва, e-mail: evzhome@mail.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ НА БМК 5503 МИКРОСХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЕМКОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ

### Поступила в редакцию 11.06.2014

Описывается возможность создания микросхемы емкостного преобразователя линейного ускорения на основе базового матричного кристалла серии 5503. Представлены результаты моделирования устройства и его основные параметры. Описывается реализация перспективного метода управления чувствительным элементом преобразователя, позволяющего снизить нелинейность статической характеристики по сравнению с аналогами. Рассматриваются аналоговые единицы, реализованные на кристалле.

Ключевые слова: матричная ИС, преобразователь физических величин, емкостной акселерометр

В настоящее время появилась тенденция использования полузаказных микросхем на основе базовых матричных кристаллов (БМК) в аппаратуре специального назначения. Они обеспечивают сочетание высокой степени интеграции БИС с быстротой создания и относительно низкими объемами производства, что является экономически нерентабельным для заказных БИС. Помимо низкой потребляемой мощности, высокой надежности БМК имеется возможность объединения цифровой и аналоговой обработки информации.

Одним из направлений, где могут использоваться микросхемы данного типа, являются технологии МЭМС-устройств. Данные устройства используются в различных областях современной техники [1] и представляют собой результат работы целого коллектива технологов, конструкторов и схемотехников.

Среди широкого спектра возможных реализаций изделий микросистемной техники следует выделить емкостные акселерометры.

Емкостной акселерометр состоит из двух основных частей: чувствительного элемента (ЧЭ) и электронного узла (ЭУ). ЧЭ осуществляет первичное преобразование измеряемого ускорения в емкость. ЭУ предназначен для измерения эквивалентной емкости и преобразования полученной информации в сигнал, форма которого удобна для потребителя.

Форма сигнала может быть аналоговая или цифровая. В первом случае полезную информацию несет в себе один из параметров: ток, напряжение, частота, фаза. Во втором случае передача информации осуществляется по различным интерфейсам: SPI, I2C, UART и т. д. Независимо от формы представления выходного сигнала перед разработчиком МЭМС-акселерометра встает ряд проблем.

Основная проблема заключается в начальной нелинейности перемещения ротора [2] — подвижной части ЧЭ при воздействии линейного ускорения (данный результат относится к ЧЭ маятникового типа, выпускаемых на кафедре "Микроэлектроника" НИУ "МИЭТ"):

$$\alpha = \mathbf{e}^{-\xi\omega_0 a} \left( \cos(\omega_0 a \sqrt{4-\xi^2}) + \sin(\omega_0 a \sqrt{4-\xi^2}) \right) + \frac{ml}{I} \cdot \frac{a-2\xi}{\omega_0^2}, \tag{1}$$

где  $\alpha$  — угол поворота ротора;  $\xi$  — коэффициент демпфирования;  $\omega_0$  — собственная частота конструкции; *m* — масса ротора; *a* — ускорение; *l* — расстояние от центра масс до центра площадки на статоре; *I* — момент инерции.

Это происходит при прямом преобразовании и применяется для небольших диапазонов ускорений. Как только у разработчика появляется необходимость расширить диапазон ускорения, снизить нелинейность и расширить полосу частот преобразования, применение такого подхода становится невозможным.

Альтернативой является компенсационный метод преобразования ускорения в напряжение, при котором реализуется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор, управляющий положением ротора ЧЭ. Этот подход позволяет значительно улучшить параметры изделия за счет ослабления или полного устранения влияния ЧЭ на выходные параметры схемы.

![](_page_49_Figure_0.jpeg)

Рис. 1. Структурная схема обработки сигнала

![](_page_49_Figure_2.jpeg)

Рис. 2. Статическая характеристика акселерометра

На кафедре "Микроэлектроника" НИУ "МИЭТ" была разработана *Spice*-модель ЧЭ вместе со схемой обработки сигнала на основе компенсационного метода. Структурная схема обработки сигнала представлена на рис. 1.

Подобные модели разрабатывались ранее [2]. Результаты моделирования показали, что данная схема позволяет значительно снизить нелинейность статической характеристики, одна из которых представлена на рис. 2. В результате проведенного моделирования были получены следующие основные параметры:

– масштабный коэффициент – 471,7 мB/g;

- смещение нуля - 61,4 mg;

— нелинейность — 0,41 %.

В НПК "Технологический центр" совместно с сотрудниками кафедры "Микроэлектроника" НИУ "МИЭТ" была разработана микросхема управления емкостным преобразователем линейного ускорения на основе БМК серии 5503.

Микросхема содержит в себе все необходимые активные элементы схемы: усилители, компараторы, аналоговые ключи, генераторы. Фрагмент электрической схемы представлен на рис. 3.

Реализация ее на основе БМК способствует сокращению габаритных размеров готового устройства. Это позволит уменьшить уровень шумов, наводок и паразитных эффектов и повысить качество

![](_page_49_Figure_12.jpeg)

![](_page_49_Figure_13.jpeg)

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 11, 2014 -

![](_page_50_Figure_0.jpeg)

Рис. 4. Фрагмент топологии схемы емкостного преобразователя линейных ускорений

изделия. Фрагмент топологии разработанной схемы представлен на рис. 4.

На рис. 4 мы можем видеть фрагменты трассировки, саму ячейку БМК, номер, серию зашивки и т. д.

В настоящее время данная схема изготовляется.

#### Список литературы

1. Фёдоров Р. А., Шелепин Н. А. SPICE-модель электретного преобразователя физических величин // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА, 2006. № 4.

2. Фёдоров Р. А., Шелепин Н. А. SPICE-модель электростатического конденсаторного преобразователя физических величин // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2006. № 3.

**A. N. Semyonov**, Junior Researcher, Research and Production Complex "Technological Center", e-mail: A.Semenov@tcen.ru, **A. S. Shalimov**, Researcher, **E. V. Zuev**, Post Graduate, National Research University "MIET", e-mail: 85e@mail.ru, evzhome@mail.ru

# Research of Availability of IC Based on Array Chip 5503 for Capacitive Transducer of Linear Acceleration

This article describes the possibility of creation a microcircuit for capacitance transducer based on the array chip series 5503. The results of mixed-mode simulation of analog and micromechanical device parts are presented. The main characteristics are also given. The article also describes the implementation of a perspective method of driving a sensing element, which allows to reach less nonlinearity of static characteristic in comparison with the analogous ones. The consideration is also given to analog units implemented on the array chip.

Keywords: array chip, physical quantities transducer, capacitive accelerometer

#### References

1. **Fyodorov R. A., Shelepin N. A.** SPICE-model' elektronnogo preobrazovatelya fizicheskin velichin. *Izvestiya VUZov. Electronika.* 2006. N. 4. 2. Fyodorov R. A., Shelepin N. A. SPICE-model' elektrostaticheskogo kondensatofnogo preobrazovatelya fizicheskih velichin. *Oboronnyii kompleks — nauchno-tehnicheskomu pro*gressu Rossii. 2006. N. 3.

# Применение MHCT *Application of MNST*

УДК 621.382.002

**В. А. Бабуров**, мл. науч. сотр., **К. Н. Томош**, инж.-исследователь, **В. Ю. Павлов**, инж.-исследователь, e-mail: Sky77781@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

### МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Поступила в редакцию 17.06.2014

Описаны некоторые из видов современных инструментов обучения и проверки знаний у специалистов в области плазмохимических технологий. Приведены примеры дистанционного курса обучения и проверки знаний на оборудовании, представленном во многих лабораториях по производству микроэлектронных полупроводниковых устройств. Информация в статье дает понимание работы на плазмохимическом оборудовании и приводит примеры возможности реализации тех или иных процессов.

**Ключевые слова:** плазма, дистанционное обучение, виртуальная лаборатория, плазмохимическое травление и осаждение, тестирование

### Введение

Электронная промышленность в России в настоящее время переживает не самые лучшие времена. В силу отсутствия необходимых современных норм и документов, регламентирующих порядок подготовки кадров и порядок работы на современном предприятии с новым оборудованием, мы сталкиваемся с типичной ошибкой всех начинающих производителей. Каждый производитель пытается выпустить продукт, отвечающий определенным критериям. Задача инженеров и технологов произвести продукт, отвечающий этим критериям, исходя из материалов и оборудования, представленных на производстве. В результате производитель или другой субъект, занимающийся исследованиями или разработкой, сталкивается с проблемой поиска кадров, способных решить задачу исходя из критериев и условий, представленных на предприятии. Выпускники вузов изучают профильные предметы в широком охвате, что зачастую приводит к "переучиванию" их на месте. Для того чтобы сократить временной интервал переучивания на месте и оптимизации знаний под конкретное производство, МИРЭА совместно с ИСВЧПЭ РАН и СПбГУ для РОСНАНО подготовили комплекс программного дистанционного обучения и специалистов по направлению "Плазмохимическое травление и осаждение материалов". Данный продукт дает понимание процессов и позволяет подготовить высокоэффективных специалистов в области плазмохимических технологий для производства микроэлектронных изделий [1].

### Виртуальные лаборатории

Программный продукт представляет собой виртуальные лаборатории (ВЛ) по направлениям плазмохимического травления и плазмохимического осаждения. Для обучения специалистов были использованы установки плазмохимического травления и осаждения Sentech SI500 и Plasmalab 100 [2, 3] (рис. 1).

Данное оборудование довольно распространено на производственных и исследовательских площадках электронной промышленности. Широкий спектр плазмохимического оборудования и типов плазмохимических источников, представленный на рынке, дает возможность проводить плазмохимические процессы с различными комбинациями технологических параметров [4]. Если взять две единицы оборудования различных производителей и провести процессы травления для получения определенной геометрии рисунка в

![](_page_52_Picture_0.jpeg)

Рис. 1. Установки плазмохимического травления и осаждения Sentech S1500 и Plasmalab100 и их 3D-модели

фоторезисте, полупроводнике или металле, то мы увидим на 90—95 % одинаковые результаты при различных параметрах технологического процесса. Отличия возможны только в случае достижения геометрических размеров 80...100 нм и высокой скорости получения рельефа. Данный результат свидетельствует о том, что, выбрав оборудование производителей Sentech и Oxford Ins в качестве тестовых единиц для электронного обучения, специалист освоит и/или подтвердит свою квалификацию на 90—95 %.

Для охвата возможного применения знаний специалиста по плазмохимии выделены следующие виртуальные лаборатории с лабораторными работами.

1. Плазмохимическое травление (ПХТ) слоев Si и *p*-Si.

2. ПХТ слоев диэлектриков.

3. ПХТ слоев металлизации.

4. ПХТ слоев *low-k* диэлектриков.

5. ПХ удаление фоторезиста.

6. Формирование рельефа в слоях типа A(III)B(V).

7. Осаждение оксида кремния SiO<sub>2</sub>.

8. Осаждение поликремния Si.

9. Осаждение нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

10. Осаждение фосфорносиликатного стекла ФСС.

11. Осаждение вольфрама W.

12. Осаждение нитрида титана TiN.

Каждая виртуальная лаборатория включает в себя лабораторные работы (ВЛР), охватывающие широкий спектр прикладных задач. Лабораторные работы позволяют как оценить знания теоретического материала, так и закрепить практические навыки работы в условиях виртуального оборудования. Структура ВЛ представлена на рис. 2.

Программа дает возможность проводить проверку знаний в любом сегменте ВЛ, кроме контрольных работ. Контрольные работы можно выполнить только после прохождения полного курса и проверки знаний по всему материалу.

Теоретический материал описывает ключевые аспекты введения в плазмохимические процессы осаждения и травления различных материалов. Теория подготовлена таким образом, что любой специалист по плазмохимии может как закрепить и проверить свои знания, так и найти

материалы, связанные с конкретным производством. Для усвоения и закрепления знаний материал подготовлен исходя из современных условий работы с плазмохимическими процессами и базовых знаний теории плазмохимии.

Сборка модели установки направлена на закрепление знаний и понимания принципов плазмохимического травления или осаждения различных материалов. Данный сегмент описывает возможность виртуальной сборки различных комбинаций оборудования для выполнения конкретной задачи, будь то травление или осаждение в различных условиях. На рис. 3. показан пример эскизной сборки модели установки для проведения процессов. Она дает понимание как структуры самого оборудования, так и части периферийной инфраструктуры для корректной работы установки.

![](_page_52_Figure_22.jpeg)

Рис. 2. Структура виртуальной лаборатории

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 11, 2014 -

![](_page_53_Figure_0.jpeg)

Рис. 3. Один из вариантов сборки обобщенной установки ПХТ или ПХО

Отработка навыков работы с установкой погружает тестируемого в виртуальную лабораторию, где он может понажимать кнопки и наглядно увидеть отклик в виде запуска компрессора или открытия шлюза. Виртуальная лаборатория — это пространство, в котором расположено технологическое оборудование со всей инфраструктурой. Испытуемый как бы погружается в виртуальную атмосферу технологической лаборатории и может выполнять любые манипуляции с оборудованием, газовыми баллонами, компрессором, компьютером. Можно сказать, что тестируемому дают в руки джойстик для симулятора, как например, для управления самолетом, но в нашем случае это джойстик для работы с технологическим оборудованием. Виртуальная лаборатория с элементами инфраструктуры показана на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки).

Контрольные работы обучаемые выполняют после прохождения всех этапов обучения и отработки навыков работы с оборудованием. Контрольные работы из перечня выбираются случайным образом. Выбор ответов оценивается по методу весов. Каждый из вопросов имеет свой вес и соответственно при выборе правильного и/или похожего варианта баллы начисляются по-разному. При неправильном ответе система выдает сигнал о том, что ответ не верен. Для наглядности правильности ответов компьютер формирует график зависимости введенных значений (рис. 5). Обучаемый получает

![](_page_53_Figure_5.jpeg)

![](_page_53_Figure_6.jpeg)

корректные графики при правильном ответе в тестовых вопросах. Тем самым формирует, изучает и запоминает приближенные зависимости результатов от технологических параметров.

### Заключение

Представленный продукт является одним из ключевых наборов модулей для специалистов, участвующих в разработке и изготовлении микроэлектронных устройств. В скором времени на рынок выйдут продукты, отвечающие за литографические, напылительные и химические процессы, а также промышленный дизайн и компьютерное моделирование приборов. Данные продукты дают комплексное решение подготовки и проверки знаний специалистов, работающих на предприятиях электронной промышленности. При этом продукты настолько универсальны, что подходят как производителям МЭМС, Si-ориентированным производителям, так и разработчикам СВЧ устройств. Для перехода на более новый уровень программы можно оснастить устройствами дополненной реальности на примере зарубежных производителей [5]. В данном случае участник полностью погружается в систему виртуальной реальности, проводит процессы, делает измерения, анализирует полученные данные с построением трехмерных моделей графиков и получением оптимумов для решения конкретной задачи. Также в данном случае специалист приучается к соблюдению электронной гигиены и правильным манипуляциям с оборудованием. В случае неправильных действий система сама подскажет или обратит внимание обучаемого на ошибку.

#### Список литературы

1. Зайцев А. А., Бабуров В. А., Щука А. А., Шишкин В. И. Виртуальная лаборатория "Плазмохимическое травление" // Сборник докладов конференции "Современные информационные коммуникационные технологии в высшем образовании: новые образовательные программы, педагогика с использованием e-learning и повышение качества образования", 2013. 118 с.

2. http://www.plasmasystem.ru/

3. http://www.eavangard-semi.ru/si500

4. **Томош К. Н.** Характеристики и использование ВЧ и СВЧ разрядов при создании твердотельных полупроводни-ковых приборов // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 5. С. 47—52.

5. http://digit.ru/development/20140319/413814091.html

V. A. Baburov, Junior Researcher, e-mail: baburov\_v@mail.ru, K. N. Tomosh, Research Engineer,

V. Yu. Pavlov, Research Engineer, e-mail: vl-pavlov@mail.ru

Institute of Ultra-High-Frequencies Semiconductor Electronics Russian Academy of Science (IUHFSE RAS)

# Modular System of Distance Learning and Testing of Experts in the Field of Plasma Chemical Processes

Some types of modern instruments of training and examinations at experts in the field of plasma chemical technologies are reviewed. Examples of a remote course and examination at the equipment presented in much laboratories on production of microelectronic semiconductor devices are given. Information in article gives understanding of work at the plasma chemical equipment and gives examples of realization possibility processes.

Keywords: plasma, distance learning, virtual laboratory, plasma chemical etching and deposition, testing

#### References

1. Zajcev A. A., Baburov V. A., Shchuka A. A., Shishkin V. I. Virtual'naja laboratorija "Plazmohimicheskoe travlenie". Sbornik dokladov konferencii "Sovremennye informacionnye kommunikacionnye tehnologii v vysshem obrazovanii: novye obrazovatel'nye programmy, pedagogika s ispol'zovaniem e-learning i povyshenie kachestva obrazovanija", 2013. 118 p.

- 2. http://www.plasmasystem.ru/
- 3. http://www.eavangard-semi.ru/si500

4. **Tomosh K. N.** Harakteristiki i ispol'zovanie VCh i SVCh razrjadov pri sozdanii tverdotel'nyh poluprovodnikovyh priborov. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2014. N. 5. P. 47–52.

5. http://digit.ru/development/20140319/413814091.html

## Рекомендации по оформлению материалов для публикации в журнале "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

### МАТЕРИАЛЫ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ В РЕДАКЦИЮ

- Статья, оформленная в соответствии с требованиями.
- Таблицы, иллюстрации и перечень подрисуночных подписей.
- Сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, занимаемая должность, домашний и служебный адреса, телефоны, факс, e-mail).
- Статья на электронном носителе.
- Англоязычная информация.

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА СТАТЬИ

- 1. Индекс УДК размещается в левом верхнем углу первой страницы.
- Сведения об авторах на русском языке размещаются перед названием статьи и включают инициалы и фамилию авторов с указанием их ученой степени, звания, должности и названия организации и места ее расположения (если это не следует из ее названия). Указывается также e-mail и/или почтовый адрес хотя бы одного автора или организации.
- 3. За сведениями об авторах следует название статьи.
- 4. После названия статьи отдельным абзацем дается **аннотация**, отражающая содержание статьи (что в ней рассмотрено, приведено, обосновано, предложено и т. д.).
- 5. Затем следуют ключевые слова.
- 6. Текст статьи.
- 7. Список литературы.
- 8. Англоязычная информация.

### АНГЛОЯЗЫЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### (СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ ЗАРУБЕЖНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ):

- инициалы и фамилии каждого автора, занимаемая должность, e-mail, полное название места работы (при совпадении места работы авторов нужно указывать его один раз для всей группы авторов);
- 🔳 название статьи;
- аннотация статьи объемом не менее 130 слов, написанная качественным английским языком, отражающая основное содержание статьи с указанием цели, задачи, результатов исследования и кратких выводов;
- ключевые слова (10—12 слов);
- список литературы в романском алфавите (латинице), т. е. необходимо транслитерировать на латинский шрифт (см., например, http://translit.ru/) инициалы и фамилии авторов, название источника публикации и место издания, а технические сокращения (номер, том, страница и т. п.) должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — N., том — V., страницы — Р. и т. п.).

Статья может быть отправлена по e-mail: nmst@novtex.ru с рисунками, вставленными в текстовый файл с расширением DOC.

Дополнительные пояснения авторы могут получить в редакции журнала лично, по телефонам: (499) 269-53-97, (499) 269-55-10 либо по e-mail.

### АДРЕС РЕДАКЦИИ ЖУРНАЛА

107076, Г. МОСКВА, СТРОМЫНСКИЙ ПЕР., 4, ИЗДАТЕЛЬСТВО "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА "Нано- и микросистемная техника" Тел.: (499) 269-55-10; тел./факс: (499) 269-55-10 E-mail: nmst@novtex.ru http://microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 17.09.2014. Подписано в печать 21.10.2014. Формат 60×88 1/8. Заказ МС1114. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнэ». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнэ». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.