

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 5(166) ✧ 2014

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 международную базу данных Scopus

Издается с 1999 г.

## 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)  
Андреевский Р. А., д.х.н., проф.  
Антонов Б. И.

Астахов М. В., д.х.н., проф.  
Быков В. А., д.т.н., проф.  
Волчихин В. И., 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.  
Мокров Е. А., д.т.н.

Панич А. Е., д.т.н., проф.  
Панфилов Ю. В., 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.  
Пятышев Е. Н., к.ф.-м.н.  
Стриханов М. Н., д.ф.-м.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.

## Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.  
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Деспотули А. Л., Андреева А. В. Ток смещения Максвелла и "универсальный" динамический отклик в наноионике . . . . . 3

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Басаев А. С. Моделирование функционально-интегрированных структур на основе углеродных нанотрубок . . . . . 11

Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. Оптимизация технологии получения рНЕМТ-структур на подложках GaAs с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова . . . . . 15

Тимошенков С. П., Анчутин С. А., Плеханов В. Е., Кочурина Е. С., Тимошенков А. С., Зуев Е. В. Разработка математического описания кольцевого микрогиротрона . . . . . 18

Тютюгин А. В., Жукова С. А., Турков В. Е. Формирование проводящих микровыводов методом жидкостной химической обработки для сборки кристаллов методом "флип-чип" . . . . . 26

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Абдуллаев Д. А. Изменение набора применяемых материалов при уменьшении топологических норм производства интегральных микросхем. . . . . 32

Зубов Д. Н., Кельм Е. А., Милованов Р. А., Молодцова Г. В. Электрохимическое восстановление поврежденных контактных площадок кристаллов при анализе отказов современных интегральных схем. . . . . 38

Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Турков В. Е., Рискин Д. Д., Кудрявцев П. Н., Четверов Ю. С. Особенности технологии изготовления высокочувствительных неохлаждаемых микроболлометрических матриц . . . . . 41

Томош К. Н. Характеристики и использование ВЧ и СВЧ разрядов при создании твердотельных полупроводниковых приборов . . . . . 47

### КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ, ВЫСТАВКИ

Раткин Л. С. К тридцатилетию Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук: фундаментальные и прикладные аспекты разработки нано- и микросистемной техники . . . . . 53

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](mailto:nmst@novtex.ru)

# Journal of NANO- and MICROSYSTEM TECHNIQUE

**NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEHNIKA**

ISSN 1813-8586

№ 5

(166)

2014

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. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS  
Ryzhii V. I. (Japan), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,  
Cor.-Mem. RAS  
Surov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS  
Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS  
Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), 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.  
Mokrov E. A., Dr. Sci. (Tech.)  
Panfilov Ju. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Petrunkin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Piatishchev E. N., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)  
Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Strikhanov M. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), 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.  
Volchihin V. I., 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.microsystems.ru/eng](http://www.microsystems.ru/eng);  
e-mail: [nmst@novtex.ru](mailto: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 international data base Scopus

Published since November 1999

## CONTENTS

### MODELLING AND DESIGNING OF MNST

**Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Maxwell Displacement Current and  
"Universal" Dynamic Response in Nanoionics . . . . . 3

**Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A.,  
Basaev A. S.** Simulation of Hybrid Integrated Structures Based on  
Carbon Nanotubes. . . . . 11

**Senichkin A. P., Bugaev A. S., Jachmenev A. E.** Optimization of  
pHEMT Producing Technology on the GaAs Substrates with Doping  
Profile in the Form of Sn Nanowires . . . . . 15

**Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Plekhanov V. E., Kochuri-  
na E. S., Timoshenkov A. S., Zuev E. V.** Development of Mathe-  
matical Descriptions of the Micromechanical Ring Gyroscope . . . . . 18

**Tyutyugin A. V., Zhukova S. A., Turkov V. E.** Bump Formation by  
Liquid Chemical Treatment for Flip-Chip Technology. . . . . 26

### SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

**Abdullaev D. A.** Change Set of Applied Materials at Reduction Topo-  
logical Norms Production of Integrated Microcircuits . . . . . 32

**Zubov D. N., Kelm E. A., Milovanov R. A., Molodtsova G. A.** Elec-  
trochemical Recovery of Damaged Bonding Area During Failure Ana-  
lysis of the Modern Integrated Circuits . . . . . 38

**Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Turkov V. E., Riskin D. D.,  
Kudryavtsev P. N., Chetverov Yu. S.** Technology Features of High-  
Sensitive Uncooled Microbolometric Arrays Manufacturing. . . . . 41

**Tomosh K. N.** Characteristics of Microwave and High Frequency  
While Fabricating Semiconductor Devices. . . . . 47

### CONFERENCES, SEMINARS, EXHIBITIONS

**Rathkeen L. S.** To the 30<sup>th</sup> Anniversary of Department of Nanotech-  
nologies and Information Technologies of Russian Academy of Sci-  
ences: Fundamental and Applied Aspects of Development of Nano- &  
Micro-System Technique . . . . . 53

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.38

**А. Л. Деспотули**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,  
e-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru,

**А. В. Андреева**, д-р физ.-мат. наук, проф., вед. науч. сотр.,  
e-mail: andreeva@ipmt-hpm.ac.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов  
Российской Академии наук (ИПТМ РАН)

## ТОК СМЕЩЕНИЯ МАКСВЕЛЛА И "УНИВЕРСАЛЬНЫЙ" ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК В НАНОИОНИКЕ

Поступила в редакцию 21.02.2014

*Введение понятия тока смещения Максвелла на потенциальном барьере при использовании структурно-динамического подхода наноионики позволяет дать детальное описание коллективного явления — взаимосвязанных ион-транспортных и диэлектрик-поляризационных процессов, определяющих формирование и релаксацию пространственного ионного заряда в неоднородном на наномасштабе потенциальном рельефе. В компьютерных экспериментах исследовано распределение локальных токов смещения Максвелла в области идеально поляризуемого когерентного гетероперехода передовой суперионный проводник (ПСИП)/электронный проводник, заряжаемого в гальваностатическом режиме. Другим объектом исследования являлась модельная наноструктура, которая представляет собой прослойку твердого электролита (ТЭ) между двумя ПСИП, образующими с ТЭ когерентные границы. Для экспоненциального распределения высот потенциальных барьеров в этой наноструктуре обнаружен джоншиеровский универсальный динамический отклик  $\text{Re}\sigma^*(\omega) \propto \omega^n$  ( $n < 1$ ) в поведении реальной части частотно-зависимой комплексной проводимости  $\sigma^*(\omega)$ . Дана однозначная интерпретация природы динамического отклика.*

**Ключевые слова:** наноионика, структурно-динамический подход, ток смещения Максвелла на потенциальном барьере, универсальный динамический отклик

### Введение

Настоящая работа на основе развития теоретических методов наноионики [1] продолжает цикл исследований по компьютерному моделированию процессов, протекающих при формировании и релаксации пространственного заряда в наногетероструктурах на основе твердых электролитов (ТЭ) [2–7]. Ранее в работах [8–10] была представлена классификация твердотельных ионных проводников, где среди ТЭ и суперионных проводников (СИП) был выделен класс передовых суперионных проводников (ПСИП). Кристаллическая структура ПСИП близка к оптимальной для быстрого ионного транспорта (БИТ), что определяет рекордно высокий уровень ион-транспортных характеристик этих материалов. В структуре кристаллических ТЭ можно выделить жесткую подрешетку (например, анионов), внутри которой по системе взаимосвязанных кристаллографических позиций ("тунне-

лей" БИТ) перескакивают подвижные катионы. Высокая ионная проводимость ПСИП определяется малостью высот потенциальных барьеров  $\sim 5k_B T$  ( $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура в К) и высокой концентрацией подвижных ионов ( $\approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ), число которых в несколько раз меньше числа вакантных позиций. В работах [6, 7] на примере структуры ПСИП  $\alpha\text{-AgI}$  показаны траектории прыжкового движения подвижных катионов  $\text{Ag}^+$  по тетраэдрическим позициям жесткой анионной подрешетки  $\text{I}^-$  во внешнем электрическом поле.

В последние годы [2–7] нами предложен и разрабатывается структурно-динамический подход наноионики. На основе нового подхода в компьютерных экспериментах выполнены исследования коллективных явлений в системах с БИТ на наномасштабе. Подход объединяет слоевую прыжковую структурно-динамическую 1D-модели наноструктуры, метод "скрытых" переменных и физико-ма-

тематический формализм (система взаимосвязанных дифференциальных уравнений), который оперирует скрытыми переменными.

Например (рис. 1, а, см. третью сторону обложки), структурная 1D-модель когерентного идеально поляризуемого (блокирующего) гетероперехода (электронный проводник) ЭП<sub>6</sub>/ТЭ—ПСИП. (ЭП<sub>6</sub>) представляет собой последовательность параллельных электроду ЭП<sub>6</sub> кристаллографических плоскостей  $X^j$  жесткой подрешетки, в которых находятся минимумы неоднородного потенциального рельефа ПСИП. Туннели БИТ пронизывают  $X^j$  и ориентированы вдоль внешнего электрического поля и перпендикулярно поверхности электрода ЭП<sub>6</sub>. Предложенная модель гетероперехода делит 3D-пространство ТЭ вблизи электрода ЭП<sub>6</sub> на плоские слои, расположенные между соседними плоскостями  $X^j$  и  $X^{j+1}$ , подобно слоевой модели решеточного газа в теории равновесного двойного электрического слоя (ДЭС) [11—13]. В туннеле БИТ существует 1D-последовательность потенциальных барьеров, высота  $\eta(x)$  которых уменьшается с координатой  $x$  по мере удаления от электрода. Минимумы потенциального рельефа имеют координаты  $x_j$  и расположены друг от друга на расстоянии длины элементарного прыжка  $\Delta$  подвижного иона. Неоднородный потенциальный рельеф простирается вдоль оси  $x$  на несколько нанометров. Вдоль координатных осей  $y$  и  $z$  максимумы потенциальных барьеров  $\eta(x_j - \Delta/2, y_p, z_q)$ , подобно поведению вдоль оси координат  $x$ , могут быть описаны дискретной функцией ( $p$  и  $q$  — целые числа от 1 до  $\infty$ ), определяемой периодичностью структуры ПСИП. Для упрощения модели мы принимаем, что  $\eta(x_j - \Delta/2, y_p, z_q) = \eta(x_j - \Delta/2)$  для любых значений  $p$  и  $q$ , т. е. слои между соседними минимумами потенциального рельефа являются макроскопическими вдоль осей координат  $y$  и  $z$ . Такой выбор оправдан в силу одномерного характера туннелей БИТ в жесткой подрешетке ПСИП.

Модель дает описание динамических неравновесных процессов ионного транспорта в терминах концентраций подвижных ионов  $n_j$  на кристаллографических плоскостях  $X^j$ . Физико-математический формализм работы базируется на принципе детального равновесия и кинетическом уравнении в форме закона сохранения частиц. Состояние неравновесной системы определяется набором функций  $\{y_k(t)\}$ . Компонентами набора являются зависящие от времени относительные изменения концентраций ионов подвижного сорта  $y_k(t) \equiv (n_k - n_0)/n_0$  во всех минимумах  $k = 1, 2, \dots, M$  неоднородного потенциального рельефа ( $M$  — число минимумов в наноструктуре). В данной работе принимается, что при отсутствии внешнего электрического воздействия на наноструктуру во всех минимумах потенциального рельефа равновесная концентрация подвижных ионов равна  $n_0$ .

Для описания процессов, протекающих при формировании и релаксации пространственного заряда в ТЭ при структурно-динамическом подходе введено новое понятие — ток смещения Максвелла на потенциальном барьере [4, 6]. В настоящей работе на основе обобщенного структурно-динамического подхода исследуются коллективные явления взаимосвязанных ион-транспортных и диэлектрик-поляризационных процессов в наноструктурах с неоднородным потенциальным рельефом:

- распределение локальных токов смещения Максвелла, индуцированных внешним импульсным электрическим воздействием на идеально поляризуемый когерентный гетеропереход ПСИП/ЭП<sub>6</sub>;
- динамический отклик наноструктуры ПСИП/ТЭ/ПСИП на переменноточковое внешнее воздействие в диапазоне частот импедансной спектроскопии.

### Объекты исследования

В вычислительных экспериментах исследовали поведение двух объектов.

1. *Идеально поляризуемый (блокирующий) когерентный гетеропереход ЭП<sub>6</sub>/ТЭ-ПСИП* (см. рис. 1, а, б, третья сторона обложки). Внешнее воздействие на гетеропереход моделирует генератор тока, действующий в гальваностатическом режиме. В этом случае в неоднородном потенциальном рельефе между электродом ЭП<sub>6</sub> и ПСИП формируется пространственный заряд, который при релаксации образует область ДЭС. Структурная когерентность гетерограницы ЭП<sub>6</sub>/ПСИП означает, что упругие деформации не вызывают существенных изменений в структуре жесткой подрешетки, которая определяет формирование и ориентацию 1D-туннелей БИТ в ПСИП. Однако в силу резкой зависимости высот потенциальных барьеров от межатомных расстояний [14] деформации решеточного несоответствия в области гетерограницы могут вызвать заметное изменение потенциального рельефа внутри туннелей БИТ. Для кристаллографически узкого когерентного гетероперехода деформации решеточного несоответствия распространяются от гетерограницы на расстояния не больше нескольких параметров решетки [14, 15]. Область модельного гетероперехода ЭП<sub>6</sub>/ПСИП представляет собой одномерную последовательность из 27 потенциальных барьеров, которые преодолевают катионы подвижного сорта. Считали, что напряжения несоответствия на когерентном гетеропереходе ЭП<sub>6</sub>/ПСИП исчезают на расстоянии, равном примерно двум параметрам решетки (для  $\alpha$ -AgI ПСИП  $\approx 1$  нм). На этой же длине происходит основной спад высот потенциальных барьеров  $\eta$  (см. рис. 1, а, б, третья сторона обложки).

Изменение величины  $\eta$  на модельном гетеропереходе ЭП<sub>6</sub>/ПСИП в области ДЭС считали рав-

ным 0,5...0,1 эВ (см. рис. 1, б, третья сторона обложки), что соответствует экспериментальным данным работы [9], где исследованы частотно-емкостные характеристики гетеропереходов на основе ПСИП. Огибающей высот барьеров на гетеропереходе  $\text{ЭП}_6/\{X^j\}$  является экспонента, что минимизирует число модельных параметров:

$$\eta_{j,j+1} = a + b \exp(-j/c), \quad j = 1, 2, \dots, 27, \quad (1)$$

где  $a = 0,1$  эВ и  $b = 0,4$  эВ. Параметр  $a$  определяет высоту барьеров  $\eta_{j,j+1}$  в объеме ПСИП, а сумма  $a + b$  задает высоту самого высокого барьера  $\eta_{1,2}$  в последовательности плоскостей  $\{X^j\}$  ( $j = 1, 2, \dots, 28$ ). Значение  $c = 7$  обеспечивает выход огибающей на значения  $\eta$  в объеме ПСИП ( $\approx 0,1$  эВ) при  $j \approx 27$ . Границами гетероперехода  $\text{ЭП}_6/\text{ТЭ}$ —ПСИП являются поверхность блокирующего электрода  $\text{ЭП}_6$ , обозначаемая  $X^0$ , и плоскость  $X^{28}$  жесткой подложки ПСИП, где высота потенциального барьера  $\eta_{27,28}$  выходит на значения в объеме. Граничные условия на краевых плоскостях  $X^0$  и  $X^{28}$  модельного гетероперехода задает генератор тока. Граничную плоскость  $X^{28}$  можно рассматривать также как идеально обратимый электрод, на котором прямые и обратные электрохимические реакции (по катионам подвижного сорта) идут при бесконечно малом перенапряжении (электродный импеданс равен нулю).

2. *Модельная наноструктура ПСИП/ТЭ/ПСИП, представляющая собой прослойку ТЭ (несколько монослоев), расположенную между двумя ПСИП, которые образуют с ТЭ когерентные гетерограницы* (рис. 2, а, б, см. третью сторону обложки). Внешнее воздействие на наноструктуру моделирует переменного-токовый генератор с амплитудой плотности тока  $I_0 = \text{const}(\omega)$ . Упругие напряжения несоответствия решеток ПСИП и ТЭ на двух одинаковых когерентных гетеропереходах ПСИП/ТЭ симметрично спадают внутри ТЭ, вызывая в силу зависимости "напряжение — деформация" появление в прослойке ТЭ неоднородного потенциального рельефа, определяемого резкой (экспоненциального типа) зависимостью высоты потенциальных барьеров от межатомных расстояний [14]. Модельная наноструктура ПСИП/ТЭ/ПСИП (в направлении оси  $x$  протяженность  $L \approx 4$  нм) содержит последовательность из 27 потенциальных барьеров, краевые барьеры  $\eta_{1,2}$  и  $\eta_{27,28}$  имеют высоту 0,2 эВ и принадлежат ПСИП (высоты барьеров в объеме ПСИП равны 0,1 эВ). Для рассматриваемых на рис. 1 и 2 наноструктур широко используемый при диагностике динамических свойств метод импедансной спектроскопии может дать только грубо усредненные по объему и времени данные, отражающие взаимосвязанные ион-транспортные и диэлектрик-поляризационные параллельно-последовательные процессы. Соответствующие элементарные процессы, составляющие коллективное яв-

ление, в настоящее время могут быть детально исследованы только методами компьютерного моделирования.

Вычислительные эксперименты выполнены в среде Wolfram Mathematica.

## Данные расчетов и их обсуждение

**Гальваностатическое включение блокирующего гетероперехода  $\text{ЭП}_6/\text{ТЭ}$ —ПСИП.** На рис. 3 представлены данные расчетов временных зависимостей емкости, токов смещения Максвелла  $I_{Dj,j+1}(t)$  и токов ионной проводимости  $I_{j,j+1}(t)$ , соответствующих зарядке блокирующего гетероперехода  $\text{ЭП}_6/\{X^j\}$  ( $j = 1, 2, \dots, 28$ ) в гальваностатическом режиме, ток генератора  $I(t) = \text{const}$  при  $t > 0$  и  $I(t) = 0$  при  $t \leq 0$ . Расчеты выполнены при условии, что накапливаемый на гетеропереходе заряд мал, т. е. стерические эффекты (ограничения, накладываемые на возможности заполнения ионами пространства вблизи электрода) [16—18] отсутствуют:

$$\int_0^t I(t) dt \ll en_0, \quad (2)$$

где  $e$  — абсолютное значение заряда электрона. Расчет показывает выполнение условия для замкнутой на генератор тока цепи с плотностью тока  $I(t)$  [4, 6]:

$$I(t) = I_{j,j+1}(t) + I_{Dj,j+1}(t). \quad (3)$$

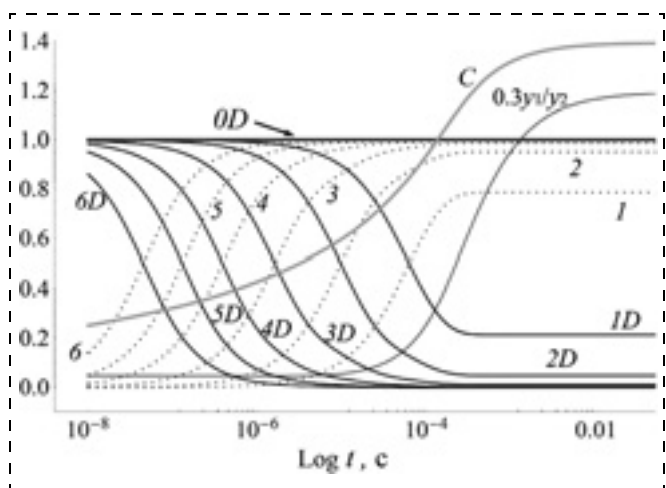


Рис. 3. Временные зависимости емкости  $C$  ( $\text{Ф} \cdot \text{м}^{-2}$ ), нормированных токов смещения Максвелла ( $I_{Dj,j+1}/I(t)$ , сплошные линии) и нормированных токов ионной проводимости ( $I_{j,j+1}/I(t)$ , пунктирные линии) в области пространственного заряда на гетеропереходе  $\text{ЭП}_6/\{X^j\}$  ( $j = 1, 2, \dots, 28$ ), который заряжается гальваностатически и при больших  $t$  выходит на стационарный режим, характеризуемый соотношениями  $y_j/y_{j+1} \approx \text{const}$ . Для большей наглядности временная зависимость  $y_1/y_2$  дана с множителем 0,3. Номера кривых соответствуют индексам минимумов потенциального рельефа с  $j = 1 \dots 6$ , метка 0D соответствует нормированному току смещения  $I_{D0,1}/I(t)$  на электроде  $\text{ЭП}_6$

Условие (3) выполняется для всех барьеров модельного гетероперехода  $\text{ЭП}_6/\{X^j\}$ .

Результаты расчета для шести наиболее высоких барьеров  $\eta_{j,j+1}$  приведены на рис. 3. Токи смещения  $I_{Dj,j+1}(t)$  доминируют над токами ионной проводимости  $I_{j,j+1}(t)$  при малых  $t$ . Условие  $I_{Dj,j+1} = I_{j,j+1}$  достигается при характерном времени  $(t_{j,j+1}^*)$ , зависящем от высоты барьера  $\eta_{j,j+1}$ . При  $t \gg t^*$  пространственный заряд на гетеропереходе характеризуется стационарным неравновесным распределением, т. е. отношения относительных изменений концентраций ионов подвижного сорта в соседних минимумах потенциального рельефа  $y_j/y_{j+1}$  перестают зависеть от  $t$ .

Емкость гетероперехода  $C$  определяется отношением накопленного заряда к напряжению на гетеропереходе. Поведение  $C(t)$  зависит от распределения высот барьеров  $\eta_{j,j+1}$ , что определяется связью  $\varepsilon_{j,j+1} \propto 1/\eta_{j,j+1}$  [9], где  $\varepsilon_{j,j+1}$  — эффективная диэлектрическая проницаемость слоя между плоскостями  $X^j$  и  $X^{j+1}$ . Функция  $C(t)$  достигает в динамическом режиме максимума при  $t_{\max} > t_{1,2}^*$ , где величина  $t_{\max}$ , как показывают расчеты, зависит от  $I(t)$  из-за стерического эффекта.

Из полученных данных следует, что понижение высот потенциальных барьеров  $\eta_{j,j+1}$  в области гетероперехода необходимо для создания гетероструктур с высокими частотно-емкостными характеристиками. Требуемые характеристики можно обеспечить путем выбора контактирующих материалов ЭП и ТЭ-ПСИП и созданием когерентной (полуккогерентной) гетерограницы [8, 9, 19, 20]. Использование когерентных гетеропереходов  $\text{ЭП}_6/\text{ТЭ—ПСИП}$  для создания суперконденсаторов микрометровых размеров с высокими частотно-емкостными характеристиками (наноионные суперконденсаторы) впервые было предложено в 2003 г. [19]. Моделируемые в настоящей работе процессы, в которых токи смещения  $I_{Dj,j+1}$  и ионной проводимости  $I_{j,j+1}$  взаимосвязаны, определяются взаимосогласованным поведением "скрытых" переменных — концентраций катионов подвижного сорта  $n_j$  в минимумах потенциального рельефа  $x_j$  на  $\text{ЭП}_6/\{X^j\}$ .

Статические стерические эффекты [16—18] (как и динамические) можно моделировать с помощью структурно-динамического подхода. Стерические эффекты становятся заметны, когда ближайшую к  $\text{ЭП}_6$  плоскость  $X^j$  (минимумы потенциального рельефа с  $j = 1$ ) покидает достаточно большая часть катионов. Тогда при заряджении гетероперехода происходит также отток катионов и из минимумов на плоскости с  $j = 2$ . Стерические эффекты отчетливо проявляются, например, в прохождении

емкости  $C$  пространственного заряда через максимум при работе генератора тока  $I(t)$ , когда

$$\int_0^t I(t) dt \sim en_0. \quad (4)$$

Однако в случае сильно неравновесных динамических условий для представления корректных данных по стерическим эффектам должны быть определены погрешности, связанные с ограничениями применения принципа детального равновесия. В данной работе при моделировании динамических процессов выполняется условие (2), что позволяет корректно применять принцип детального равновесия.

**Динамический отклик наноструктуры на переменнo-токовое воздействие.** Введение в наноионику локальных токов смещения Максвелла позволяет по-новому и более глубоко взглянуть на динамические явления и эффекты, природа и механизмы которых остаются плохо понятыми в ионике твердого тела. Одной из нерешенных проблем остается "универсальный" динамический отклик.

Со времени появления обзорной статьи [21] (А. К. Jonsher), частотная зависимость линейного электрического отклика различных по природе веществ привлекает внимание и до сих пор обсуждается как фундаментальная [22—32]. В области ионики твердого тела возникло новое направление научных исследований, предметом которого является динамика прыжкового ионного транспорта в ТЭ и СИП. Обнаруженная в различных по структуре веществах, в том числе монокристаллах и стеклах, степенная зависимость действительной части комплексной проводимости  $\text{Re}\sigma^*$  от частоты  $\omega$ , т. е.

$$\text{Re}\sigma^*(\omega) \propto \omega^n, \quad (5)$$

где  $n < 1$ , в настоящее время входит в стандартный набор представлений, используемых в материаловедении и в ионике твердого тела [33—43], хотя понимание динамики ионного транспорта в разупорядоченных материалах остается нерешенной проблемой [22—24]. Такое положение можно объяснить тем, что имеющиеся в литературе экспериментальные данные допускают множество интерпретаций. Например, широко используемый, наиболее информативный метод импедансной спектроскопии представляет экспериментальные данные, отражающие грубо усредненные по объему образца и по времени взаимосвязанные (координированные) дальнедействующим электрическим полем) элементарные локальные процессы ионного транспорта и диэлектрической поляризации. Интерпретация универсального динамического отклика в рамках последовательно-параллельных эквивалентных  $RC$ -электрических схем выполнена в работах [44, 45].

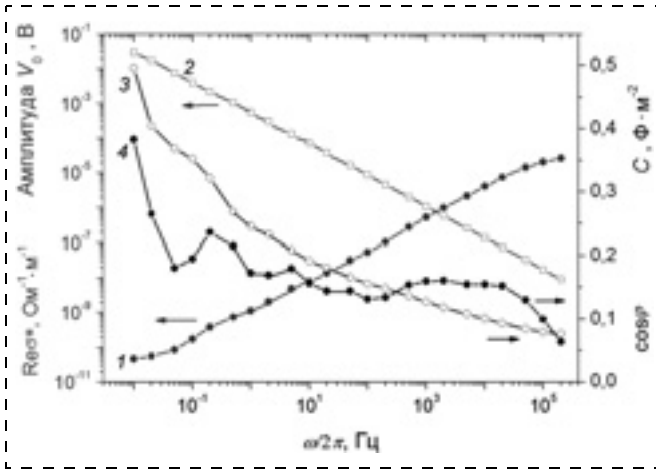


Рис. 4. Частотное поведение: 1 —  $\text{Log Re}\sigma^*$  ( $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ); 2 —  $\text{Log } V_0$  (В); 3 — емкость ионного пространственного заряда  $C$  ( $\text{Ф} \cdot \text{м}^{-2}$ ); 4 —  $\cos\varphi$  ( $\varphi$  — сдвиг фаз между током генератора тока  $I(t)$  и напряжением на краях наноструктуры ПСИП/ТЭ/ПСИП)

На рис. 4 представлены данные, полученные в настоящей работе при компьютерном моделировании влияния переменного тока генератора тока (амплитуда плотности тока  $I_0 = \text{const}$ ) на процессы формирования и релаксации пространственного заряда в области неоднородного потенциального рельефа модельной наноструктуры ПСИП/ТЭ/ПСИП. На рисунке видно, что величина  $\text{Re}\sigma^*(\omega)$  для наноструктуры шириной  $L$  изменяется с циклической частотой  $\omega$  примерно по степенному закону

$$\text{Re}\sigma^*(\omega) \equiv (L/V_0)I_0 \cos\varphi \propto \omega^n, \quad (6)$$

где  $n < 1$ , т. е. демонстрирует универсальный динамический отклик в широком частотном диапазоне. На рис. 4 показано изменение с частотой  $\omega$  ряда величин:  $\text{Log Re}\sigma^*$ ,  $\text{Log } V_0$ , емкости пространственного заряда  $C$  (в  $\text{Ф} \cdot \text{м}^{-2}$ ), и угла сдвига фаз  $\cos\varphi$  между током и напряжением на краях наноструктуры ПСИП/ТЭ/ПСИП.

Анализ исследуемого явления в терминах скрытых переменных, неравновесных концентраций ионов подвижного сорта на кристаллографических

плоскостях в области неоднородного потенциального рельефа ( $n_j$ ), показывает следующее:

1. При переменном-токовом внешнем воздействии с  $I_0 = \text{const}(\omega)$  плотность заряда на плоскостях  $X^j$ , т. е.  $\Delta q_j = e(n_j - n_0)$ , изменяется в соответствии с выражением

$$\Delta q_j \propto I_0 \int \sin(\omega t) dt, \quad (7)$$

что при взятии интеграла приводит к появлению множителя  $\propto 1/\omega$ .

2. Заряды  $\Delta q_j$  определяют напряжения между плоскостями  $X^j$  и  $X^{j+1}$  и, как следствие, амплитуда  $V_0$  суммарного переменного-токового генератора напряжения на модельной наноструктуре ПСИП/ТЭ/ПСИП также изменяется, примерно как  $\propto \omega^{-1}$ . Согласно (6) амплитуда  $V_0(\omega)$  может оказывать доминирующее влияние на  $\text{Re}\sigma^*(\omega)$ , если  $\cos\varphi \approx \text{const} \neq 0$ .

3. Фазовый сдвиг  $\varphi$  между током генератора  $I(t) = I_0 e^{i\omega t}$  и напряжением  $V(t) = V_0 e^{i(\omega t + \varphi)}$  для наноструктуры ПСИП/ТЭ/ПСИП определяется усреднением множества локальных параллельно-последовательных процессов ионного транспорта и диэлектрической поляризации, т. е. взаимосвязью локальных токов проводимости и токов смещения Максвелла.

4. На рис. 5 показано распределение токов смещения Максвелла (отношение амплитуд токов смещения Максвелла  $I_{Dj, j+1}$  на потенциальных барьерах к амплитуде  $I_0$  тока внешнего генератора тока) на фоне неоднородного потенциального рельефа (см. рис. 2, б на третьей стороне обложки) для трех сильно различающихся значений частоты внешнего воздействия на наноструктуру ПСИП/ТЭ/ПСИП.

5. Сравнение рисунков 5, а—в с данными рис. 4 показывает, что функция  $\cos\varphi$  слабо зависит от  $\omega$  в условиях, когда в области неоднородного потенциального рельефа имеются потенциальные барьеры, у которых локальные токи смещения Максвелла и токи ионной проводимости являются величинами одного и того же порядка. Универсальный степенной закон Джоншера выполняется в широком

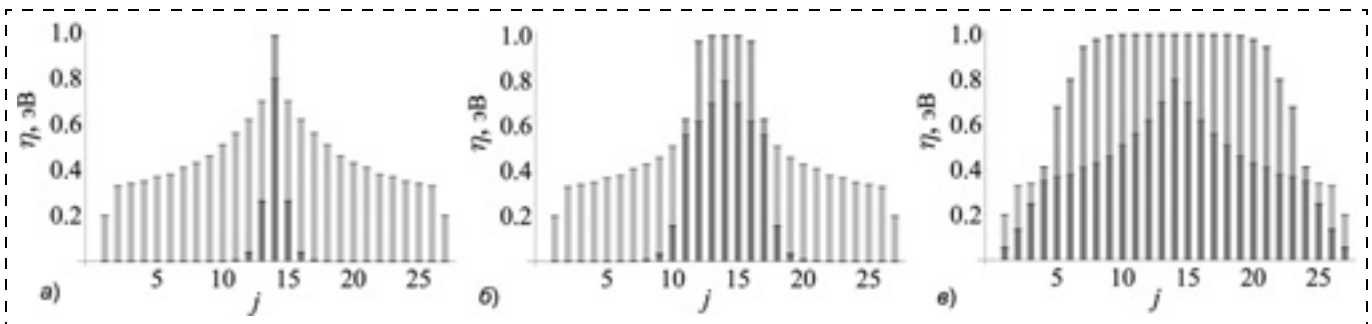


Рис. 5. Отношение амплитуд токов смещения Максвелла  $I_{Dj, j+1}$  на потенциальных барьерах к амплитуде  $I_0$  тока внешнего генератора тока для модельной наноструктуры ПСИП ( $j = 1$ )/ТЭ ( $j = 2 \dots 26$ )/ПСИП ( $j = 27$ ) с неоднородным потенциальным рельефом: а — генератор тока с частотой  $\omega/2\pi = 0,01$  Гц,  $\cos\varphi = 0,383$ ; б —  $\omega/2\pi = 10$  Гц,  $\cos\varphi = 0,156$ ; в —  $\omega/2\pi = 50$  кГц,  $\cos\varphi = 0,129$

частотном диапазоне в случае, когда перепад высот барьеров в потенциальном рельефе достаточно большой, а распределение барьеров по высоте (не пространственное разупорядочение) является достаточно гладким. Следует отметить, что влияние пространственного разупорядочения на поведение  $\text{Re}\sigma^*(\omega)$  относительно невелико.

## Заключение

Современные компьютерные эксперименты позволяют исследовать процессы на таком уровне детальности, который недоступен экспериментальной технике. Предложен простой теоретический подход к моделированию динамики процессов ионного транспорта в неоднородном потенциальном рельефе на наномасштабе. Подход обобщен путем включения в процессы локальных токов смещения Максвелла на потенциальных барьерах. Простота подхода означает, что он, базируясь на ясных физических приближениях, позволяет моделировать широкий диапазон динамических и статических ион-транспортных свойств и коллективных явлений.

Показано, что учет взаимосвязи токов ионной проводимости  $I_{j,j+1}$  и токов смещения Максвелла  $I_{Dj,j+1}$  дает детальное описание процессов формирования и релаксации пространственного заряда на идеально поляризуемом когерентном гетеропереходе ЭП/ПСИП.

Для модельной наноструктуры ПСИП/ТЭ/ПСИП с экспоненциальным распределением высот потенциальных барьеров в ТЭ обнаружен джоншеровский универсальный динамический отклик  $\text{Re}\sigma^*(\omega) \propto \omega^n$  ( $n < 1$ ) в поведении реальной части частотно-зависимой комплексной проводимости  $\sigma^*(\omega)$ . Применение структурно-динамического подхода (с учетом токов смещения Максвелла) к взаимосвязанным ион-транспортным и диэлектрик-поляризационным процессам (коллективные явления) в области неоднородного потенциального рельефа раскрывает природу универсального динамического отклика Джоншера, который в литературе считается одной из фундаментальных проблем ионики твердого тела.

Показано, что при переменнотоквом внешнем воздействии (генератор тока с  $I_0 = \text{const}$ ) амплитуды неравновесных концентраций подвижных ионов (и напряжений) в области пространственного заряда ТЭ наноструктуры ПСИП/ТЭ/ПСИП изменяются приблизительно как  $\propto \omega^{-1}$ , что дает главный линейный вклад в  $\text{Re}\sigma^*(\omega)$ . Отклонение от линейности обусловлено значением косинуса сдвига фаз  $\phi$  между током и напряжением на краях наноструктуры. Величина  $\cos\phi$  слабо зависит от  $\omega$  в условиях, когда существует ряд барьеров, на которых токи смещения Максвелла и токи ионной проводимости являются величинами одинакового порядка. Степенной закон  $\text{Re}\sigma^*(\omega) \propto \omega^n$  ( $n < 1$ ) выполняется в широком частотном диапазоне, если

различие высот потенциальных барьеров в наноструктуре достаточно велико, а распределение высот барьеров является достаточно гладким.

Результаты расчетов находятся в хорошем количественном соответствии (без большого числа подгоночных параметров) с известными в литературе экспериментальными данными.

## Список литературы

1. Despotuli A. L., Nikolaichik V. I. A step towards nanoionics // *Solid State Ionics*. 1993. V. 60. P. 275–278.
2. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Модель, метод и формализм нового подхода к описанию процессов ионного транспорта на блокирующих гетеропереходах твердый электролит/электронный проводник // *Нано- и микросистемная техника*. 2012. № 9. С. 16–21.
3. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Компьютерное моделирование на субнанометровом масштабе ион-транспортных характеристик блокирующих гетеропереходов электролит/электронный проводник/твердый электролит // *Нано- и микросистемная техника*. 2012. № 11. С. 15–23.
4. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Ток смещения Максвелла в наноионике и собственные ион-транспортные свойства модельных 1D-наноструктур // *Нано- и микросистемная техника*. 2013. № 8. С. 2–9.
5. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Моделирование на субнанометровом масштабе процессов быстрого ионного транспорта на блокирующих гетеропереходах твердый электролит/электронный проводник // *Электронный журнал. Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы*. 2013. № 2. С. 7–12.
6. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Ток смещения Максвелла в наноионике. Моделирование процессов релаксации пространственного заряда на блокирующих гетеропереходах твердый электролит/электронный проводник // *Электронный журнал. Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы*. 2013. № 10. С. 26–40.
7. Despotuli A. L., Andreeva A. V. Structure-dynamic approach in nanoionics. Modeling of ion transport on blocking electrode. arXiv:1311.3480 [cond-mat.mtrl-sci]
8. Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B. Nanoionics of advanced superionic conductors // *Ionics*. 2005. V. 11, N. 3–4. P. 306–314.
9. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Наноионика: новые материалы и суперконденсаторы // *Российские нанотехнологии*. 2010. Т. 5. N. 7–8. С. 89–100.
10. Despotuli A. L., Andreeva A. V. A short review on deep-sub-voltage nanoelectronics and related technologies // *Int. J. Nanosci.* 2009. V. 8, № 4. P. 389–402.
11. Liu S. H. Lattice gas model for the metal-electrolyte interface // *Surf. Sci.* 1980. V. 101, N. 1–3. P. 49–56.
12. Macdonald J. R. Layered lattice gas model for the metal-electrode interface // *Surf. Sci.* 1982. V. 116, N. 1. P. 135–147.
13. Macdonald J. R., Liu S. H. An iterated three-layer model of the double layer with permanent dipoles // *Surf. Sci.* 1983. V. 125, N. 3. P. 653–678.
14. Flygare W. H., Huggins R. A. Theory of ionic transport in crystallographic tunnels // *J. Phys. Chem. Solids*. 1973. V. 34, N. 7. P. 1199–1204.
15. Ardell A. J. Gradient energy, interfacial energy and interface width // *Scripta Mat.* 2012. V. 66, N. 7. P. 423–426.
16. Borukhov I., Andelman D., Orland H. Steric effects in electrolytes: A modified Poisson-Boltzmann equation // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 79, N. 3. P. 435–438.
17. Kilic M. S., Bazant M. Z., Ajdari A. Steric effects in the dynamics of electrolytes at large applied voltages: I. Double-layer charging // *Phys. Rev. E*. 2007. V. 75, N. 2. P. 021502.
18. Bazant M. Z., Storey B. D., Kornyshev A. A. Double layer in ionic liquids: Overscreening versus crowding // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106, N. 4. P. 046102.
19. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Создание новых типов тонкопленочных суперконденсаторов для микросистемной техники и микро(нано)электроники. Часть 1 // *Микросистемная техника*. 2003. № 11. С. 2–10.

20. Andreeva A. V., Despotuli A. L. Interface design in nano-systems of advanced superionic conductors // *Ionics*. 2005. V. 11, N. 1–2. P. 152–160.
21. Jonsher A. K. The "universal" dielectric response // *Nature*. 1977. V. 267. N. 6. P. 673–679.
22. Dyre J. C., Maass P., Roling B., Sidebottom D. L. Fundamental questions relating to ion conduction in disordered solids // *Rep. Prog. Phys.* 2009. V. 72, N. 4. P. 046501.
23. Sidebottom D. L. Colloquium: Understanding ion motion in disordered solids from impedance spectroscopy scaling // *Rev. Mod. Phys.* 2009. V. 81, N. 3. P. 999–1014.
24. Macdonald J. R. Addendum to Fundamental questions relating to ion conduction in disordered solids // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107, N. 10. P. 101101.
25. Funke K. Solid State Ionics: from Michael Faraday to green energy — the European dimension // *Sci. Tech. Adv. Mater.* 2013. V. 14. P. 043502.
26. Wojnarowska Z., Swietly-Pospiech A., Grzybowska K., Hawelek L., Paluch M., Ngai K. L. Fundamentals of ionic conductivity relaxation gained from study of procaine hydrochloride and procainamide hydrochloride at ambient and elevated pressure // *J. Chem. Phys.* 2012. V. 136, N. 16. P. 164507.
27. Popov I. I., Nigmatullin R. R., Khamzin A. A., Lounev I. V. Conductivity in disordered structures: Verification of the generalized Jonscher's law on experimental data // *J. App. Phys.* 2012. V. 112, N. 9. P. 094107.
28. Sibik J., Shalaev E. Y., Zeitler J. A. Glassy dynamics of sorbitol solutions at terahertz frequencies // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2013. V. 15, N. 5. P. 11931–11942.
29. Dyre J. C. Aging of CKN: Modulus versus conductivity analysis // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110, N. 24. P. 245901.
30. Rim Y.-H., Kim M., Kim J. E., Yang Y. S. Ionic transport in mixed-alkali glasses: hop through the distinctly different conduction pathways of low dimensionality // *New J. Phys.* 2013. V. 15, N. 2. P. 023005.
31. Mattner C., Roling B., Heuer A. The frequency-dependence of nonlinear conductivity in disordered systems: an analytically solvable model. arXiv:1302.3258v1[cond-mat.dis-nn].
32. Banhatti R. D., Laughman D., Badr L., Funke K. Nearly constant loss effect in sodium borate and silver meta-phosphate glasses: New insights // *Solid State Ionics*. 2011. V. 192, N. 1. P. 70–75.
33. Ke S., Lin P., Huang H., Fan H., Zeng X. Mean-field approach to dielectric relaxation in giant dielectric constant perovskite ceramic // *J. Ceram.* 2013. V. 2013. Article ID 795827.
34. Kumar T. V., Chary A. S., Bhardwaj S., Awasthi A. M., Reddy S. N. Dielectric relaxation, ionic conduction and complex impedance studies on  $\text{NaNO}_3$  fast ion conductor // *Int. J. Mat. Sci. Appl.* 2013. V. 2, N. 6. P. 173–178.
35. Parida B. N., Das P. R., Padhee R., Choudhary R. N. P. Structural, dielectric and electrical properties of  $\text{Li}_2\text{Pb}_2\text{La}_2\text{W}_2\text{Ti}_4\text{Nb}_4\text{O}_{30}$  ceramic // *Bull. Mat. Sci.* 2013. V. 36, N. 5. P. 883–892.
36. Kader M. M. A., El-Kabbany F., Naguib H. M., Gamal W. M. Charge transport mechanism and low temperature phase transitions in  $\text{KIO}_3$  // *J. Phys.: Conf. Series*. 2013. V. 423. P. 012036.
37. Kriaa A., Saad K. B., Hamzaoui A. H. Synthesis and characterization of cancrinite-type zeolite, and its ionic conductivity study by AC impedance analysis, // *Rus. J. Phys. Chem. A*. 2012. V. 86, N. 3. P. 2024–2032.
38. Šantić A., Moguš-Milanković A. Charge carrier dynamics in materials with disordered structures: a case study of iron phosphate glasses // *Croat. Chem. Acta*. 2012. V. 85, N. 3. P. 245–254.
39. Chaari M., Matoussi A. Electrical conduction and dielectric studies of  $\text{ZnO}$  pellets // *Physica B*. 2012. V. 407, N. 9. P. 3441–3447.
40. Peng-Fei C., Sheng-Tao L., Jian-Ying L., Can D., Yan Y. Physical meaning of conductivity spectra for  $\text{ZnO}$  ceramics // *Chinese Phys. B*. 2012. V. 21, N. 9. P. 097201.
41. Sorokin N. I., Sobolev B. P. Frequency response of the low-temperature ionic conductivity of single crystals  $\text{R}_{1-y}\text{M}_y\text{F}_{3-y}$  ( $\text{R} = \text{La} - \text{Er}$ ;  $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sc}, \text{Ba}, \text{Cd}$ ) // *Phys. Solid State*. 2008. V. 50, N. 3. P. 402–407.
42. Regonini D., Adamaki V., Bowen C. R., Pennock S. R., Taylor J., Dent A. C. E. AC electrical properties of  $\text{TiO}_2$  and Magnéli phases,  $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$  // *Solid State Ionics*. 2012. V. 229, N. 12. P. 38–44.
43. Singh D. P., Shahi K., Kar K. K. Scaling behavior and nearly constant loss effect in  $\text{AgI-LiPO}_3$  composite glasses // *Solid State Ionics*. 2013. V. 231, N. 2. P. 102–108.
44. Bowen C. R., Almond D. P. Modelling the "universal" dielectric response in heterogeneous materials using microstructural electrical networks // *Mat. Sci. Tech.* 2006. V. 22, N. 6. P. 719–724.
45. Henn F., Devautour-Vinot S., Giuntini J.-G., Bisquert J., Garcia-Belmonte G., Platon C., Varsamis E., Kamitsos E. I. Analysis of AC permittivity response measured in an ionic glass: A comparison between iso and non-iso thermal conditions // *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul.* 2010. V. 17, N. 4. P. 1164–1171.

A. L. Despotuli, Senior Researcher, A. V. Andreeva, Leading Researcher,  
e-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru  
Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS

## MAXWELL DISPLACEMENT CURRENT AND "UNIVERSAL" DYNAMIC RESPONSE IN NANOIONICS

*Introduction of notion of Maxwell displacement current on potential barrier in the structure-dynamic approach of nanoionics allows to give the detailed description of collective phenomenon coupled ion-transport and dielectric-polarization processes occurring during ionic space charge formation and relaxation in non-uniform potential relief on nanoscale. The distribution of local Maxwell displacement currents in the region of an advanced superionic conductor (AdSIC)/electronic conductor (EC) ideally polarizable coherent heterojunction, charged in galvanostatic mode, is investigated in computer experiments. Other object of research was the model nanostructure, a few monolayers of solid electrolyte (SE) located between two AdSICs forming coherent interfaces with SE. Jonscher's "universal" dynamic response,  $\text{Re}\sigma^*(\omega) \propto \omega^n$  ( $n < 1$ ), was found for real part of frequency-dependent complex conductivity  $\sigma^*(\omega)$  for model nanostructure with an exponential distribution of potential barrier heights in SE. Unambiguous interpretation of the nature of dynamic response is given.*

**Keywords:** nanoionics, structure-dynamic approach, Maxwell displacement current on potential barrier, universal dynamic response

### References

1. Despotuli A. L., Nikolaichik V. I. A step towards nanoionics // *Solid State Ionics* 1993. V. 60. P. 275–278.
2. Despotuli A. L., Andreyeva A. V. Model, metod i formalizm novogo podkhoda k opisaniyu protsessov ionnogo transporta na blokiruyushchikh geteroperekhodakh tverdykh elektrolit/ele-

tronnyy provodnik // *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2012. N. 9. P. 16–21.

3. Despotuli A. L., Andreyeva A. V. Kompyuternoye modelirovaniye na sub-nanometrovom mashtabe ion-transportnykh kharakteristik blokiruyushchikh geteroperekhodov elektronnyy provodnik/tverdykh elektrolit // *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2012. N. 11. P. 15–23.

4. **Despotuli A. L., Andreyeva A. V.** Tok smeshcheniya Maksvela v nanoionike i sobstvennyye ion-transportnyye svoystva modelnykh 1D-nanostruktur // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2013. N. 8. P. 2–9.
5. **Despotuli A. L., Andreyeva A. V.** Modelirovaniye na subnanometrovom masshtabe protsessov bystrogo ionnogo transporta na blokiryushchikh geteroperekhodakh tverdykh elektrolit/elektronnyy provodnik // Elektronnyy zhurnal. Fazovyye perekhody, uporyadochennyye sostoyaniya i novyye materialy. 2013. N. 2. P. 7–12.
6. **Despotuli A. L., Andreyeva A. V.** Tok smeshcheniya Maksvela v nanoionike. Modelirovaniye protsessov relaksatsii prostanstvennogo zaryada na blokiryushchikh geteroperekhodakh tverdykh elektrolit/elektronnyy provodnik // Elektronnyy zhurnal. Fazovyye perekhody, uporyadochennyye sostoyaniya i novyye materialy. 2013. N. 10. P. 26–40.
7. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Structure-dynamic approach in nanoionics. Modeling of ion transport on blocking electrode // arXiv:1311.3480 [cond-mat.mtrl-sci]
8. **Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B.** Nanoionics of advanced superionic conductors // Ionics. 2005. V. 11, N. 3–4. P. 306–314.
9. **Despotuli A. L., Andreyeva A. V.** Nanoionika: novyye materialy i superkondensatory // Rossiyskiye nanotekhnologii. 2010. V. 5, N. 7–8. P. 89–100.
10. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** A short review on deep-sub-voltage nanoelectronics and related technologies // Int. J. Nanosci. 2009. V. 8, N. 4. P. 389–402.
11. **Liu S. H.** Lattice gas model for the metal- electrolyte interface // Surf. Sci. 1980. V. 101, N. 1–3. P. 49–56.
12. **Macdonald J. R.** Layered lattice gas model for the metal-electrode interface // Surf. Sci. 1982. V. 116, N. 1. P. 135–147.
13. **Macdonald J. R., Liu S. H.** An iterated three-layer model of the double layer with permanent dipoles // Surf. Sci. 1983. V. 125, N. 3. P. 653–678.
14. **Flygare W. H., Huggins R. A.** Theory of ionic transport in crystallographic tunnels // J. Phys. Chem. Solids. 1973. V. 34, N. 7. P. 1199–1204.
15. **Ardell A. J.** Gradient energy, interfacial energy and interface width // Scripta Mat. 2012. V. 66, N. 7. P. 423–426.
16. **Borukhov I., Andelman D., Orland H.** Steric effects in electrolytes: A modified Poisson-Boltzmann equation // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79, N. 3. P. 435–438.
17. **Kilic M. S., Bazant M. Z., Ajdari A.** Steric effects in the dynamics of electrolytes at large applied voltages: I. Double-layer charging // Phys. Rev. E. 2007. V. 75, N. 2. P. 021502.
18. **Bazant M. Z., Storey B. D., Kornyshev A. A.** Double layer in ionic liquids: Overscreening versus crowding // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106, N. 4. P. 046102.
19. **Despotuli A. L., Andreyeva A. V.** Sozdaniye novykh tipov tonkoplennoknykh superkondensatorov dlya mikrosistemnoy tekhniki i mikro(nano)elektroniki. Chast 1. // Mikrosistemnaya tekhnika. 2003. N. 11. P. 2–10.
20. **Andreeva A. V., Despotuli A. L.** Interface design in nano-systems of advanced superionic conductors // Ionics. 2005. V. 11, N. 1–2. P. 152–160.
21. **Jonscher A. K.** The "universal" dielectric response // Nature. 1977. V. 267, N. 6. P. 673–679.
22. **Dyre J. C., Maass P., Roling B., Sidebottom D. L.** Fundamental questions relating to ion conduction in disordered solids // Rep. Prog. Phys. 2009. V. 72, N. 4. P. 046501.
23. **Sidebottom D. L.** Colloquium: Understanding ion motion in disordered solids from impedance spectroscopy scaling // Rev. Mod. Phys. 2009. V. 81, N. 3. P. 999–1014.
24. **Macdonald J. R.** Addendum to Fundamental questions relating to ion conduction in disordered solids // J. Appl. Phys. 2010. V. 107, N. 10. P. 101101.
25. **Funke K.** Solid State Ionics: from Michael Faraday to green energy — the European dimension // Sci. Tech. Adv. Mater. 2013. V. 14. P. 043502.
26. **Wojnarowska Z., Swietly-Pospiech A., Grzybowska K., Hawelek L., Paluch M., Ngai K. L.** Fundamentals of ionic conductivity relaxation gained from study of procaine hydrochloride and procainamide hydrochloride at ambient and elevated pressure // J. Chem. Phys. 2012. V. 136, N. 16. P. 164507.
27. **Popov I. I., Nigmatullin R. R., Khamzin A. A., Lounev I. V.** Conductivity in disordered structures: Verification of the generalized Jonscher's law on experimental data // J. App. Phys. 2012. V. 112, N. 9. P. 094107.
28. **Sibik J., Shalaev E. Y., Zeitler J. A.** Glassy dynamics of sorbitol solutions at terahertz frequencies // Phys. Chem. Chem. Phys. 2013. V. 15, N. 5. P. 11931–11942.
29. **Dyre J. C.** Aging of CKN: Modulus versus conductivity analysis // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110, N. 24. P. 245901.
30. **Rim Y.-H., Kim M., Kim J. E., Yang Y. S.** Ionic transport in mixed-alkali glasses: hop through the distinctly different conduction pathways of low dimensionality // New J. Phys. 2013. V. 15, N. 2. P. 023005.
31. **Mattner C., Roling B., Heuer A.** The frequency-dependence of nonlinear conductivity in disordered systems: an analytically solvable model // arXiv:1302.3258v1[cond-mat.dis-nn].
32. **Banhatti R. D., Laughman D., Badr L., Funke K.** Nearly constant loss effect in sodium borate and silver meta-phosphate glasses: New insights // Solid State Ionics. 2011. V. 192, N. 1. P. 70–75.
33. **Ke S., Lin P., Huang H., Fan H., Zeng X.** Mean-field approach to dielectric relaxation in giant dielectric constant perovskite ceramic // J. Ceram. 2013. V. 2013. Article ID 795827.
34. **Kumar T. V., Chary A. S., Bhardwaj S., Awasthi A. M., Reddy S. N.** Dielectric relaxation, ionic conduction and complex impedance studies on  $\text{NaNO}_3$  fast ion conductor // Int. J. Mat. Sci. Appl. 2013. V. 2, N. 6. P. 173–178.
35. **Parida B. N., Das P. R., Padhee R., Choudhary R. N. P.** Structural, dielectric and electrical properties of  $\text{Li}_2\text{Pb}_2\text{La}_3\text{W}_2\text{Ti}_4\text{Nb}_4\text{O}_{30}$  ceramic // Bull. Mat. Sci. 2013. V. 36, N. 5. P. 883–892.
36. **Kader M. M. A., El-Kabbany F., Naguib H. M., Gamal W. M.** Charge transport mechanism and low temperature phase transitions in  $\text{KIO}_3$  // J. Phys.: Conf. Series. 2013. V. 423. P. 012036.
37. **Kriaa A., Saad K. B., Hamzaoui A. H.** Synthesis and characterization of cancrinite-type zeolite, and its ionic conductivity study by AC impedance analysis, Rus. J. Phys. Chem. A. 2012. V. 86, N. 3. P. 2024–2032.
38. **Šantić A., Moguš-Milanković A.** Charge carrier dynamics in materials with disordered structures: a case study of iron phosphate glasses // Croa. Chem. Acta. 2012. V. 85, N. 3. P. 245–254.
39. **Chaari M., Matoussi A.** Electrical conduction and dielectric studies of  $\text{ZnO}$  pellets // Physica B. 2012. V. 407, N. 9. P. 3441–3447.
40. **Peng-Fei C., Sheng-Tao L., Jian-Ying L., Can D., Yan Y.** Physical meaning of conductivity spectra for  $\text{ZnO}$  ceramics, Chinese Phys. B. 2012. V. 21, N. 9. P. 097201.
41. **Sorokin N. I., Sobolev B. P.** Frequency response of the low-temperature ionic conductivity of single crystals  $\text{R}_1\text{-y My F}_{3\text{-y}}$  ( $\text{R} = \text{La-Er}$ ;  $\text{M} = \text{Ca, Sc, Ba, Cd}$ ) // Phys. Solid State. 2008. V. 50, N. 3. P. 402–407.
42. **Regonini D., Adamaki V., Bowen C. R., Pennock S. R., Taylor J., Dent A. C. E.** AC electrical properties of  $\text{TiO}_2$  and Magnéli phases,  $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$  // Solid State Ionics. 2012. V. 229, N. 12. P. 38–44.
43. **Singh D. P., Shahi K., Kar K. K.** Scaling behavior and nearly constant loss effect in  $\text{AgI-LiPO}_3$  composite glasses // Solid State Ionics. 2013. V. 231, N. 2. P. 102–108.
44. **Bowen C. R., Almond D. P.** Modelling the "universal" dielectric response in heterogeneous materials using microstructural electrical networks // Mat. Sci. Tech. 2006. V. 22, N. 6. P. 719–724.
45. **Henn F., Devautour-Vinot S., Giuntini J.-G., Bisquert J., Garcia-Belmonte G., Platon C., Varsamis E., Kamitsos E. I.** Analysis of AC permittivity response measured in an ionic glass: A comparison between iso and non-iso thermal conditions // IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul. 2010. V. 17, N. 4. P. 1164–1171.

И. И. Абрамов<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф., Н. В. Коломейцева<sup>1</sup>, науч. сотр.,

В. А. Лабунов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, акад. НАНБ, проф., гл. науч. сотр., И. А. Романова<sup>1</sup>, науч. сотр.,

А. С. Басаев<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, зам. директора

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> НПК "Технологический центр", Москва, Россия

e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Поступила в редакцию 13.12.2013

*Предложена численная комбинированная модель, предназначенная для моделирования гибридных функционально-интегрированных структур, представляющих собой совмещение резонансно-туннельного диода и полевого транзистора (РТД-ПТ). С ее помощью проведено моделирование РТД-ПТ на основе УНТ с различными индексами хиральности.*

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, функционально-интегрированная структура, комбинированная однозонная модель, численное моделирование

### Введение

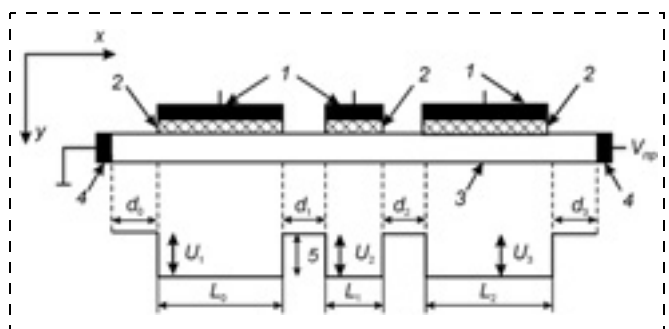
Возможные применения углеродных нанотрубок (УНТ) будут разнообразными вследствие их уникальных электрических, оптических, тепловых и механических свойств. Описанию теоретических и экспериментальных исследований различных свойств УНТ в настоящее время посвящены десятки монографий и обзоров (см., например, [1–4]). Среди обзоров по использованию наноматериалов для радиофизики применительно к системам радиолокации и радиосвязи отметим работу [5]. Следует подчеркнуть, что особое внимание в ней уделено именно УНТ. Судя по всему, качественно новым направлением в радиосвязи будет разработка радиоприемников на основе УНТ [5–9]. В то же время уже продемонстрированы различные электронные и фотонные приборы на основе УНТ [1–4], в частности, полевые транзисторы, диоды, биполярные транзисторы, бистабильные переключающие элементы, логические интегральные схемы, дешифраторы, лазеры, светодиоды, сенсоры и др. Так же как и в микроэлектронике, весьма перспективным представляется использование УНТ для создания функционально-интегрированных структур в нанoeлектронике [10].

Целью данной работы является моделирование такой структуры, объединяющей резонансно-туннельный диод (РТД) и полевой транзистор (ПТ) на основе единичной УНТ (в дальнейшем РТД-ПТ). Установлено, что РТД-ПТ будут обладать существенно различающимися N-образными вольт-амперными характеристиками (ВАХ) в зависимости от хиральности используемой УНТ.

### Модель

Структура исследуемого РТД-ПТ показана на рис. 1 и имеет три затвора (как в ПТ) и два контакта непосредственно к УНТ (как в РТД). При приложении напряжения к затворам в УНТ образуются области барьеров и квантовых ям. Активной областью являются области барьеров (их протяженность  $d_1$  и  $d_2$ ) и квантовой ямы (ее протяженность  $L_1$ ). Пассивными областями являются области, расположенные между омическими контактами к УНТ и барьером активной области как со стороны эмиттера (ее протяженность  $d_0 + L_0$ ), так и со стороны коллектора (ее протяженность  $L_2 + d_3$ ).

При строгом анализе этой функционально-интегрированной структуры необходимо самосогласованно численно решать уравнение Шредингера



**Рис. 1. Вид функционально-интегрированной структуры на основе УНТ и энергетическая диаграмма зоны проводимости:**

1 — контакты затворов; 2 — диэлектрик; 3 — УНТ; 4 — контакты к УНТ; 5 — высота барьеров;  $L_1$  — ширина ямы (ширина среднего затвора);  $d_1, d_2$  — ширина барьеров (расстояние между затворами);  $d_0 + L_0, L_2 + d_3$  — протяженность пассивных областей, расположенных между омическими контактами со стороны эмиттера и коллектора

для УНТ и уравнение Пуассона для подзатворных диэлектриков и УНТ. Задача является двумерной и очень сложной.

В связи с этим нами была разработана более простая квазидвумерная комбинированная численная модель РТД—ПТ. Опишем ее.

Модель РТД—ПТ на УНТ основывается на ранее предложенной комбинированной однозонной модели РТД на полупроводниковых материальных системах [11].

С учетом того, что толщины диэлектрика и УНТ в измерении  $y$  очень малы, считается, что потенциалы барьеров с помощью затворов в УНТ формируются независимыми от второго измерения, т. е.  $x$ , как показано на рис. 1 (для простоты приведен случай, когда приложенное напряжение  $V_{пр} = 0$  В). В результате уравнение Пуассона и уравнение Шредингера можно решать только в измерении  $x$ , что существенно упрощает задачу.

Формирование начального распределения потенциала происходит следующим образом. Сначала задается квазиуровень Ферми, постоянный в областях эмиттера и коллектора и равный соответственно нулевому значению и значению приложенного напряжения. В активной области прибора квазиуровень Ферми изменяется линейно. Это предположение о квазиуровнях Ферми используется в процессе дальнейших расчетов. Таким образом, начальное приближение для потенциала задается исходя из предположений электронейтральности и справедливости для подвижных носителей заряда бoльцмановской аппроксимации статистики Ферми — Дирака для всего прибора [11]. Для описания приконтактных областей использовалась статистика Больцмана, что приводит к упрощению модели и корректно описывает классические области. Влияние контактов учитывается с помощью контактной разности потенциалов [12].

Предложенная модель реализуется в два этапа. На первом этапе транспортная задача в измерении  $x$  моделируется с помощью самосогласованного решения одномерных уравнений Шредингера и Пуассона. Причем уравнение Пуассона решается в протяженной области прибора между контактами, а уравнение Шредингера — в заданной области, включающей активную область. В результате вычислений находится самосогласованный потенциал и заряд в приборе.

На втором этапе решается одномерное уравнение Шредингера в заданной области. Необходимость его решения для всей области прибора между контактами, а не только в области барьеров и расположенной между ними квантовой ямы, показана далее. Решение находится с использованием конечно-разностного метода. При изменении границ области решения уравнения Шредингера (положения границ раздела "сшивки") меняется профиль потенциала, что может ощутимо влиять на

Эффективная масса электронов, диаметр, ширина запрещенной зоны, собственная концентрация носителей заряда УНТ [14]

| Но-<br>мер<br>УНТ | (n, m) | $m^*$      | $d$ , нм | $E_g$ , эВ | $n_{cnt,i}$ , см <sup>-3</sup> |
|-------------------|--------|------------|----------|------------|--------------------------------|
| 1                 | (9,2)  | $0,099m_0$ | 0,800    | 0,897      | $4,911 \cdot 10^{13}$          |
| 2                 | (11,3) | $0,108m_0$ | 1,007    | 0,713      | $6,034 \cdot 10^{14}$          |
| 3                 | (5,1)  | $0,159m_0$ | 0,439    | 1,635      | $2,677 \cdot 10^8$             |
| 4                 | (3,2)  | $0,222m_0$ | 0,344    | 2,089      | $7,042 \cdot 10^4$             |
| 5                 | (6,1)  | $0,255m_0$ | 0,517    | 1,389      | $1,656 \cdot 10^9$             |
| 6                 | (4,2)  | $0,271m_0$ | 0,417    | 1,721      | $6,303 \cdot 10^6$             |

рассчитываемую ВАХ прибора [13]. В результате решения определяются волновые функции, на основе которых рассчитывается коэффициент прохождения. А далее по формуле Тсу — Есаки с учетом заданного уровня Ферми находится плотность тока. Модель может учитывать влияние приконтактных областей и использоваться для РТД—ПТ на основе УНТ при определенном задании исходных данных. Модель является квазидвумерной, так как учитывает влияние потенциала во втором измерении.

## Результаты моделирования

Была исследована структура РТД—ПТ, основанная на единичной УНТ. Для расчетов использованы следующие параметры: высота барьеров соответствует потенциальной энергии  $U_1 = U_2 = U_3 = 0,8$  эВ, полученной приложением напряжения в областях контактов затворов; ширина барьеров — 1 нм; ширина квантовой ямы — 2 нм; протяженность приконтактных областей — 10 нм. Другие параметры: индексы хиральности (n, m), эффективная масса  $m^*$  ( $m_0$  — масса покоя электрона), диаметр  $d$ , ширина запрещенной зоны  $E_g$ , собственная концентрация носителей заряда  $n_{cnt,i}$  УНТ приведены в таблице [14]. Все расчеты проведены при  $E_f = 0,4$  эВ.

Заметим, что в работе [15] была рассмотрена двухбарьерная резонансно-туннельная структура с эффективной массой, характерной для УНТ. При моделировании решалось только уравнение Шредингера с существенными упрощениями.

Исследование влияния на рассчитываемые ВАХ\* положения границ раздела "сшивки" [16] структур на основе шести различных УНТ с использованием предложенной модели показало, что область отрицательной дифференциальной проводимости отсутствует при расчетах только активной области прибора (кривая 1, рис. 2). На рис. 2 на примере исследования прибора на основе УНТ с индексами хиральности (5,1) проиллюстрировано влияние на ВАХ положения границы "сшивки" в областях эмиттера и коллектора структуры при температуре  $T = 300$  К: 1 —  $Z = 0,2$  нм, 2 —  $Z = 5,0$  нм,

\* Для удобства сравнения приведена плотность тока.

$3 - Z = 9,8$  нм ( $Z$  — расстояние от барьеров до границ "сшивки" в эмиттере и коллекторе). Таким образом, учет влияния приконтактных областей имеет принципиальное значение. Поэтому в дальнейшем  $Z$  выбиралось равным 9,8 нм.

Было проведено моделирование ВАХ РТД—ПТ на основе УНТ с различными индексами хиральности (рис. 3). Известно [3], что в зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости нанотрубки могут быть проводниками, полуметаллами, полупроводниками. При этом индексы хиральности ( $n$ ,  $m$ ) однозначным образом

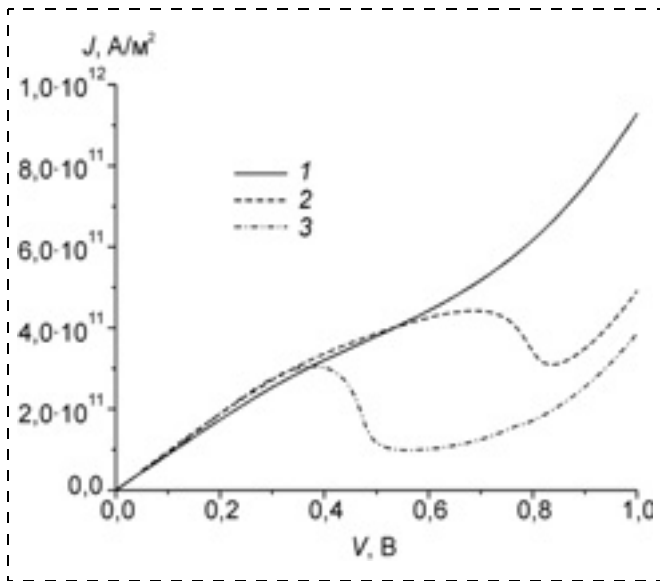


Рис. 2. ВАХ РТД—ПТ на основе УНТ ( $U_1 = U_2 = U_3 = 0,8$  эВ) при различных значениях положения границы "сшивки" в областях эмиттера и коллектора:  
1 —  $Z = 0,2$  нм; 2 —  $Z = 5,0$  нм; 3 —  $Z = 9,8$  нм

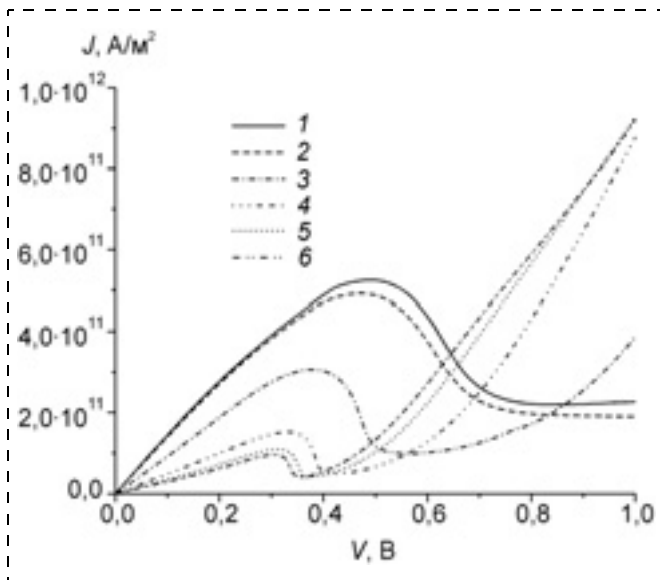


Рис. 3. ВАХ РТД—ПТ на основе УНТ с различными индексами хиральности

определяют ее структуру [3]. В данных расчетах рассматриваются УНТ, которые ведут себя как полупроводники с шириной запрещенной зоны  $E_g$  в пределах от 0,713 до 2,089 эВ (см. таблицу). Эффективные массы  $m^*$  и эффективные концентрации  $n_{\text{eff}}$  УНТ, рассчитанные автором работы [14], также приведены в таблице. Заметим, что эффективная концентрация часто используется для описания квантовых приборов (см., например, [17]).

На рис. 3 кривые 1–6 соответствуют порядковому номеру УНТ в таблице. Рисунок показывает, что с увеличением эффективной массы носителей заряда, т. е. с изменением хиральности УНТ, пиковые токи уменьшаются, а пиковые напряжения смещаются в область более низких значений. Видно, что ВАХ отличаются не только существенно количественно, но и могут сильно трансформироваться.

## Заключение

В работе предложена квазидвумерная комбинированная модель функционально-интегрированной структуры, представляющей собой совмещение РТД и ПТ на основе единичной УНТ. С использованием модели показано, что, варьируя хиральность УНТ, а следовательно, технологию их изготовления, можно создавать функционально-интегрированные РТД—ПТ с существенно различающимися электрическими характеристиками. Применение таких и им подобных структур будет перспективно при создании отдельных компонентов нанорадио второго типа [6]. Предложенная модель была включена в систему моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV [18, 19], разработанную для персональных ЭВМ.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке государственной программы научных исследований "Конвергенция" Республики Беларусь и гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф12-021.*

## Список литературы

1. **Наноматериалы.** Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год / Сб. под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2006. 152 с.
2. **Пул-мл. Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
3. **Дьячков П. Н.** Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 293 с.
4. **Нанотехнологии.** Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения — 2008 год / Сб. под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2008. 432 с.
5. **Быстров Р. П., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Соколов А. В.** Микро- и наноэлектроника применительно к системам радиолокации и радиосвязи // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 9. С. 11–50.
6. **Абрамов И. И., Лабунов В. А.** Проблемы и перспективы разработки нанорадио на углеродных нанотрубках // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 21-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо 2011), Севастополь, Украина, 12–16 сентября, 2011. Т. 1. С. 28–30.

7. Barkaline V., Abramov I., Belogurov E., Chashynski A., Labunov V., Pletezhov A., Shukevich Y. Simulation of carbon nanotubes and resonant excitation of their mechanical vibrations by electromagnetic field for nanoradio applications // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2012. Vol. 15. N 1. P. 23–42.

8. **Абрамов И. И., Баркалин В. В., Белогуров Е. А., Лабунов В. А., Чашинский А. С.** Моделирование резонансного возбуждения электромеханических колебаний в радиоприемнике на углеродных нанотрубках // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 21-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо 2011), Севастополь, Украина, 2011. Т. 2. С. 803–805.

9. **Баркалин В. В., Абрамов И. И., Лабунов В. А., Басаев А. С.** Моделирование электромагнитного возбуждения резонансных колебаний массивов углеродных нанотрубок в континуальном приближении // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо 2012), Севастополь, Украина, 2012. Т. 2. С. 705–708.

10. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. V. Резонансно-туннельные структуры // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 57–70.

11. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Комбинированная модель резонансно-туннельного диода // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 9. С. 1138–1145.

12. **Абрамов И. И.** Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Минск: БГУ, 1999. 189 с.

13. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Исследование влияния границ раздела "сшивки" в комбинированной модели РТД // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 16-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, Украина, 11–15 сентября, 2006. С. 667–668.

14. **Marulanda J. M.** Current transport modeling of carbon nanotube field effect transistors for analysis and design of integrated circuits // Ph. D. Theses, Dep. of Electrical and Computer Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, U. S. A., 2008. 129 p.

15. **Dragoman D., Dragoman M.** Terahertz oscillations in semiconducting carbon nanotube resonant-tunneling diodes // Physica E. 2004. N. 24. P. 282–289.

16. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Комбинированная двухзонная модель резонансно-туннельного диода // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 11. С. 1395–1400.

17. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. VII. Структуры на квантовых проволоках // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 7. С. 14–29; № 8. С. 7–23.

18. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И.** Система моделирования нанoeлектронных приборов — NANODEV // Микроэлектроника. 2003. Т. 32, № 2. С. 124–133.

19. **Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y.** A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7521. P. 75211E-1–75211E-11.

**I. I. Abramov<sup>1</sup>**, Prof., **N. V. Kolomeitseva<sup>1</sup>**, Research Associate, **V. A. Labunov<sup>1</sup>**, Chief Researcher, **I. A. Romanova<sup>1</sup>**, Research Associate, **A. S. Basaev<sup>2</sup>**, Deputy Director, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

<sup>1</sup> Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

<sup>2</sup> SMC "Technological Centre", Moscow, Russia

## SIMULATION OF HYBRID INTEGRATED STRUCTURES BASED ON CARBON NANOTUBES

*The combined numerical model of hybrid integrated structures including resonant tunneling diode and field-effect transistor (RTD-FET) is proposed. Simulation of RTD-FET based on carbon nanotubes of different types (chirality) was realized with the use of the model.*

**Keywords:** carbon nanotubes, hybrid integrated structure, combined one-band model, numerical simulation

### References

1. **Nanomaterialy.** Nanotekhnologii. Nanosistemnaya tekhnika. Mirovyye dostizheniya za 2005 god / Sb. pod red. P. P. Mal'tseva. M.: Tekhnosfera, 2006. 152 p.

2. **Pul-mi. Ch., Ouens F.** Nanotekhnologii. M.: Tekhnosfera, 2006. 336 p.

3. **D'yachkov P. N.** Uglerodnyye nanotrubki: stroyeniye, svoystva, primeneniye. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006. 293 p.

4. **Nanotekhnologii.** Nanomaterialy. Nanosistemnaya tekhnika. Mirovyye dostizheniya — 2008 god / Sb. pod red. P. P. Mal'tseva. M.: Tekhnosfera. 2008. 432 p.

5. **Bystrov R. P., Gulyayev Yu. V., Nikitov S. A., Sokolov A. V.** Mikro- i nanoelektronika primenitel'no k sistemam radiolokatsii i radiosvyazi // Uspekhi sovremennoy radioelektroniki. 2010. N. 9. P. 11–50.

6. **Abramov I. I., Labunov V. A.** Problemy i perspektivy razrabotki nanoradio na uglerodnykh nanotrubkakh // SVCH-tehnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 21-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii (KryMiKo 2011), Sevastopol', Ukraina, 12–16 sentyabrya, 2011. T. 1. P. 28–30.

7. **Barkaline V., Abramov I., Belogurov E., Chashynski A., Labunov V., Pletezhov A., Shukevich Y.** Simulation of carbon nanotubes and resonant excitation of their mechanical vibrations by electromagnetic field for nanoradio applications // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2012. V. 15, N. 1. P. 23–42.

8. **Abramov I. I., Barkalin V. V., Belogurov Ye. A., Labunov V. A., Chashinskiy A. S.** Modelirovaniye rezonansnogo voz-

buzhdeniya elektromekhanicheskikh kolebaniy v radiopriyemnike na uglerodnykh nanotrubkakh // SVCH-tehnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 21-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii (KryMiKo 2011), Sevastopol', Ukraina, 2011. V. 2. P. 803–805.

9. **Barkalin V. V., Abramov I. I., Labunov V. A., Basaev A. S.** Modelirovaniye elektromagnitnogo vozbulzheniya rezonansnykh kolebaniy massivov uglerodnykh nanotrubok v kontinual'nom priblizhenii // SVCH-tehnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 22-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii (KryMiKo 2012), Sevastopol', Ukraina, 2012. V. 2. P. 705–708.

10. **Abramov I. I.** Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. V. Rezonansno-tunnel'nyye struktury // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2007. N. 3. P. 57–70.

11. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V.** Kombinirovannaya model' rezonansno-tunnel'nogo dioda // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2005. V. 39. Iss. 9. P. 1138–1145.

12. **Abramov I. I.** Modelirovaniye fizicheskikh protsessov v elementakh kremniyevykh integral'nykh mikroskhem. Minsk: BGU, 1999. 189 c.

13. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V.** Issledovaniye vliyaniya granits razdela "sshivki" v kombinirovannoy modeli RTD // SVCH-tehnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 16-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii "SVCH-tehnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii", Sevastopol', Ukraina, 11–15 sentyabrya, 2006. P. 667–668.

14. Marulanda J. M. Current transport modeling of carbon nanotube field effect transistors for analysis and design of integrated circuits // Ph. D. Theses, Dep. of Electrical and Computer Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, U. S. A., 2008. 129 p.

15. Dragoman D., Dragoman M. Terahertz oscillations in semi-conducting carbon nanotube resonant-tunneling diodes // Physica E. 2004. N. 24. P. 282—289.

16. Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeytseva N. V. Kombinirovannaya dvukhzonnaya model' rezonansno-tunnel'nogo dioda // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2007. V. 41. Iss. 11. P. 1395—1400.

17. Abramov I. I. Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. VII. Struktury na kvantovykh provolokakh // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2009. N. 7. P. 14—29; N. 8. P. 7—23.

18. Abramov I. I., Goncharenko I. A., Ignatenko S. A., Korablev A. V., Novik Ye. G., Rogachev A. I. Sistema modelirovaniya nanoelektronnykh priborov — NANODEV // Mikroelektronika. 2003. V. 32, N. 2. P. 124—133.

19. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeytseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. V. 7521. P. 75211E-1—75211E-11.

УДК 621.315.592

А. П. Сеничкин, канд. техн. наук, зам. директора, А. С. Бугаев, зам. зав. лаб., А. Э. Ячменев, науч. сотр., email: alex.uhf@yandex.ru

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ pHEMT-СТРУКТУР НА ПОДЛОЖКАХ GaAs С ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ В ВИДЕ НАНОНИТЕЙ ИЗ АТОМОВ ОЛОВА

Поступила в редакцию 05.12.2013

*Разработана конструкция и опробована технология изготовления pHEMT-наногетероструктур на вицинальных подложках GaAs с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова. Предложены способы улучшения этой технологии применительно к легированию оловом для получения заданного профиля. Изготовлен тестовый образец наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs с квазиодномерными каналами проводимости в квантовой яме с плотностью тока до 350 мА/мм, достаточной для изготовления тестовых полевых транзисторов.*

**Ключевые слова:** pHEMT, нанонити, квазиодномерные структуры, дельта-легирование, технология

### Введение

Структуры с пониженной размерностью электронного газа в канале представляют определенный интерес как с точки зрения изучения фундаментальных свойств низкоразмерных объектов, так и с точки зрения повышения быстродействия приборов, изготовленных на базе таких структур благодаря эффективному уменьшению температуры электронного газа и увеличению дрейфовой скорости носителей [1]. Несмотря на отработанную технологию получения классических псевдоморфных структур с высокой подвижностью электронов (pHEMT) на GaAs, получение таких структур с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова сопровождается трудностями, связанными с выраженными свойствами атомов олова, а именно сегрегацией, реиспарением и расслаиванием, препятствующими расположению легирующей примеси в требуемой форме. Таким образом, решение задач, связанных с изготовлением подобных структур, является необходимым условием на пути получения качественной элементной базы и объектов научного исследования в физике и нанoeлектронике.

Нами уже были получены структуры, содержащие нанонити олова, встроенные в кристалл арсенида галлия [2], и разработка технологии, позволяющей изготовить модулированно-легированную

pHEMT-структуру с квантовой ямой, имеющей квазиодномерные каналы проводимости, является дальнейшим шагом по усовершенствованию приборных структур с нанонитями из атомов олова на подложках GaAs.

### Конструкция структуры

В работе использовали подложки GaAs с ориентацией  $0,3^\circ \dots 0,4^\circ$  от исходной плоскости типа (100) в направлении плоскости типа (111), как обеспечивающие наилучшие условия для изготовления нанонитей из атомов олова [2]. Для получения pHEMT-структур с дельта-легированием оловом требуется выполнение нескольких важных технологических условий:

- создать максимально гладкую поверхность перед высаживанием атомов олова, чтобы уменьшить (или в предельном случае — убрать полностью) число островков на террасах, чтобы атомы олова преимущественно занимали места на краях террас;
- подобрать условия во время дельта-легирования атомами олова, необходимые для поверхностной сегрегации олова;
- зарастить полученные при дельта-легировании атомы олова без диффузии и сегрегации.

Эти задачи возникали и при получении дельта-легированных оловом гомоэпитаксиальных структур

|     |                                          |         |
|-----|------------------------------------------|---------|
| 14. | GaAs:Si                                  | 15 нм   |
| 13. | Al <sub>0,24</sub> Ga <sub>0,76</sub> As | 33 нм   |
| 12. | i-GaAs                                   | 1 нм    |
| 11. | Прерывание роста                         |         |
| 10. | δ-Sn                                     |         |
| 9.  | Прерывание роста                         |         |
| 8.  | i-GaAs                                   | 3 нм    |
| 7.  | Al <sub>0,24</sub> Ga <sub>0,76</sub> As | 4 нм    |
| 6.  | Прерывание роста                         |         |
| 5.  | i-GaAs                                   | 2 нм    |
| 4.  | In <sub>0,2</sub> Ga <sub>0,8</sub> As   | 12 нм   |
| 3.  | Прерывание роста                         |         |
| 2.  | i-GaAs                                   | 0,8 мкм |
| 1.  | Подложка GaAs                            |         |

Рис. 1. Разработанная конструкция рНЕМТ-структуры для получения профиля легирования в виде нанонитей из атомов олова

тур GaAs, но реализация технологических решений, полученных для них, усложняется из-за отличий в конструкции рНЕМТ-структуры. В первую очередь эти отличия связаны с введением дополнительной прослойки GaAs в область дельта-легирования, что позволит воспроизвести уже изученные в гомоэпитаксиальных системах условия для легирования оловом, а также повысит гладкость поверхности и эффективность легирования. Таким образом, разработанные технологические решения включают в себя:

- введение дополнительной прослойки GaAs перед дельта-легированием и последующее прерывание роста (соответственно слои 8 и 9 на рис. 1) при оптимальной температуре;
- увеличение температуры подложки во время дельта-легирования оловом, а также во время прерывания роста после легирования (соответственно слои 10 и 11 на рис. 1);
- введение дополнительной прослойки GaAs для заращивания атомов олова и уменьшение температуры подложки во время роста этой прослойки (слой 12 на рис. 1).

### Отработка технологии изготовления и результаты измерений

Образцы изготавливали методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Ribier 32P. Все структуры имеют одинаковую геометрию, представленную на рис. 1, кроме образца В, в котором во время дельта-легирования (слой 10) используется кремний вместо олова (референсный образец для сравнения). Значение ВЕР (давление, эквивалентное потоку) для мышьяка было постоянно и составляло  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр.

Пробный образец А, для которого использовали стандартные для рНЕМТ температуры барьерного и контактного слоев ( $T_s = 580^\circ\text{C}$ ) со степенью легирования  $1,48 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  показал слоевую концентрацию электронов при комнатной температуре  $< 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (табл. 1), что явно свидетельствует о неоптимальности стандартных условий для легирования оловом. Референсный образец В, легированный кремнием, при аналогичных условиях имеет концентрацию  $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Для оптимизации условий роста были проанализированы условия по заращиванию высаженных атомов олова: для уменьшения реиспарения и сегрегации атомов олова температура заращивания дельта-легированного слоя была снижена до  $500^\circ\text{C}$  вместо  $580^\circ\text{C}$  для стандартного рНЕМТ, что должно повысить концентрацию носителей в квантовой яме. Гладкость поверхности перед высаживанием контролировалась с помощью дифракции быстрых электронов на отражение (RHEED), оптимальные условия для этого уже были определены при разработке технологии гомоэпитаксиальных структур GaAs с нанонитями из атомов олова. Выбранные значения параметров технологических слоев представлены в табл. 2.

На базе предложенной конструкции с использованием оптимизированных параметров был изготовлен образец С рНЕМТ-наногетероструктуры со слоевой концентрацией атомов олова  $1,48 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Измерения электрофизических параметров методом эффекта Холла показали значения  $n \approx 7,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $\mu \approx 5500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . При том же уровне легирования заметно увеличение

Таблица 1  
Условия изготовления и измеренные параметры наногетероструктур

| Образец | Условия  | Концентрация легирования $\delta\text{-Sn}$ , $\text{см}^{-2}$ | Измеренные параметры эффекта Холла при 300 К  |                        |
|---------|----------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|
|         |          |                                                                | $\mu$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ | $n$ , $\text{см}^{-2}$ |
| A       | Стандарт | $1,48 \cdot 10^{13}$                                           | 4900                                          | $6,5 \cdot 10^{10}$    |
| B       | Стандарт | $1,48 \cdot 10^{13*}$                                          | 5880                                          | $2,1 \cdot 10^{12}$    |
| C       | Оптимиз. | $1,48 \cdot 10^{13}$                                           | 5600                                          | $7,8 \cdot 10^{11}$    |
| D       | Оптимиз. | $2,96 \cdot 10^{13}$                                           | 5530                                          | $2 \cdot 10^{12}$      |

\* Концентрация легирования  $\delta\text{-Si}$

Таблица 2  
Итоговые значения параметров технологических слоев

| Номер слоя | Температура подложки, $^\circ\text{C}$ | Время, с |
|------------|----------------------------------------|----------|
| 12...14    | 500                                    | —        |
| 11         | 620                                    | 45       |
| 10         | 610                                    | —        |
| 9          | 620                                    | 30       |
| 8          | 620                                    | —        |

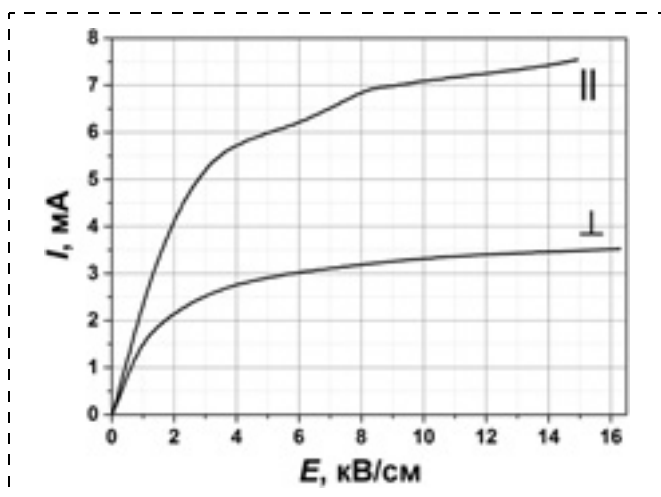


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики образца D в направлениях перпендикулярно ( $\perp$ ) и параллельно ( $\parallel$ ) нанонитям из атомов олова

концентрации носителей почти на порядок, что говорит о правильности подхода к оптимизации ростовых режимов, но она все еще недостаточна для использования в приборных структурах.

Дальнейшее увеличение концентрации атомов олова при легировании до значений  $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  в сочетании с оптимизированными режимами эпитаксиального роста привело к получению образца D гетероструктуры со слоевой концентрацией электронов  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (см. табл. 1). Для дальнейших измерений вольт-амперной характеристики (ВАХ) на нем с помощью контактной фотолитографии методом "взрыва" была изготовлена серия омических контактов Ni/Ge/Au/Ni/Au шириной  $W = 20 \text{ мкм}$  и расстоянием между ними  $L = 6 \text{ мкм}$  в двух направлениях: перпендикулярно и параллельно краям террас вицинальной поверхности подложки. ВАХ снимали при комнатной температуре на зондовой станции, подключенной к характериографу Sony Tektronix 370A. Получен-

ные кривые показаны на рис. 2. Плотность тока насыщения достигает  $\sim 350 \text{ мА/мм}$  для параллельного направления и  $\sim 175 \text{ мА/мм}$  для перпендикулярного, показывая близкие для типичных транзисторов на GaAs значения. Заметны полученные ранее на гомоэпитаксиальных структурах GaAs, в которых сформировались нанонити, анизотропия проводимости и перегиб ВАХ [3] при выходе на насыщение в параллельном направлении. Наличие особенностей ВАХ, характерных для нанонитей в гомоэпитаксиальных структурах GaAs позволяет сделать заключение о формировании аналогичных квазиодномерных электронных каналов в гетеропереходе.

## Заключение

В работе оптимизирована и отработана технология изготовления pHEMT-структур с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова. Изготовлен тестовый образец такой структуры. Наличие потенциального рельефа в виде квазиодномерных каналов (нанонитей) в образце подтверждается анализом кривых ВАХ, на которых присутствует перегиб в области насыщения и анизотропия при протекании тока в перпендикулярных направлениях. Достигнутая плотность тока насыщения  $\leq 350 \text{ мА/мм}$  позволяет использовать такую структуру для изготовления тестовых транзисторов и проведения дальнейших исследований.

## Список литературы

1. Leburton J. P. Size effects on polar optical phonon scattering of 1-D and 2-D electron gas in synthetic semiconductors // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. P. 2850–2855.
2. Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. Вольт-амперные характеристики системы нанонитей из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 11–12.
3. Сеничкин А. П., Бугаев А. С., Ячменев А. Э. Особенности вольт-амперных характеристик системы нанонитей из атомов олова, встроенных в кристалл арсенида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 11. С. 52–54.

A. P. Senichkin, Deputy Director, A. S. Bugaev, Deputy Head of Laboratory, A. E. Jachmenev, Research Associate  
Institute of Ultra High Frequency Semiconductor

## OPTIMIZATION OF pHEMT PRODUCING TECHNOLOGY ON THE GaAs SUBSTRATES WITH DOPING PROFILE IN THE FORM OF SN NANOWIRES

*In this work construction and technology of pHEMT nanoheterostructures on a vicinal GaAs substrates with doping profile in the form of Sn nanowires was developed. Methods of improving this technology with regard to Sn doping for receiving required doping profile was proposed. Test sample of an AlGaAs/InGaAs nanoheterostructure with quasi-one-dimensional conductivity channels in a quantum well with current density up to 350 mA/mm which is high enough for making of test field effect transistor was produced.*

**Keywords:** pHEMT, nanowires, quasi-one-dimensional structures, delta-doping, technology

## References

1. Leburton J. P. Size effects on polar optical phonon scattering of 1-D and 2-D electron gas in synthetic semiconductors // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. P. 2850–2855.
2. Senichkin A. P., Bugaev A. S., Jachmenev A. E. Volt-ampere characteristics of nanonite system from tin atoms, built-

in in crystal arsenide gallium // Nano- and microsystem technology. 2011. N. 12. P. 11–12.

3. Senichkin A. P., Bugaev A. S., Jachmenev A. E. Features of volt-ampere characteristics of nanonite system from tin atoms, built-

С. П. Тимошенков<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., зав. каф., С. А. Анчутин<sup>1</sup>, вед. инж.,  
В. Е. Плеханов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц., Е. С. Кочурина<sup>1</sup>, канд. техн. наук, инж.-констр.,  
А. С. Тимошенков<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Е. В. Зуев<sup>1</sup>, аспирант, инженер

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет "МИЭТ", e-mail: str@miee.ru

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (НИУ)

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ КОЛЬЦЕВОГО МИКРОГИРОСКОПА

Поступила в редакцию 24.12.2013

*Приведено описание конструкции и принцип работы чувствительного элемента кольцевого микрогироскопа. Разработана математическая модель чувствительного элемента и рассмотрены особенности магнитоэлектрической системы возбуждения колебаний кольцевого микрогироскопа. Представлены результаты численного моделирования кольцевого микрогироскопа, работающего в режиме идеализированного датчика угловой скорости.*

**Ключевые слова:** чувствительный элемент, кольцевой микрогироскоп, математическая модель, численное моделирование

### Введение

Развитие микрогироскопов является одним из перспективных направлений развития навигационной и гироскопической техники. Микромеханические преобразователи, содержащие кремниевые исполнительные элементы, имеют ряд значительных преимуществ по сравнению с известными приборами того же функционального назначения, выполненными по традиционной технологии, это обеспечивается использованием при проектировании этих устройств материаловедческой и технологической баз современной твердотельной микроэлектроники. Микромеханические преобразователи обладают высоким быстродействием, имеют значительно меньшую стоимость, меньшие габаритные размеры, высокую ударо- и вибропрочность, невысокое энергопотребление, что определяет больший спектр применения данных устройств. Следовательно, работы в данном направлении являются перспективными.

### Конструкция чувствительного элемента кольцевого микрогироскопа

Чувствительный элемент разрабатываемого кольцевого микрогироскопа представляет собой миниатюрную сборку, содержащую следующие элементы (рис. 1): кристалл кольцевого резонатора с подвесом и статором 3; цилиндрический магнит 2 с направлением намагничивания, перпендикулярным основаниям цилиндра; верхний 1 и нижний 5 магнитопроводы; стеклянную подложку 5; герметичный корпус 6 (на рисунке не показана крышка корпуса). Кристалл изготавливается по технологии микромеханики из монокристаллического кремния. В состав кристалла (рис. 2) входят: кольцевой резонатор 1, элементы упругого подвеса резонатора 2, статор кристалла 3.

Принцип измерения угловой скорости кольцевым микрогироскопом основан на инерционных свойствах стоячей волны, возбуждаемой в кольцевом резонаторе. При резонансном возбуждении в резонаторе второй формы собственных колебаний возникает стоячая волна, которая стремится сохранить свое положение в инерциальном простран-

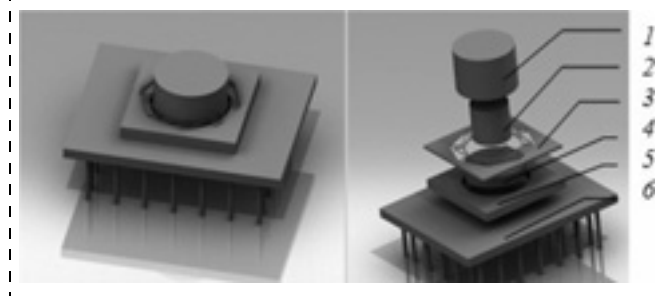


Рис. 1. Чувствительный элемент кольцевого микрогироскопа (без крышки и элементов коммутации)

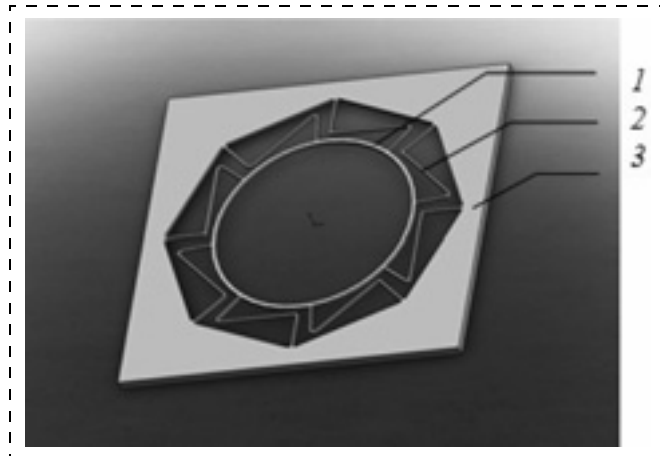


Рис. 2. Кристалл кольцевого резонатора

ве (с точностью до коэффициента пропорциональности). Возбуждая волну вдоль одной из осей жесткости резонатора, угловую скорость вокруг оси, перпендикулярной плоскости резонатора, можно измерить по углу поворота оси колебаний [1—3].

### Математическая модель чувствительного элемента кольцевого микрогирискапа

В качестве рабочей формы колебаний кольцевого резонатора кольцевого микромеханического гироскопа (КМГ) используется вторая мода [4]. Схема возбуждения показана на рис. 3.

Через пару проводников пропускается переменный электрический ток (в установившемся режиме его частота равна собственной частоте второй моды колебаний):

$$i(\varphi, t) = \begin{cases} 0, & \frac{1}{2}\varphi_{эл} < \varphi < \pi - \frac{1}{2}\varphi_{эл}; \\ i(t), & -\frac{1}{2}\varphi_{эл} \leq \varphi \leq \frac{1}{2}\varphi_{эл}; \\ \pi, & -\frac{1}{2}\varphi_{эл} \leq \varphi \leq \pi + \frac{1}{2}\varphi_{эл}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $i(t)$  — ток;  $\varphi_{эл}$  — угловой размер проводника. График функции  $i(\varphi, 0)$  показан на рис. 4.

Проводники изготавливают путем напыления металла (например алюминия) на поверхность резонатора. Изготовленный резонатор помещают в зазор магнитной системы (рис. 5) так, что плоскость резонатора перпендикулярна силовым линиям магнитного поля в зазоре.

Таким образом, ток, протекающий по проводникам системы возбуждения колебаний резонатора, приводит к появлению силы Лоренца, дейст-

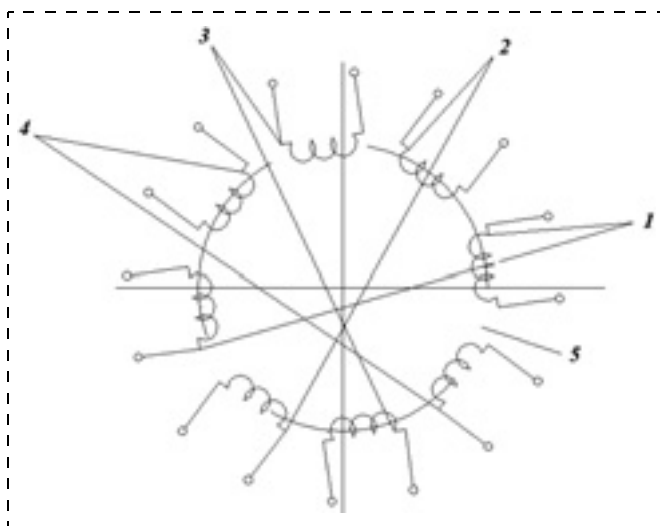


Рис. 3. Система проводников чувствительного элемента КМГ: 1 — проводники первичного контура системы управления колебаниями резонатора; 2 — проводники вторичного контура системы управления колебаниями резонатора; 3 — проводники первичного контура системы съема сигнала; 4 — проводники вторичного контура системы съема сигнала; 5 — кольцевой резонатор

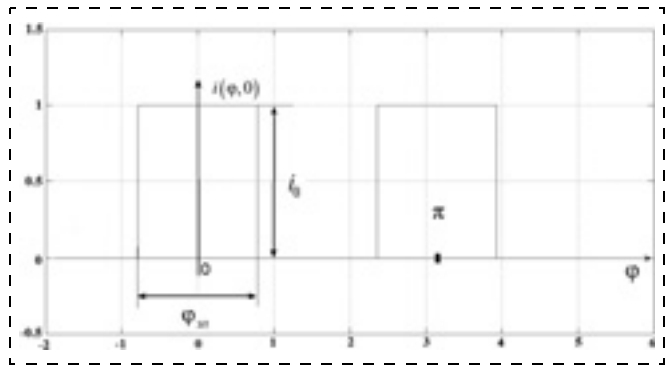


Рис. 4. Распределение тока по углу

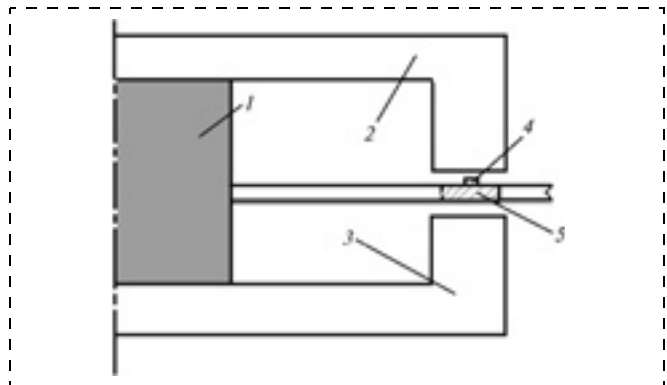


Рис. 5. Магнитная система чувствительного элемента КМГ: 1 — магнит; 2 — верхний магнитопровод; 3 — нижний магнитопровод; 4 — проводник; 5 — кольцевой резонатор

вующей на резонатор. Силу Лоренца, отнесенную к длине проводника, запишем в виде:

$$p = Bi(\varphi, t), \quad (2)$$

где  $B$  — индукция магнитного поля в зазоре магнитной системы.

Уравнение движения кольца под действием внешних сил имеет вид [5]:

$$\ddot{\omega}'' - \ddot{\omega} + 4\Omega\dot{\omega}' + \kappa^2(\omega^{VI} + 2\omega^{IV} + \omega'') + \kappa^2\xi(\omega^{VI} + 2\omega^{IV} + \omega'') = (p''_{\omega} - p'_{\varphi})/(\rho S).$$

В рамках линейной модели (малые деформации кольцевого резонатора) примем  $p_{\varphi} = 0$ . Тогда уравнение движения кольцевого резонатора КМГ с магнитоэлектрической системой возбуждения колебаний принимает вид:

$$\ddot{\omega}'' - \ddot{\omega} + 4\Omega\dot{\omega}' + \kappa^2(\omega^{VI} + 2\omega^{IV} + \omega'') + \kappa^2\xi(\omega^{VI} + 2\omega^{IV} + \omega'') = p''_{\omega}/(\rho S),$$

где  $\omega(\varphi, t)$  — нормальное перемещение точки кольца в произвольный момент времени;  $\Omega$  — проекция угловой скорости кольца на ось чувствительности (перпендикулярную плоскости кольца);  $\kappa^2 = \frac{EJ}{\rho SR^4}$  — плотность материала кольцевого резонатора;  $E$  — модуль Юнга материала кольца;  $S$  — площадь поперечного сечения кольца;  $R$  — ра-

диус средней линии недеформированного кольцевого резонатора;  $\xi$  — коэффициент, характеризующий время затухания свободных колебаний резонатора;  $p_\omega$  — проекция внешней распределенной нагрузки на нормаль к недеформированному кольцевому резонатору.

Подставляя (1) в (2), получим

$$p_\omega = Bi(t)f(\varphi),$$

где функция  $f(\varphi) = \begin{cases} 0, & \frac{1}{2}\varphi_{\text{эл}} < \varphi < \pi - \frac{1}{2}\varphi_{\text{эл}} \\ 1, & 0 \leq \varphi \leq \frac{1}{2}\varphi_{\text{эл}} \end{cases}$  имеет

период, равный  $\pi$ .

Разложим функцию  $f(\varphi)$  в ряд Фурье на отрезке  $\varphi \in [-\pi, \pi]$ :

$$f(\varphi) = \frac{2}{\pi} \left( \varphi_{\text{эл}} + \sin(\varphi_{\text{эл}})\cos(2\varphi) + \frac{1}{2}\sin(2\varphi_{\text{эл}})\cos(4\varphi) + \dots \right).$$

При рассмотрении работы кольца на второй моде колебаний в выражении внешней силы интерес представляет только вторая гармоника, так как остальные формы не являются резонансными в установившемся режиме работы электроники КМГ.

Кроме того, зафиксируем угловое положение проводников первичного и вторичного контуров системы управления колебаниями:  $\varphi^I = \varphi_{\text{Э}}$ ;  $\varphi^{II} = \frac{\pi}{4} + \varphi_{\text{Э}}$ .

Тогда выражение для второй гармоники суммарной силы принимает вид

$$\begin{aligned} p_{\Sigma\omega} &= \frac{2B}{\pi} \sin(\varphi_{\text{эл}})\cos(2(\varphi - \varphi_{\text{Э}}))i_1(t) + \\ &+ \frac{2B}{\pi} \sin(\varphi_{\text{эл}})\sin(2(\varphi - \varphi_{\text{Э}}))i_2(t); \\ p''_{\Sigma\omega} &= -\frac{8B\sin(\varphi_{\text{эл}})}{\pi} \cos(2(\varphi - \varphi_{\text{Э}}))i_1(t) - \\ &- \frac{8B\sin(\varphi_{\text{эл}})}{\pi} \sin(2(\varphi - \varphi_{\text{Э}}))i_2(t), \end{aligned}$$

где  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  — токи в проводниках первичного и вторичного контуров системы управления колебаниями резонатора соответственно.

Тогда упрощенное уравнение движения кольцевого резонатора с использованием магнитоэлектрической системы возбуждения колебаний принимает вид:

$$\begin{aligned} \ddot{\omega}'' - \ddot{\omega} + 4\Omega\dot{\omega}' + \kappa^2(\omega^{\text{VI}} + 2\omega^{\text{IV}} + \omega'') + \\ + \kappa^2\xi(\omega^{\text{VI}} + 2\omega^{\text{IV}} + \omega'') = \\ = -H\cos(2(\varphi - \varphi_{\text{Э}}))i_1(t) - H\sin(2(\varphi - \varphi_{\text{Э}}))i_2(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $H = \frac{8B\sin(\varphi_{\text{эл}})}{\pi\rho S}$ .

Решение уравнения (3) будем искать в виде

$$\omega(\varphi, t) = p(t)\cos(2\varphi) + q(t)\sin(2\varphi). \quad (4)$$

Подставляя (4) в уравнение (3), получим

$$\begin{aligned} \cos(2\varphi) \left( \ddot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2p(t) - \frac{8}{5}\Omega\dot{q}(t) \right) + \\ + \sin(2\varphi) \left( \ddot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2q(t) + \frac{8}{5}\Omega\dot{p}(t) \right) = \\ = \cos(2\varphi) \left( \frac{1}{5}H\cos(2\varphi_{\text{Э}})i_1(t) - \frac{1}{5}H\sin(2\varphi_{\text{Э}})i_2(t) \right) + \\ + \sin(2\varphi) \left( \frac{1}{5}H\sin(2\varphi_{\text{Э}})i_1(t) + \frac{1}{5}H\cos(2\varphi_{\text{Э}})i_2(t) \right). \end{aligned}$$

Используя метод Бубнова—Галеркина, запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2p(t) - \frac{8}{5}\Omega\dot{q}(t) = \\ = \frac{1}{5}H\cos(2\varphi_{\text{Э}})i_1(t) - \frac{1}{5}H\sin(2\varphi_{\text{Э}})i_2(t); \\ \ddot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2q(t) + \frac{8}{5}\Omega\dot{p}(t) = \\ = \frac{1}{5}H\sin(2\varphi_{\text{Э}})i_1(t) + \frac{1}{5}H\cos(2\varphi_{\text{Э}})i_2(t). \end{cases} \quad (5)$$

Уравнения (5) описывают движение (вторую моду) кольцевого резонатора КМГ.

Дополним систему уравнений (5) уравнениями изменения ЭДС, описывающими работу индукционной системы съема сигнала:

$$E(\varphi_C) = \int_{\varphi_C - \frac{\varphi_{\text{эл}}}{2}}^{\varphi_C + \frac{\varphi_{\text{эл}}}{2}} B(R + \omega(\varphi, t))\dot{\omega}(\varphi, t)d\varphi,$$

где  $\varphi_C$  — угловое положение электрода системы съема сигнала;  $\varphi_{\text{эл}}$  — угловой размер электрода системы съема сигнала (конструктивно совпадает с угловым размером системы возбуждения колебаний).

Для случая малых амплитуд колебаний кольцевого резонатора (с учетом выражения (4)) получим

$$E(\varphi_C) = BR\sin(\varphi_{\text{эл}})(\cos(2\varphi_C)\dot{p}(t) + \sin(2\varphi_C)\dot{q}(t)).$$

В общем виде ЭДС, наводимая в проводнике системы съема сигнала, имеет вид:

$$\begin{aligned} E(\varphi_C) &= \dot{p}(t)(BR\cos(2\varphi_C)\sin(\varphi_{\text{эл}}) + \\ &+ A_{11}p(t) + A_{12}q(t)) + \dot{q}(t)(BR\sin(2\varphi_C)\sin(\varphi_{\text{эл}}) + \\ &+ A_{21}p(t) + A_{22}q(t)); \end{aligned}$$

$$A_{11} = \frac{B\varphi_{\text{эл}}}{2} + \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\text{эл}})\cos(4\varphi_C);$$

$$A_{12} = \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\text{эл}})\sin(4\varphi_C); \quad A_{21} = A_{12};$$

$$A_{22} = \frac{B\varphi_{\text{эл}}}{2} - \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\text{эл}})\cos(4\varphi_C).$$

Зафиксируем угловое положение проводников первичного и вторичного контуров системы съема сигнала:

$$\begin{aligned} \varphi_{C1}^I &= \frac{\pi}{2} + \varphi_{\Theta}; & \varphi_{C2}^I &= \frac{3\pi}{2} + \varphi_{\Theta}; \\ \varphi_{C1}^{II} &= \frac{3\pi}{4} + \varphi_{\Theta}; & \varphi_{C2}^{II} &= \frac{7\pi}{4} + \varphi_{\Theta}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} E^I &= E(\varphi_{C1}^I) = E(\varphi_{C2}^I) = \\ &= \dot{p}(t)(-BR\cos(2\varphi_{\Theta})\sin(\varphi_{\Theta}) + A_{11}p(t) + A_{12}q(t)) + \\ &+ \dot{q}(t)(-BR\sin(2\varphi_{\Theta})\sin(\varphi_{\Theta}) + A_{21}p(t) + A_{22}q(t)); \\ A_{11} &= \frac{B\varphi_{\Theta}}{2} + \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\Theta})\sin(4\varphi_{\Theta}); \\ A_{12} &= \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\Theta})\sin(4\varphi_{\Theta}); & A_{21} &= A_{12}; \\ A_{22} &= \frac{B\varphi_{\Theta}}{2} - \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\Theta})\cos(4\varphi_{\Theta}); \\ E^{II} &= E(\varphi_{C1}^{II}) = E(\varphi_{C2}^{II}) = \dot{p}(t)(BR\sin(2\varphi_{\Theta})\sin(\varphi_{\Theta}) + \\ &+ A_{11}p(t) + A_{12}q(t)) + \dot{q}(t)(-BR\cos(2\varphi_{\Theta})\sin(\varphi_{\Theta}) + \\ &+ A_{21}p(t) + A_{22}q(t)); \\ A_{11} &= \frac{B\varphi_{\Theta}}{2} - \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\Theta})\cos(4\varphi_{\Theta}); \\ A_{12} &= -\frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\Theta})\sin(4\varphi_{\Theta}); & A_{21} &= A_{12}; \\ A_{22} &= \frac{B\varphi_{\Theta}}{2} + \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\Theta})\cos(4\varphi_{\Theta}). \end{aligned}$$

В схеме съема сигнала соединим проводники соответствующего контура последовательно, что даст суммарные ЭДС в первичном и вторичном контурах соответственно  $E_1 = 2E^I$ ;  $E_2 = 2E^{II}$ .

В итоге запишем систему уравнений, описывающую кольцевой резонатор с магнитоэлектрическим возбуждением и управлением колебаниями и индукционной системой съема сигнала:

$$\begin{cases} \ddot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2p(t) - \frac{8}{5}\Omega\dot{q}(t) = \\ = \frac{1}{5}H\cos(2\varphi_{\Theta})i_1(t) - \frac{1}{5}H\sin(2\varphi_{\Theta})i_2(t), \\ \ddot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2q(t) + \frac{8}{5}\Omega\dot{p}(t) = \\ = \frac{1}{5}H\sin(2\varphi_{\Theta})i_1(t) + \frac{1}{5}H\cos(2\varphi_{\Theta})i_2(t), \\ E_1 = 2\dot{p}(t)(-BR\cos(2\varphi_{\Theta})\sin(\varphi_{\Theta}) + Ap(t) + Dq(t)) + \\ + 2\dot{q}(t)(-BR\sin(2\varphi_{\Theta})\sin(\varphi_{\Theta}) + Dp(t) + Cq(t)), \\ E_2 = 2\dot{p}(t)(BR\sin(2\varphi_{\Theta})\sin(\varphi_{\Theta}) + Cp(t) - Dq(t)) + \\ + 2\dot{q}(t)(-BR\cos(2\varphi_{\Theta})\sin(\varphi_{\Theta}) - Dp(t) + Aq(t)), \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \frac{B\varphi_{\Theta}}{2} + \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\Theta})\cos(4\varphi_{\Theta}); \\ C &= \frac{B\varphi_{\Theta}}{2} - \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\Theta})\cos(4\varphi_{\Theta}); \\ B &= \frac{1}{4}B\sin(2\varphi_{\Theta})\sin(4\varphi_{\Theta}); \\ H &= \frac{8B\sin(\varphi_{\Theta})}{\pi\rho S}; \quad \kappa^2 = \frac{EJ}{\rho SR^4}; \end{aligned}$$

$i_1(t)$  и  $i_2(t)$  — управляющие токи первичного и вторичного контуров соответственно;  $E_1$  и  $E_2$  — ЭДС на выходе системы съема сигнала первичного и вторичного контуров соответственно.

При этом рассматривается вторая мода колебаний резонатора (выражение (5)).

Для конкретной конструкции резонатора КМГ  $\varphi_{\Theta} = 0$ ;  $\varphi_{\Theta} = \pi/4$ .

Тогда система (6) примет вид:

$$\begin{cases} \ddot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2p(t) - \frac{8}{5}\Omega\dot{q}(t) = \frac{1}{5}Hi_1(t), \\ \ddot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2q(t) + \frac{8}{5}\Omega\dot{p}(t) = \frac{1}{5}Hi_2(t), \\ E_1 = 2B\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}R + \frac{\pi+2}{8}p(t)\right)\dot{p}(t) + 2B\frac{\pi+2}{8}\dot{q}(t)q(t), \\ E_2 = 2B\frac{\pi+2}{8}\dot{p}(t)p(t) + 2B\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}R + \frac{\pi+2}{8}q(t)\right)\dot{q}(t), \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{где } H = \frac{4B\sqrt{2}}{\pi\rho S}, \quad \kappa^2 = \frac{EJ}{\rho SR^4}.$$

Система уравнений (7) описывает ЭДС, наводимые в проводниках индукционной системы съема сигнала чувствительного элемента (ЧЭ) КМГ с магнитоэлектрическим возбуждением колебаний кольцевого резонатора на второй моде. Возбуждение колебаний резонатора на второй моде обеспечивается геометрией проводников, их подключением, а также работой на резонансной частоте второй формы колебаний.

В программе Simulink (MathWorks) разработана схема модели ЧЭ КМГ (рис. 6).

Разработанная модель может быть использована для проектирования и анализа блока электроники КМГ, оценки основных параметров КМГ.

#### Анализ модели чувствительного элемента кольцевого микрогирискапа при работе в режиме идеального датчика угловой скорости

Рассмотрим подробнее уравнения (7) в случае вынужденного позиционного возбуждения колебаний резонатора ЧЭ КМГ на собственной частоте второй моды колебаний. В этом случае можно записать  $i_1(t) = i_{10}\sin(\omega_0 t)$ ;  $i_2(t) = 0$ .

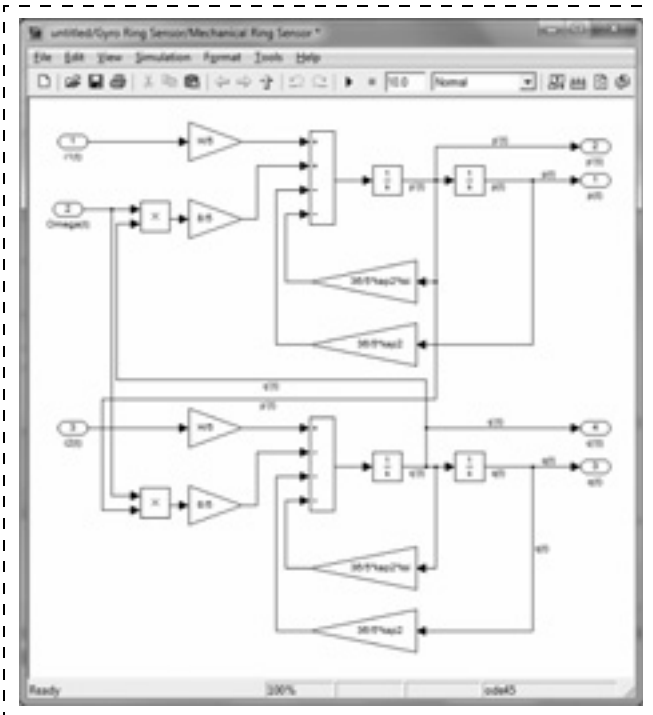


Рис. 6. Модель ЧЭ КМГ. Модуль кольцевого резонатора

Здесь  $\omega_0$  — собственная частота колебаний резонатора на второй моде.

$$\omega_0 = \frac{6}{\sqrt{5}} \kappa. \quad (8)$$

Кроме того, выразим коэффициент  $\xi$  через добротность колебаний резонатора  $Q$ :

$$\xi = \frac{1}{\omega_0 Q}. \quad (9)$$

В этом случае система уравнений (7), с учетом обозначений (8) и (9), примет следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{p}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \dot{p}(t) + \omega_0^2 p(t) - \frac{8}{5} \Omega \dot{q}(t) = \frac{1}{5} H i_{10} \sin(\omega_0 t), \\ \ddot{q}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \dot{q}(t) + \omega_0^2 q(t) + \frac{8}{5} \Omega \dot{p}(t) = 0, \\ E_1 = 2B \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} R + \frac{\pi+2}{8} p(t) \right) \dot{p}(t) + 2B \frac{\pi+2}{8} \dot{q}(t) q(t), \\ E_2 = 2B \frac{\pi+2}{8} \dot{p}(t) p(t) + 2B \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} R + \frac{\pi+2}{8} q(t) \right) \dot{q}(t). \end{cases} \quad (10)$$

Для простоты анализа уравнений примем, что влияние переменной  $q(t)$  на переменную  $p(t)$  пренебрежимо мало, что верно в случае, когда энергетика вынужденных колебаний резонатора ЧЭ КМГ значительно превышает энергетику колебаний, вызванных силами Кориолиса. Это условие обычно выполняется на практике. Тогда решение первого

уравнения системы (10) примет вид (для значений  $Q$ , больших 1000):

$$p(t) = -\frac{H i_{10} Q}{5 \omega_0^2} \cos(\omega_0 t) + e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \frac{H i_{10}}{10 \omega_0^2} (2Q \cos(\omega_0 t) + \sin(\omega_0 t)). \quad (11)$$

В установившемся режиме решение можно записать в виде:

$$p(t) = -\frac{H i_{10} Q}{5 \omega_0^2} \cos(\omega_0 t). \quad (12)$$

При этом время выхода на установившийся режим колебаний можно оценить как время, необходимое для уменьшения амплитуды затухающей составляющей в выражении (11) в 100 раз (до уровня -40 дБ). Это время определяется коэффициентом  $-\frac{\omega_0 t}{2Q}$ . Тогда время выхода на режим опреде-

$$\text{лим как } t_{\text{уст}} = \frac{2 \ln(10^{-2}) Q}{\omega_0}.$$

С учетом выражения (12) перепишем систему уравнений (10):

$$\begin{cases} \ddot{q}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \dot{q}(t) + \omega_0^2 q(t) + \frac{8}{5} \Omega \dot{p}(t) = 0, \\ E_1 = 2B \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} R - \frac{\pi+2}{8} \frac{H i_{10} Q}{5 \omega_0^2} \cos(\omega_0 t) \right) \times \\ \times \frac{H i_{10} Q}{5 \omega_0} \sin(\omega_0 t) + 2B \frac{\pi+2}{8} \dot{q}(t) q(t), \\ E_2 = -2B \frac{\pi+2}{8} \frac{H i_{10} Q}{5 \omega_0} \sin(\omega_0 t) \frac{H i_{10} Q}{5 \omega_0^2} \cos(\omega_0 t) + \\ + 2B \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} R + \frac{\pi+2}{8} q(t) \right) \dot{q}(t), \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \ddot{q}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \dot{q}(t) + \omega_0^2 q(t) = -\frac{8}{25} \frac{H i_{10} Q}{\omega_0} \Omega \sin(\omega_0 t), \\ E_1 = -\sqrt{2} B R \frac{H i_{10} Q}{5 \omega_0} \sin(\omega_0 t) - B \frac{\pi+2}{8} \frac{H^2 i_{10}^2 Q^2}{25 \omega_0^3} \times \\ \times \sin(2\omega_0 t) + B \frac{\pi+2}{4} \dot{q}(t) q(t), \\ E_2 = -B \frac{\pi+2}{8} \frac{H^2 i_{10}^2 Q^2}{25 \omega_0^3} \sin(2\omega_0 t) + \\ + B \left( -\sqrt{2} R + \frac{\pi+2}{4} q(t) \right) \dot{q}(t). \end{cases} \quad (13)$$

Решение для первого уравнения системы (13) запишем в виде

$$q(t) = \frac{8Hi_{10}Q^2}{25\omega_0^3} \Omega \cos(\omega_0 t) - e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \frac{4Hi_{10}Q}{25\omega_0^3} \Omega (2Q \cos(\omega_0 t) + \sin(\omega_0 t)).$$

Установившийся режим описывается выражением

$$q(t) = \frac{8Hi_{10}Q^2}{25\omega_0^3} \Omega \cos(\omega_0 t). \quad (14)$$

Перепишем с учетом (14) систему (13):

$$\begin{cases} E_1 = -\frac{\sqrt{2}BRHi_{10}Q}{5\omega_0} \sin(\omega_0 t) - \\ -\frac{\pi+2}{25} \frac{BH^2 i_{10}^2 Q^2}{\omega_0^3} \left( \frac{1}{8} + \frac{8}{25} \frac{Q^2}{\omega_0^3} \Omega^2 \right) \sin(2\omega_0 t), \\ E_2 = \frac{8B\sqrt{2}RHi_{10}Q^2}{25\omega_0^2} \Omega \sin(\omega_0 t) - \\ -\frac{\pi+2}{25} \frac{BH^2 i_{10}^2 Q^2}{\omega_0^3} \left( \frac{1}{8} + \frac{8}{25} \frac{Q^2}{\omega_0^3} \Omega^2 \right) \sin(2\omega_0 t). \end{cases}$$

Рассмотрим только гармоники на собственной частоте  $\omega_0$  резонатора ЧЭ КМГ. В этом случае решение исходной системы (10) примет вид:

$$\begin{cases} p(t) = -\frac{Hi_{10}Q}{5\omega_0^2} \cos(\omega_0 t), \\ q(t) = \frac{8Hi_{10}Q^2}{25\omega_0^3} \Omega \cos(\omega_0 t), \\ E_1 = -\frac{\sqrt{2}BRHi_{10}Q}{5\omega_0} \sin(\omega_0 t), \\ E_2 = \frac{8\sqrt{2}BRHi_{10}Q^2}{25\omega_0^2} \Omega \sin(\omega_0 t). \end{cases} \quad (15)$$

Анализ выражений (15) показывает, что при позиционном возбуждении колебаний в кольцевом резонаторе ЧЭ КМГ на второй моде колебаний:

- ЭДС, наводимая в первичном контуре (связанном с осью силового воздействия), меняется по гармоническому закону с частотой, равной частоте собственных колебаний;

- ЭДС, наводимая во вторичном контуре (связанном с информационной осью резонатора), меняется по гармоническому закону с частотой, равной частоте собственных колебаний;
- амплитуда ЭДС во вторичном контуре прямо пропорциональна проекции угловой скорости вращения резонатора на ось, перпендикулярную его плоскости, что позволяет использовать данный ЧЭ КМГ в режиме датчика угловой скорости;
- ЭДС во вторичном контуре и силовое воздействие совпадают по фазе, что позволяет использовать сигнал накачки в процессе синхронного детектирования для получения информации об измеряемой угловой скорости и ее знаке.

Окончательно запишем выходной сигнал ЧЭ КМГ в режиме идеализированного датчика угловой скорости:

$$U_{\text{вых}} = \frac{8\sqrt{2}BRHi_{10}Q^2}{25\omega_0^2} \Omega \sin(\omega_0 t). \quad (16)$$

Масштабный коэффициент такого датчика угловой скорости можно оценить численно для следующих параметров ЧЭ КМГ:

$$\begin{aligned} B &= 0,2 \text{ Тл} = 0,2 \text{ Н/(А} \cdot \text{м)}; & R &= 3 \text{ мм}; \\ \rho &= 2328 \text{ кг/м}^3; & b &= 100 \text{ мкм}; & h &= 120 \text{ мкм}; \\ E &= 1,69 \cdot 10^{11} \text{ Па}; & Q &= 5000; & i_{10} &= 10^{-3} \text{ А}; \\ J &= \frac{bh^3}{12} = 10^{-17} \text{ м}^4; & S &= bh = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= \frac{4B\sqrt{2}}{\pi\rho S} = \frac{4 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{2}}{\pi \cdot 2328 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8}} = \\ &= 1,2891 \cdot 10^4 \text{ м/(А} \cdot \text{с}^2); \end{aligned}$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{EJ}{\rho SR^4}} = 3,2794 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_0 = \frac{6}{\sqrt{5}} \kappa = 8,7997 \cdot 10^4 \text{ рад/с};$$

$$K_M = \frac{8\sqrt{2}BRHi_{10}Q^2}{25\omega_0^2} = 11,301 \text{ мкВ/(рад/с)};$$

$$U_{\text{вых}} = K_M \Omega \sin(\omega_0 t).$$

Время выхода на режим установившихся колебаний составляет  $t_{\text{уст}} \approx 523 \text{ мс}$ .

Таким образом, масштабный коэффициент ЧЭ КМГ в режиме идеализированного датчика угловой скорости составляет  $197 \text{ нВ/(}^\circ\text{/с)}$ . При этом частота колебаний резонатора составляет примерно  $14 \text{ кГц}$  [6].

Для выделения амплитуды и фазы (относительного тока накачки) выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  ЧЭ КМГ, несущих информацию о значении и зна-

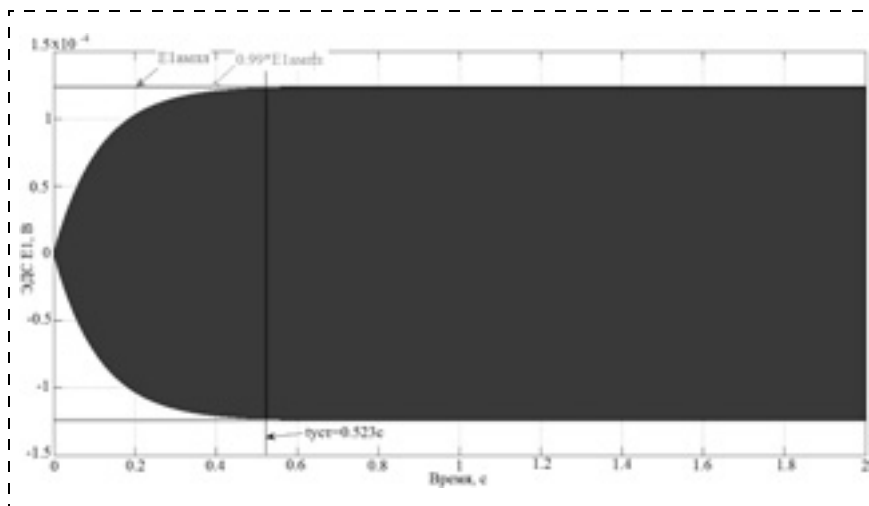


Рис. 7. График изменения ЭДС  $E_1$  при позиционном возбуждении резонатора ЧЭ КМГ на собственной частоте

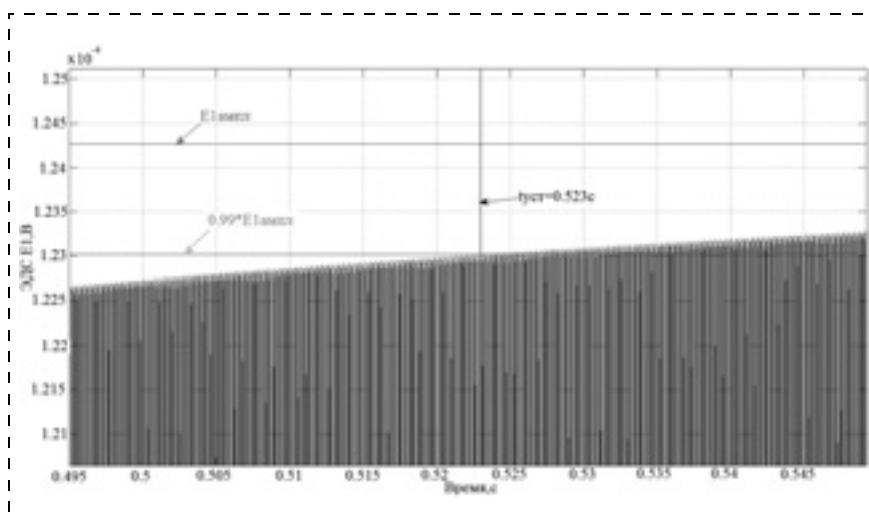


Рис. 8. Время выхода на режим установившихся колебаний резонатора ЧЭ КМГ

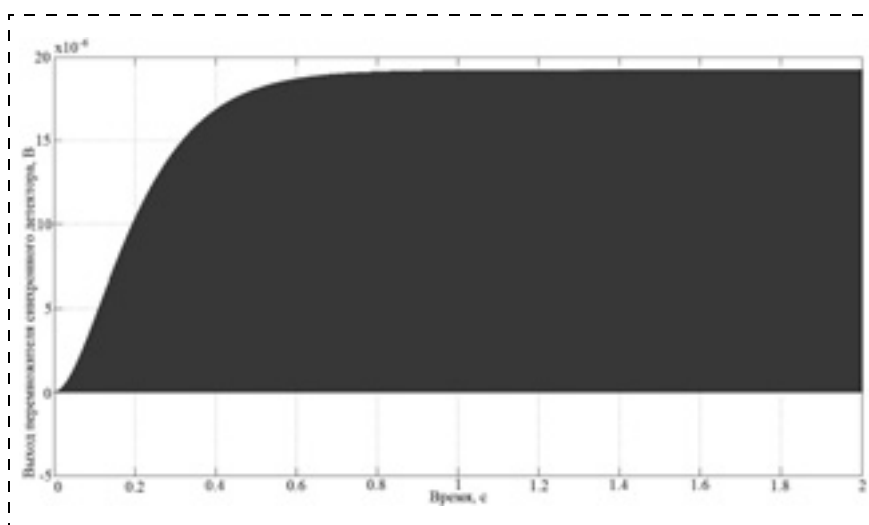


Рис. 9. Выход перемножителя сигналов синхронного детектора. Работа ЧЭ КМГ при действии угловой скорости  $+100^\circ/\text{с}$

ке измеряемой угловой скорости  $\Omega$ , воспользуемся синхронным детектором. Для этого выходной сигнал  $U_{\text{вых}}$  умножим на нормированный сигнал накачки  $i_1(t)/i_{10}$ , а установившийся результат осредним на интервале времени, значительно превышающем период колебаний резонатора:

$$\begin{aligned} U_{\text{СД}} &= U_{\text{вых}} i_1(t) = \\ &= K_M \Omega \sin(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t) = \\ &= \frac{1}{2} K_M \Omega - \frac{1}{2} K_M \Omega \cos(2\omega_0 t); \\ U_{\text{СД}}^{\text{ср.уст}} &\approx K_M^{\text{СД}} \Omega; \\ K_M^{\text{СД}} &= \frac{1}{2} K_M. \end{aligned}$$

Результирующий масштабный коэффициент  $K_M^{\text{СД}}$  будет иметь значение  $98,5 \text{ нВ}/(^{\circ}/\text{с})$ .

Результат численного решения системы уравнений (10) для параметров ЧЭ КМГ (16) в программном пакете Simulink показан на рисунках 7–11.

В результате численного моделирования КМГ, работающего в режиме идеализированного датчика угловой скорости, были оценены следующие параметры такого датчика (при диапазоне измерения  $\pm 100^\circ/\text{с}$ ):

масштабный коэффициент . . . . .  $96,888 \text{ нВ}/(^{\circ}/\text{с})$   
нулевой сигнал. . . . .  $-1,61 \cdot 10^{-5} ^{\circ}/\text{с}$   
нелинейность (относительно диапазона измерения). . . . .  $0,845 \%$

## Заключение

Таким образом, в статье изложены особенности конструкции и кратко описан принцип работы разработанного чувствительного элемента кольцевого микрогирокопа. Разработана математическая модель чувствительного элемента и рассмотрены особенности магнитоэлектрической системы возбуждения колебаний кольцевого микрогирокопа. В программе Simulink (MathWorks) разработана модель чувствительного элемента кольцевого микрогирокопа. Проведен анализ модели



Рис. 10. Зависимость амплитуды установившегося сигнала  $E_1$  от измеряемой угловой скорости

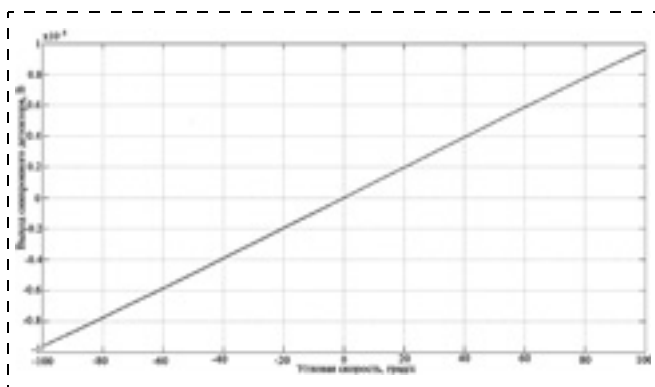


Рис. 11. Статическая характеристика КМГ в режиме идеализированного датчика угловой скорости

чувствительного элемента кольцевого микрогироскопа при работе в режиме идеального датчика угловой скорости. В результате численного моделирования кольцевого микрогироскопа, работающего в режиме идеализированного датчика угловой скорости, были оценены основные параметры датчика (при диапазоне измерения  $\pm 100$  °/с).

### Список литературы

1. Тимошенко С. П., Плеханов В. Е., Анчутин С. А., Максимов В. Н., Головань А. С., Кочурина Е. С. Анализ влияния анизотропии свойств кремния на параметры резонатора // Датчики и системы. 2012. № 5. С. 29—33.
2. Плеханов В. Е., Анчутин С. А. Применение метода конечных элементов для анализа параметров кольцевого резонатора микромеханического твердотельного волнового гироскопа // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 6. С. 25—29.
3. Анчутин С. А. О проектировании функциональных узлов микромеханических датчиков // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 6. С. 5—9.
4. Тимошенко С. П., Плеханов В. Е., Анчутин С. А., Зарянкин Н. М., Рубчиц В. Г., Дернов И. С., Шилов В. Ф., Кочурина Е. С. Балансировка резонатора кольцевого микромеханического гироскопа // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 37—44.
5. Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. 168 с.
6. Тимошенко С. П., Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Головань А. С., Максимов В. Н., Тимошенко А. С. Разработка автоматизированного стенда для проведения испытаний микромеханических датчиков угловой скорости // Приборы. 2012. № 3. С. 48—50.

S. P. Timoshenkov<sup>1</sup>, Head of the Chair, Prof., S. A. Anchutin<sup>1</sup>, Leading Engineer, V. E. Plekhanov<sup>2</sup>, Assistant Prof., E. S. Kochurina<sup>1</sup>, Engineer, A. S. Timoshenkov<sup>1</sup>, Engineer, E. V. Zuev<sup>1</sup>, Engineer

<sup>1</sup> National Research University of Electronic Technology, e-mail: stp@miee.ru

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute

## DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL DESCRIPTIONS OF THE MICROMECHANICAL RING GYROSCOPE

*The article describes the design and operation of the ring gyroscope sensor. A mathematical model of the sensor was created and the features of magnetoelectric system vibration excitation of the ring gyroscope were described. The results of numerical modeling of the ring gyroscope operating in the mode of an idealized angular velocity sensor were described.*

**Keywords:** sensor, ring microgyro, mathematical model, system vibration excitation, numerical modeling

### References

1. Timoshenkov S. P., Plehanov V. E., Anchutin S. A., Maksimov V. N., Golovan A. S., Kochurina E. S. Analiz vliyaniya anizotropii svoystv kremniya na parametry rezonatora // Datchiki i sistemy. 2012. N. 5. P. 29—33.
2. Plekhanov V. E., Anchutin S. A. Primenenie metoda konechnykh elementov dlya analiza parametrov kol'cevogo rezonatora mikromekhanicheskogo tverdotel'nogo volnovogo giroskopa // Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2007. N. 6. P. 25—29.
3. Anchutin S. A. O proektirovanii funktsional'nykh uzlov mikromekhanicheskikh datchikov // Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2007. N. 6. P. 5—9.

4. Timoshenkov S. P., Plehanov V. E., Anchutin S. A., Zaryankin N. M., Rubchic V. G., Dernov I. S., Shilov V. F., Kochurina E. S. Balansirovka rezonatora kol'cevogo mikromekhanicheskogo giroskopa // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2011. N. 11. P. 37—44.
5. Matveev V. A., Lipatnikov V. I., Alekhin A. V. Proektirovaniye volnovogo tverdotel'nogo giroskopa. M.: MG TU im. N. E. H. Bauman, 1997. 168 p.
6. Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Kochurina E. S., Golovan A. S., Maksimov V. N., Timoshenkov A. S. Razrabotka avtomatizirovannogo stenda dlja provedeniya ispytaniy mikromekhanicheskikh datchikov uglovoiy skorosti // Pribory. 2012. N. 3. P. 48—50.

А. В. Тютюгин, нач. лаб., С. А. Жукова, канд. техн. наук, нач. научно-техн. комплекса,  
В. Е. Турков, канд. физ.-мат. наук, нач. НИЦ,  
ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт химии и механики",  
e-mail: anton\_tyutyugin@mail.ru

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОВОДЯЩИХ МИКРОВЫВОДОВ МЕТОДОМ ЖИДКОСТНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СБОРКИ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ "ФЛИП-ЧИП"

Поступила в редакцию 17.12.2013

*Технологию "флип-чип" все более широко применяют в качестве метода соединения кристалла с подложкой. Однако для ускорения производства существует необходимость группового метода формирования проводящих межсоединений (бампов). Данное требование можно обеспечить благодаря применению методов химической обработки.*

*Рассмотрены основные технологические особенности формирования соединений методом химического никелирования иммерсионного золочения на всех стадиях технологического процесса, а также проведено исследование влияния параметров раствора на морфологию поверхности образующихся межсоединений.*

*Ключевые слова:* бамп, химическое никелирование, "флип-чип"

### Введение

Тенденция миниатюризации устройств и удешевления продукции приводит к необходимости разработки новых методов и технологий на всех этапах производства кристаллов. Так, на смену классической технологии проволочной разварки кристаллов с подложкой компанией IBM в 1960-х годах была предложена технология прямого монтажа чипа на плату (*Controlled Collapse Chip Connection* — C4) [1, 4], электрическое соединение которых обеспечивается посредством сформированных на контактных площадках чипа проводящих столбиковых выводов — бампов. Впоследствии данная технология получила широкое распространение.

По сравнению с технологией проволочной разварки, технология C4, или "флип-чип" позволяет значительно снизить габаритные размеры изделия, обеспечивает возможность свободного (матричного) расположения контактных площадок на чипе, облегчая тем самым трассировку соединений; дает возможность снизить значение индуктивности (потерь), а также значительно удешевить производство [2]. Именно благодаря этим преимуществам технологию "флип-чип" на сегодняшний день масштабно применяют для производства продуктов массового потребления: смарт-карт, модулей памяти, дискретных диодов и т. д. [3].

В настоящее время существует несколько методов формирования бампов [4–6]: метод неполного цикла шариковой микросварки; метод формирования шариковых выводов посредством оплавления припоя; метод химического и электрохимического формирования контактов, метод трафаретной печати [7] и т. д.

Формирование контактов методом химического осаждения металлов имеет ряд преимуществ в

сравнении с остальными методами. Для данного процесса не требуется обеспечивать проводящий подслей, как в случае метода электрохимической обработки; в данном процессе существует возможность группового формирования выводов на десятках пластинах одновременно, а также не требуется проведения дополнительных операций, таких как фотолитография и формирование барьерных слоев металлов на поверхности контактных площадок для предотвращения взаимной диффузии или исключения растворения металла-основы контактной площадки [8].

Одним из наиболее широко распространенных методов химического формирования контактов стал метод химического осаждения никель-фосфорного сплава Ni—P [9] с дальнейшим покрытием его слоем иммерсионного золота (ENIG). Данный метод используют как для формирования самих бампов, так и для формирования слоя металлизации под бампирование другими методами. Однако несмотря на широкое распространение данного метода, отечественные публикации, посвященные процессу формирования микровыводов методом химического никелирования, практически отсутствуют. В связи с чем целью данной работы было проведение исследования по выявлению основных технологических закономерностей при формировании бампов методом автокаталитического никелирования.

### Описание эксперимента

Для проведения исследований были использованы 200-миллиметровые пластины с выполненными полупроводниковыми схемами, предоставленные компанией "Микрон" (Зеленоград), со скрытыми под слоем пассивации контактными пло-

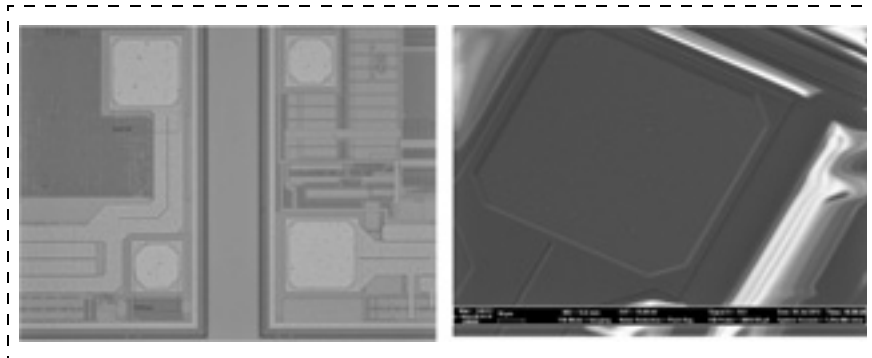


Рис. 1. Снимок поверхности типовой пластины со вскрытыми в слое пассивации контактными площадками размерами  $60 \times 60$  мкм и  $90 \times 90$  мкм

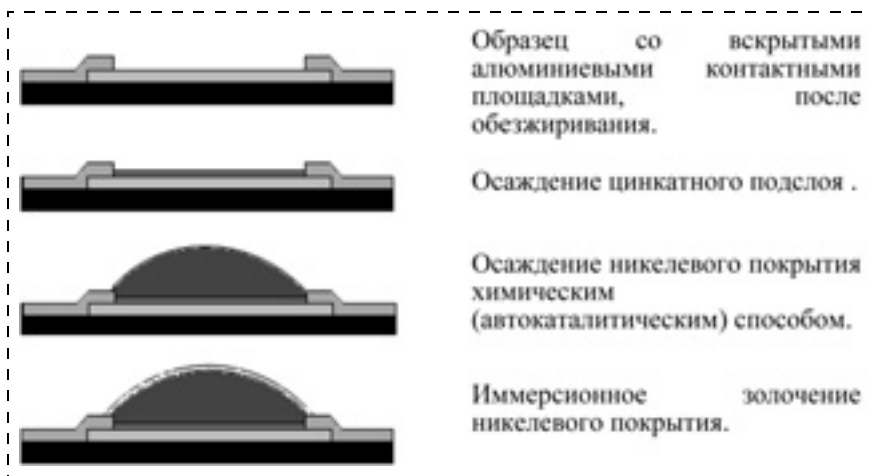


Рис. 2. Этапы формирования бампов

шадками на основе алюминия, легированного медью (0,5 %). Толщина слоя алюминия контактных площадок составляла 800 нм. Размеры контактных площадок варьировали от  $60 \times 60$  мкм до  $90 \times 90$  мкм (рис. 1).

Осаждение бампов осуществляли методом химического никелирования с последующим иммерсионным золочением (рис. 2).

Для приготовления электролитов использовали химические реактивы квалификации не ниже ЧДА и дистиллированную воду.

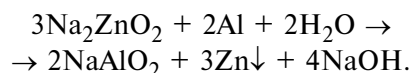
### Процесс цинкатной обработки

В связи с тем, что на поверхности алюминия всегда присутствует естественная оксидная пленка, которая препятствует прочному сцеплению алюминия с покрытием, для улучшения адгезии металлических слоев необходима предварительная обработка. Существует много способов подготовки поверхности: цементация, электрохимическая обработка, фосфатирование и т. д. [10], но наиболее эффективным методом подготовки алюминия является цинкатная обработка.

Для отработки процесса цинкатной обработки был выбран электролит на основе  $\text{ZnO}—\text{NaOH}$  при

различных концентрациях компонентов в растворе (см. таблицу).

Процесс осаждения в растворе данных веществ происходит следующим образом: при погружении пластины в раствор цинката натрия алюминий растворяется, а цинк осаждается, при этом образуется шероховатость на наружной поверхности, требующаяся для обеспечения прочности сцепления [11]. Растворение двух атомов алюминия приводит к осаждению трех атомов цинка:



Так как в процессе реакции происходит растворение алюминия, толщина которого незначительна (800 нм), во избежание ее полного стравливания и, одновременно с этим, образования равномерного тонкого слоя цинка, необходимого для обеспечения достаточной адгезии между слоями при дальнейших операциях, следует строго контролировать параметры процесса.

Исследование топологии поверхности обработанных контактных площадок методом электронной микроскопии показало, что

цинк осаждается на поверхности в виде конгломератов цинковых кристаллов, образующих большое количество нитей. При этом однородность покрытия поверхности алюминиевой контактной площадки кристаллами цинка (рис. 3) и размер этих кристаллов варьируются в зависимости от концентрации компонентов в растворе. Так, с увеличением концентрации ионов цинка в растворе происходит заметное увеличение размеров образовавшихся на поверхности кристаллов — от 100 нм для первого раствора до 1 мкм для шестого раствора. Образование кристаллов больших размеров является нежелательным, так как в процессе последующего никелирования подобные кристаллы не успевают раствориться и способствуют образованию пустот на границе контактная площадка — бамп,

Концентрация компонентов в электролите, г/л

| Ком-<br>понент | Номер раствора |     |     |     |     |     |
|----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                | 1              | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| NaOH           | 150            | 150 | 150 | 150 | 150 | 300 |
| ZnO            | 5              | 10  | 15  | 30  | 50  | 60  |

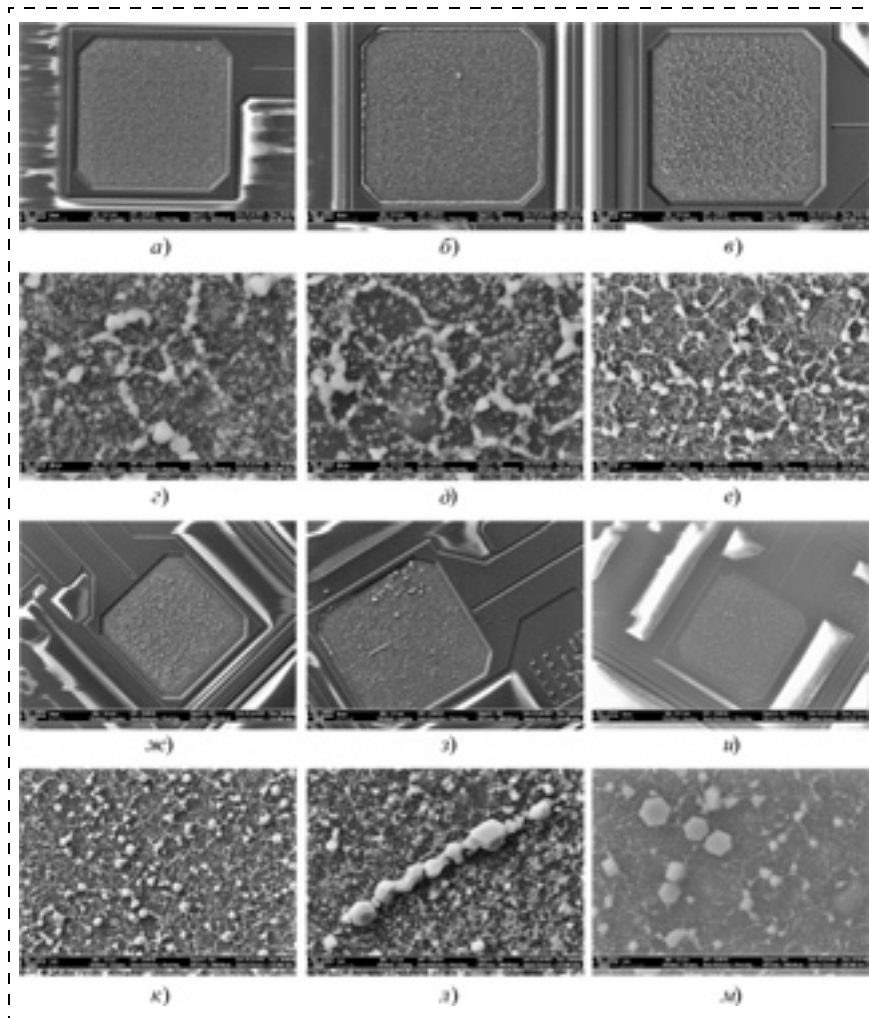


Рис. 3. СЭМ фотографии образцов цинкатных покрытий, полученных из растворов а, г — раствор 1; б, д — раствор 2; в, е — раствор 3; ж, к — раствор 4; з, л — раствор 5; и, м — раствор 6

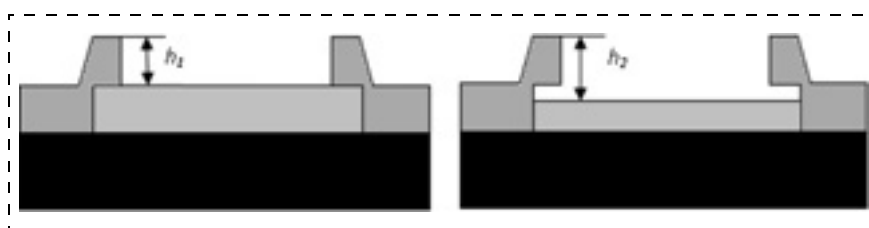


Рис. 4. Схематичное изображение контроля подтравки

что соответственно ухудшает прочностные характеристики межсоединений.

Анализ однородности морфологии цинкового слоя на поверхности контактных площадок показал, что покрытие, полученное из раствора 3 (согласно таблице), является наиболее приемлемым для дальнейших манипуляций. Поверхность данного образца образуют кристаллиты с размерами от 10 до 300 нм с высокой степенью однородности.

Для прогнозирования физических, механических и тепловых свойств изделий при конструировании важно знать значения всех геометрических

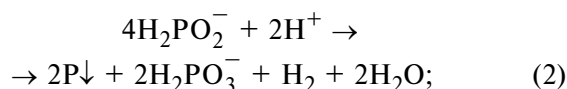
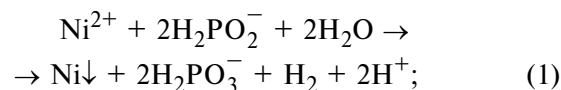
размеров функциональных слоев, в том числе и толщин межсоединений. В связи с этим было проведено исследование кинетики травления алюминия в растворе цинката натрия. Определение глубины подтравки проводили по разности геометрических размеров конструкции  $\Delta h$  контактной площадки до и после процесса (рис. 4) методом атомно-силовой микроскопии (рис. 5) с помощью сканирующего зондового микроскопа. Для проведения измерений цинкатный слой снимался в 50 %-ной азотной кислоте.

Исследование глубины подтравки слоя алюминия во время цинкатной обработки показало, что средняя скорость травления составляет около 14 нм/с (рис. 6). С помощью механической мешалки с частотой вращения 300 об/мин процесс травления значительно интенсифицировался (до 26 нм/с), что говорит о том, что лимитирующей стадией процесса является стадия массопереноса — доставки реагентов к поверхности и удаления продуктов реакции с нее.

Таким образом, оптимальным режимом подготовки поверхности для дальнейшего никелирования является цинкатная обработка в растворе 3 (согласно таблице — 150 г/л NaOH + 15 г/л ZnO) в течение 20...30 с.

#### Формирование бампа методом химического никелирования

Восстановление никеля гипофосфитом натрия в кислой среде и получение никелевых покрытий происходит в результате протекания следующих реакций [10]:



Осажденный слой состоит из сплава никеля и фосфора. Как видно из реакций (1)—(3), процесс

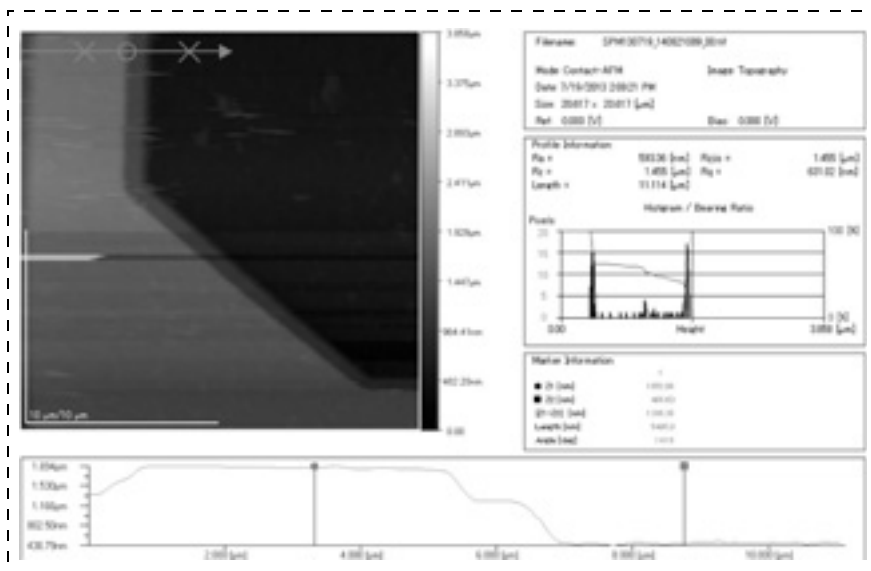


Рис. 5. Измерение глубины подтрав методом АСМ по профилю поверхности

осаждения очень чувствителен к изменениям кислотности раствора и концентрации компонентов. Помимо скорости процесса, pH существенно влияет на состав и свойства осадка в связи с участием протона в реакции (2). Поэтому для устойчивого протекания реакций необходима значительная буферная емкость раствора, которая достигается введением в электролит органических кислот и их солей. Также для стабильной работы электролита в растворе должен быть комплексообразователь, который связывает ионы металла в растворимые комплексы, препятствуя образованию труднорастворимого осадка фосфита никеля. Введение таких добавок, образующих прочные комплексы с никелем, приводит к снижению скорости осаждения, способствует образованию мелкокристаллических осадков сплава системы Ni—P и повышению стабильности раствора.

Для отработки процесса формирования никелевых бампов был выбран серноокислый никелевый электролит на основе ацетатного буфера с гипофосфитом натрия в качестве восстановителя. Процесс проводили при варьировании параметров pH раствора, концентрации гипофосфита натрия, с добавлением комплексообразователя и без него. В качестве ингибитора саморазряда ванны использовали тиомочевину. Корректировку pH раствора проводили уксусной кислотой или гидрооксидом аммония до достижения необходимого уровня кислотности раствора.

Основной задачей исследования было выявление кинетических особенностей формирования контактов в зависимости от технологических параметров, изучение поверхностной топологии формируемых бампов, а также их элементного состава. Исследования проводили с помощью оптического микро-

скопа CarlZeiss AxioImage M2m и сканирующего электронного микроскопа CarlZeiss CrossBeam, снабженного приставкой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии INCA.

Было выявлено, что скорость осаждения покрытия увеличивается с увеличением концентрации гипофосфита натрия и pH раствора (рис. 7), что согласуется с механизмом реакций (1)—(3). При этом, с увеличением концентрации гипофосфит-иона в растворе и снижением pH увеличивается содержание фосфора в формируемом покрытии (рис. 8, б). Низкое значение концентрации фосфора в покрытии негативно влияет на параметры паяемости [12] и коррозионно-стойкости покрытия, а именно спо-

собствует образованию черных точек (*black pads*) [13, 14] при последующих манипуляциях. В связи с перечисленным выше, для получения качественного покрытия при максимальной скорости оса-

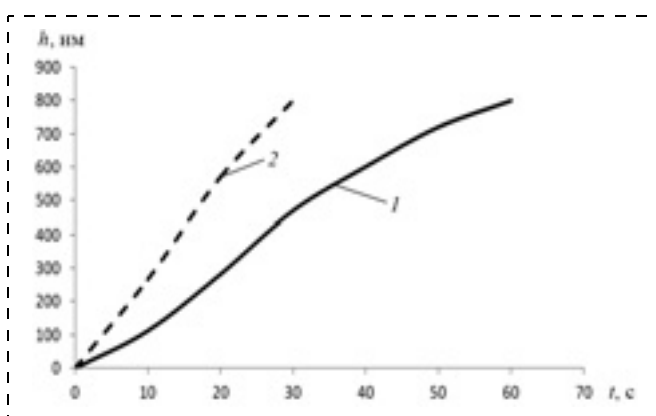


Рис. 6. График изменения глубины подтрав  $h$  алюминия в процессе цинкатной обработки:

1 — при перемещении, 2 — без перемещения

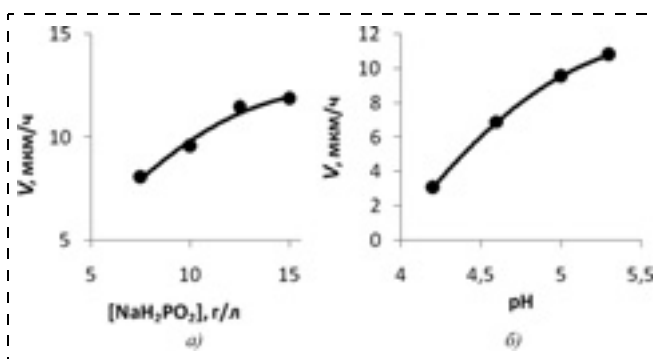


Рис. 7. Зависимости скорости осаждения покрытия из электролита серноокислого никеля от концентрации гипофосфита натрия (а) и pH (б)

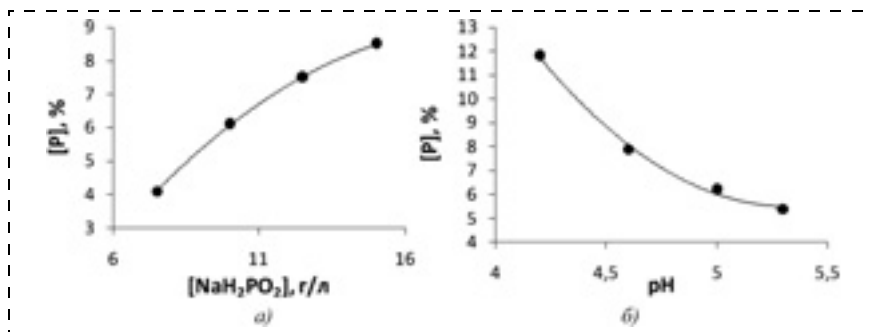


Рис. 8. Зависимость концентрации фосфора в покрытии от содержания гипофосфита натрия (а) и от pH раствора никелирования (б)

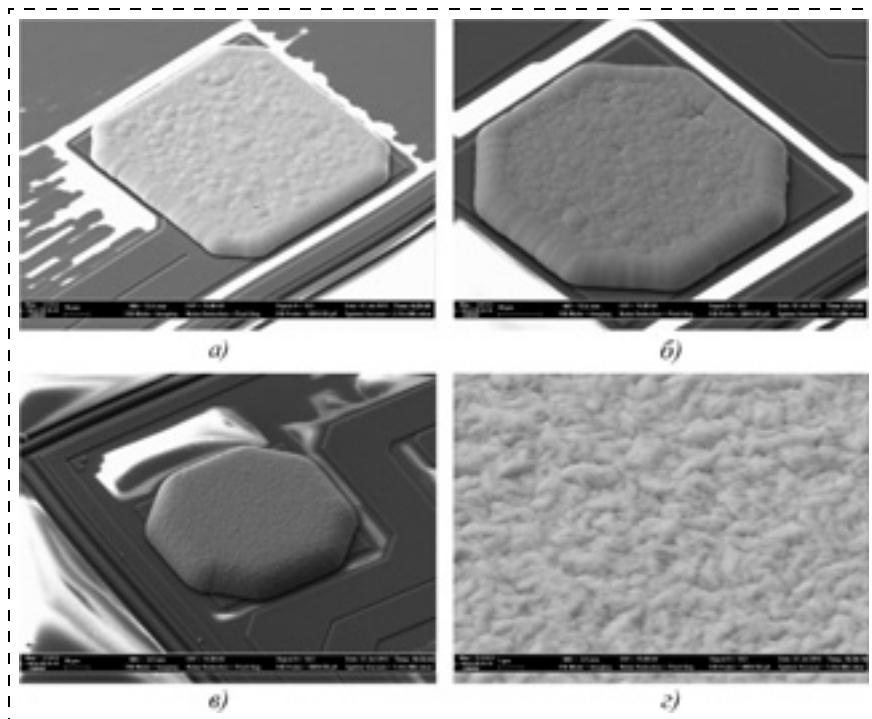


Рис. 9. СЭМ-изображение поверхности бампов:

а, б — поверхность контактов, полученных при изменении концентрации гипофосфита натрия, 7,5 и 12,5 г/л соответственно; в — при увеличении концентрации комплексообразователя до 7,5 г/л; г — поверхность бампа при увеличении в 17500х при концентрации комплексообразователя 12,5 г/л

ждения необходимо осознанно подходить к подбору состава электролита никелирования и выбору оптимального режима процесса. Из полученных результатов видно, что для получения бампов с требуемыми характеристиками необходимо проводить процесс при низких значениях pH растворов (4,2...4,6) и высоких концентрациях гипофосфита натрия.

Помимо влияния концентрации восстановителя (комплексообразователь) и pH раствора на кинетику формирования бампов, также исследовали их влияние на морфологию поверхностного слоя. Оказалось, что варьирование данных параметров несущественно влияет на геометрические размеры образующих поверхность сфероидов. Значимого изменения параметров топологии удалось добиться

ся при увеличении концентрации комплексообразователя — цитрата натрия в растворе (рис. 9, а, б). При увеличении его концентрации с 2,5 до 7,5 г/л поверхность бампа стала практически гладкой, а покрытие равномерным и беспористым (рис. 9, в, г), что может быть связано как с уменьшением концентрации свободного никеля в растворе, так и с адсорбцией органических молекул на поверхности контактных площадок. Дальнейшее увеличение концентрации комплексообразователя не приводило к заметному изменению структуры бампа.

### Иммерсионное золочение

Процесс иммерсионного золочения никелевых бампов проводили в электролите ЗИ-04 [10] при температуре 80 °С в течение 30 мин. Слой иммерсионного золота имел мелкокристаллический и беспористый осадок (рис. 10), полностью повторяющий морфологию никелевого подслоя.

Тестирование исследованной технологии на партии из 10 образцов со сформированными никелевыми контактами показало, что разновысотность бампов внутри одного чипа составляет  $\pm 1$  мкм, по пластине диаметром 200 мм —  $\pm 2$  мкм, от партии к партии —  $\pm 2,5$  мкм. При этом усилие на сдвиг сформированных контактов составляло не менее 110 Н.

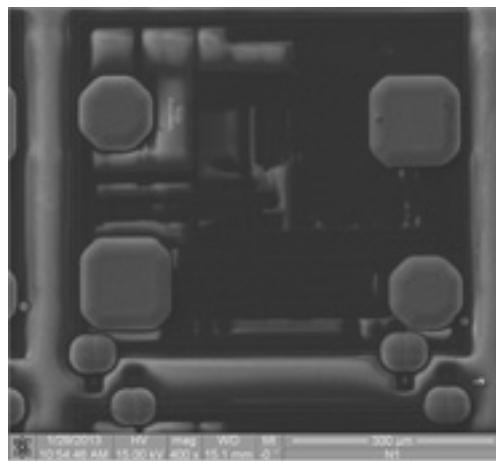


Рис. 10. СЭМ-изображение позолоченных никелевых бампов

## Заключение

В работе определены режимы процесса формирования бампов методом химического никелирования. Проведено исследование морфологии поверхности покрытия на каждой стадии технологии, а также выявлены основные кинетические параметры процессов цинкатной обработки и никелирования, в результате анализа которых проведен выбор составов электролитов для получения воспроизводимых результатов с высокой степенью однородности контактов. Выявлено, что морфология поверхности слабо зависит от параметров цинкатной обработки, концентрации гипофосфита натрия и кислотности раствора никелирования. Для получения бампов с низкими значениями шероховатости поверхности требуется осуществлять подбор типа и концентрации комплексообразователя. При этом для формирования коррозионно-стойких, беспористых контактов необходимо, чтобы кислотность раствора никелирования обеспечивалась в пределах 4,2...4,6, а концентрация восстановителя составляла 12,5 г/л. Технология дает возможность получения никелевых позолоченных бампов с равномерностью геометрических характеристик внутри одного чипа  $\pm 1$  мкм, от партии к партии  $\pm 2,5$  мкм, усилие на отрыв 110 Н.

## Список литературы

1. <http://flipchips.com/tutorial/other/a-brief-history-of-flipped-chips>
2. **Elenius P., Levine L.** Comparing Flip Chip and Wire Bond Interconnection Technologies, Chip Scale review, 2000, July August. P. 81—87.
3. [http://pactech.com/files/36 %20ICEP %202004 %20Japan %20Paper %2001\\_03\\_04.pdf](http://pactech.com/files/36%20ICEP%202004%20Japan%20Paper%2001_03_04.pdf)
4. <http://www.siliconfareast.com/flipchipass.htm> 1
5. **Patterson D. S., Elenius P. and Leal J. A.** Wafer Bumping Technology-A Comparative Analysis of Solder Deposition Processes and Assembly Considerations // Advances in Electronic Packaging. 1997. Vol. 1. P. 337—351.
6. **Rinne G. A.** Solder Bumping Methods for Flip Chip Packaging // Proc. of Electronic Components and Technology Conference. 1997. P. 240—247.
7. **Leel J., Jung J., Cheon C., Zhou Y. and Mayer M.** Flip Chip Bump Formation of Sn—1,8Bi—0,8Cu—0,6In Solder by Stencil Printing // Materials Transactions. 2005. Vol. 46, No. 11. P. 2359—2365.
8. **Arshad M. K., Hashim U., Muzamir I.** Under bump metallurgy (UBM) — a technology review for flip chip packaging // International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME). 2007. Vol. 2, No. 1. P. 48—54.
9. <http://flipchips.com/tutorial/bump-technology/electroless-nickel-gold-flip-chip>
10. **Mallory G. O., Hajdu J. B.** Electroless Plating: Fundamentals and Applications, AESF. New York: William Andrew Publishing, 1990. P. 539.
11. **Dettner H. W., Elze J., Raub E.** Handbuch der galvanotechnik, Band I, Grundlagen, Einrichtungen, Vorbehandlungen, Teil 1. Munchen: Carl Hanser Verlag, 1963. P. 485.
12. <http://www.smtnet.com/library/files/upload/ENIG-Black-Pad-Problem.pdf>
13. <http://www.smta.org/files/surfacefinishes00-biunno.pdf>
14. <http://www.smtnet.com/library/files/upload/ENIG-Black-Pad-Problem.pdf>
15. <http://ecomet.ru/technology/precious/ecomet-zi04>

**A. V. Tyutyugin**, Head of Lab., e-mail: anton\_tyutyugin@mail.ru, **S. A. Zhukova**, Manufacturing Manager, **M. S. Ovchinnikova**, Senior Engineer, **V. E. Turkov**, Chif Executive Officer  
Central Research Institute of Chemistry and Mechanics

## BUMP FORMATION BY LIQUID CHEMICAL TREATMENT FOR FLIP-CHIP TECHNOLOGY

*Flip chip technology is more widely used as method of interconnection chip to a substrate. However, to speed up production, the collective processing techniques are needed. This demand can be achieved through the use of methods of chemical treatment.*

*This article describes the main technological characteristics of the formation interconnections by method of electroless nickel/immersion gold plating on all stages of the processes. The influence of parameters on the morphology of the surface of the solution formed interconnections were also studied.*

*Keywords: flip chip, bump, electroless nickel*

### References

1. <http://flipchips.com/tutorial/other/a-brief-history-of-flipped-chips>
2. **Elenius P., Levine L.** Comparing Flip Chip and Wire Bond Interconnection Technologies, Chip Scale review, 2000, July August. P. 81—87.
3. [http://pactech.com/files/36 %20ICEP %202004 %20Japan %20Paper %2001\\_03\\_04.pdf](http://pactech.com/files/36%20ICEP%202004%20Japan%20Paper%2001_03_04.pdf)
4. <http://www.siliconfareast.com/flipchipass.htm> 1
5. **Patterson D. S., Elenius P. and Leal J. A.** Wafer Bumping Technology-A Comparative Analysis of Solder Deposition Processes and Assembly Considerations, Advances in Electronic Packaging, 1997. Vol. 1. P. 337—351.
6. **Rinne G. A.** Solder Bumping Methods for Flip Chip Packaging, Electronic Components and Technology Conference, 1997. P. 240—247.
7. **Leel J., Jung J., Cheon C., Zhou Y. and Mayer M.** Flip Chip Bump Formation of Sn—1,8Bi—0,8Cu—0,6In Solder by

- Stencil Printing, Materials Transactions, 2005, Vol. 46, No. 11. P. 2359—2365.
8. **Arshad M. K., Hashim U., Muzamir I.** Under bump metallurgy (UBM) — a technology review for flip chip packaging, International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), 2007, Vol. 2, No. 1. P. 48—54.
9. <http://flipchips.com/tutorial/bump-technology/electroless-nickel-gold-flip-chip>
10. **Mallory G. O., Hajdu J. B.** Electroless Plating: Fundamentals and Applications, AESF, 1990, William Andrew Publishing, New York. P. 539.
11. **Dettner H. W., Elze J., Raub E.** Handbuch der galvanotechnik, Band I, Grundlagen, Einrichtungen, Vorbehandlungen, Teil 1, Carl Hanser Verlag-Munchen, 1963. P. 485.
12. <http://www.smtnet.com/library/files/upload/ENIG-Black-Pad-Problem.pdf>
13. <http://www.smta.org/files/surfacefinishes00-biunno.pdf>
14. <http://www.smtnet.com/library/files/upload/ENIG-Black-Pad-Problem.pdf>
15. <http://ecomet.ru/technology/precious/ecomet-zi04>

# МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 621.382

Д. А. Абдуллаев, аспирант, e-mail: daniil0309@gmail.com,  
Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

## ИЗМЕНЕНИЕ НАБОРА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ НОРМ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Поступила в редакцию 19.12.2013

*Описывается, как изменяется набор используемых материалов в производстве интегральных микросхем при переходе от топологических норм 180 нм к топологическим нормам 32 и 22 нм.*

**Ключевые слова:** интегральная микросхема (ИМС), топологические нормы, low-k диэлектрики, high-k диэлектрики, алюминиевые межсоединения, медные межсоединения

### Введение

На сегодняшний день массово выпускаются микросхемы с топологическими нормами 32 и 22 нм, а в ближайшие два года планируется переход на нормы 16–14 нм [1, 2]. При переходе на новые нормы уже не достаточно просто уменьшать размеры элементов, как это было до технологии 180 нм включительно, становится необходимым использовать новые материалы, обладающие определенными свойствами. Таким образом, в микроэлектронике происходит постепенная замена материалов диэлектриков, металлов и диффузионного барьерного слоя (ДБС).

### Предпосылки для перехода на новые материалы

Долгие годы основными материалами микроэлектроники были кремний и его соединения (диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  и нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) для создания транзисторов, изоляции и пассивационных слоев [3], алюминий в качестве металлизации, вольфрам для межслойного соединения проводников, титан/нитрид титана в качестве диффузионных барьерных слоев. Данного набора материалов было достаточно для производства микросхем вплоть до технологических норм 180 нм. У некоторых производителей были незначительные усовершенствования в рамках общей технологии производства. Так, для уменьшения  $RC$ -задержек межслойный диэлектрик диоксид кремния делали пористым или в качестве металлизации использовали

не чистый алюминий, а его сплав с медью (1...5 %) [4]. Однако при дальнейшей миниатюризации возник ряд проблем: при уменьшении поперечных размеров проводников металлизации, соединяющих элементы интегральной микросхемы (ИМС), увеличивается сопротивление, а их близкое расположение приводит к росту емкости межсоединений, что существенно увеличивает задержки распространения сигнала по  $RC$ -цепям; при уменьшении размеров транзистора для сохранения напряженности управляющего поля необходимо уменьшать толщину подзатворного диэлектрика, что приводит к увеличению токов утечки через слой диоксида кремния. Таким образом, эти паразитные явления свели на нет все усилия по увеличению производительности ИМС.

Для дальнейшей миниатюризации элементов необходимо было использовать новые материалы, по свойствам отличные от традиционных. Основным диэлектриком микроэлектроники долгое время являлся диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  с относительной диэлектрической проницаемостью  $k = 4$  ( $k = \epsilon/\epsilon_0$ , где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума). Его использовали и в качестве межслойной изоляции, и в качестве подзатворного диэлектрика. Однако универсальность диоксида кремния превратилась из достоинства в недостаток, так как различные области применения потребовали наличия различных диэлектрических свойств. Так, в микроэлектронике начали использовать диэлектрики с низкой диэлектрической проницаемостью — low-k ( $k < 4$ ) диэлектрики в качестве изоляции межслой-

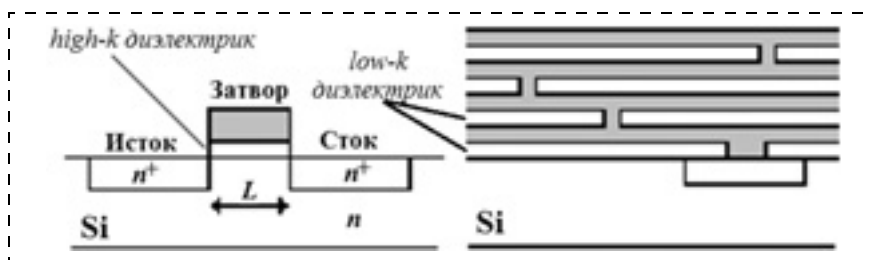


Рис. 1. Схема применения *high-k* и *low-k* диэлектриков в ИМС [6]

ных и внутрислойных соединений, с высокой диэлектрической проницаемостью — *high-k* ( $k > 4$ ) диэлектрики в качестве подзатворных диэлектриков (рис. 1), медь для формирования системы межсоединений, тантал/нитрид тантала в качестве ДБС [4–7]. Помимо использования новых материалов пришлось частично изменять и архитектуру элементов ИМС.

Внедрение новых материалов в производство ИМС осуществлялось постепенно, так как это требовало существенной модернизации технологических цепочек (табл. 1).

### Новые материалы

Использование алюминия как основного материала системы межсоединений в производстве ИМС обусловлено простотой его обработки и формирования из него проводников методом вакуумного осаждения и реактивно-ионного травления [4]. Алюминий обладает хорошей адгезией к диоксиду кремния и не образует глубоких рекомбинационных уровней Al в запрещенной зоне кремния. Но для улучшения адгезии и предотвращения диффузии алюминия в материал под и на шины про-

водников стали наносить ДБС, состоящий из двух слоев — титана и нитрида титана. Однако удельное электрическое сопротивление алюминия высоко ( $2,66 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ ) относительно меди ( $1,67 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ ), что приводит к повышению тепловыделения и *RC*-задержек при работе ИМС.

В 1997 г. появились первые образцы ИМС, в которых вакуумное

осаждение алюминия для межсоединений элементов было заменено на электрохимическое осаждение меди. Медь обладает более низким удельным сопротивлением и более высокой токонесущей способностью [13, 14]. Это позволило резко сократить потребляемую энергию и тепловыделение ИМС при тех же напряжениях питания. Внедрение меди в качестве основного материала системы межсоединений потребовало изменения диффузионно-барьерного слоя на тантал/нитрид тантала, так как атомы меди могли диффундировать через слой титана/нитрид титана.

Некоторые производители, такие как AMD, начинают использовать медь в качестве проводников при производстве ИМС с топологическими нормами 180 нм (рис. 2), однако большинство остальных производителей стали использовать медь при переходе к топологическим нормам 130 нм. Медь, на сегодняшний день, используется как основной материал для формирования проводников, однако верхние слои металлизации могут выполняться из алюминия, так как на этом уровне не критичны размеры проводников и их можно делать большего размера. Примером может служить программируе-

Таблица 1

Эволюция технологии производства ИМС [1, 4, 6, 8–11]

| Характеристики                                | Топологические нормы                    |                                             |                                            |                                              |                                           |                                            |                                           |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                               | 180 нм                                  | 130 нм                                      | 90 нм                                      | 65 нм                                        | 45 нм                                     | 32 нм                                      | 22 нм                                     |
| Первые образцы, год выпуска                   | 1999                                    | 2001                                        | 2003                                       | 2005                                         | 2007                                      | 2009                                       | 2011                                      |
| Длина канала, нм                              | 130                                     | 70                                          | 50                                         | 35                                           | 25                                        | 17                                         | 12                                        |
| Материал затвора                              | Поликремний, SiO <sub>2</sub>           | Поликремний, SiO <sub>2</sub>               | Поликремний, SiO <sub>2</sub>              | Поликремний, SiO <sub>x</sub> N <sub>y</sub> | Металл, <i>high-k</i>                     | Металл, <i>high-k</i>                      | Металл, <i>high-k</i>                     |
| Число атомных слоев подзатворного диэлектрика | 10                                      | 8                                           | 5                                          | 5                                            | 5...10                                    | 5...10                                     | 5...10                                    |
| Площадь ячейки памяти, мкм <sup>2</sup>       | 4,5                                     | 2,4                                         | 1,3                                        | 0,6                                          | 0,3                                       | 0,15                                       | 0,08                                      |
| Межслойный диэлектрик                         | SiO <sub>2</sub> , <i>low-k</i>         | SiO <sub>2</sub> , <i>low-k</i>             | <i>low-k</i>                               | <i>low-k</i>                                 | <i>low-k</i>                              | <i>low-k</i>                               | <i>low-k</i>                              |
| Система межсоединений                         | Al/Cu (1...5 %), Cu                     | Cu                                          | Cu                                         | Cu                                           | Cu                                        | Cu                                         | Cu                                        |
| Примеры продукции                             | Intel Pentium III, Celeron (Coppermine) | Intel Pentium III (Tualatin), AMD Athlon XP | Intel Pentium IV (Prescott), AMD Athlon 64 | Intel Core, Core 2, AMD Phenom series        | Intel Core i series, AMD Phenom II series | Intel Core i (Sandy Bridge), AMD FX series | Intel Xeon, Core i5, Core i7 (Ivy Bridge) |

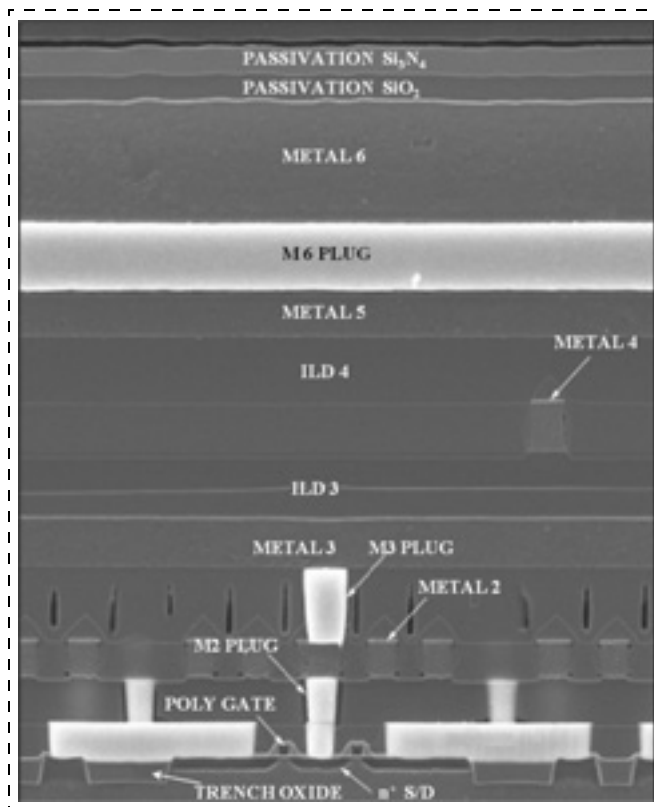


Рис. 2. РЭМ-изображение вертикального сечения процессора компании AMD, выполненного по нормам 180 нм [9]

мая логическая интегральная схема (ПЛИС) Virtex-4 компании Xilinx, у которой 10 слоев имеют медную систему межсоединений, а один верхний выполнен из алюминия [15].

Дальнейшее уменьшение технологических норм (вплоть до 130 нм), внедрение медных проводников и увеличение производительности транзисторных структур не привели к существенному увеличению быстродействия ИМС в целом. Это связано с увеличением времени прохождения сигнала по RC-цепям. Для снижения взаимных емкостей электрических проводников внутри ИМС стали использовать *low-k* диэлектрики. Их внедрение в технологию производства ИМС позволило за счет уменьшения постоянной времени резистивно-емкостных цепей увеличить быстродействие и уменьшить энергопотребление, что является критичным параметром для портативных устройств [6].

В качестве *low-k* диэлектриков в настоящее время используют:

- пористый диоксид кремния (пористость 60...80 %);

- $\text{SiO}_2$ , легированный фтором, бором, фосфором и углеродом;
- оксикарбиды кремния  $\text{SiOCH}$ , представляющие собой матрицу диоксида кремния, в которой часть атомов кислорода замещена  $\text{CH}_3$ -группами;
- органические полимеры (полиаллилен PAg, полиимид и др.).

Невысокий показатель диэлектрической проницаемости полимерных диэлектриков обусловлен низкой поляризуемостью химических связей, в случае же оксикарбида кремния и легированного  $\text{SiO}_2$  диэлектрическая проницаемость снижается из-за малой поляризационной способности  $\text{CH}_3$ -групп и легированных примесей. Для дальнейшего уменьшения диэлектрической проницаемости данные материалы делают пористыми, так как диэлектрическая проницаемость воздуха практически равна единице. Стоит отметить, что для *low-k* диэлектриков важным является свойство гидрофобности, особенно для пористых структур, так как относительная диэлектрическая проницаемость воды равна восьмидесяти [4—7, 12, 16]. Показатели относительной диэлектрической проницаемости некоторых *low-k* диэлектриков приведены в табл. 2.

Массовый переход на использование *low-k* диэлектриков в качестве межуровневой (*Inter-Level Dielectric — ILD*) и внутриуровневой (*Intra-Level Dielectric — IaLD*) изоляции произошло при переходе к 90 нм топологическим нормам производства ИМС, хотя некоторые производители начали использовать пористый диоксид кремния и другие *low-k* диэлектрики еще при нормах производства 250...180 нм.

При производстве ИМС при формировании топологических слоев могут использоваться разные *low-k* диэлектрики. Так, для верхних топологических слоев, где размеры проводников и толщины диэлектриков являются не критичными, вполне возможно применение диоксида кремния, в то время как на нижних уровнях используют полимерные и  $\text{SiOCH}$  *low-k* диэлектрики. Пример применения различных *low-k* диэлектриков показан на схеме вертикального сечения кристалла ИМС, выполненной с топологическими нормами 45 нм (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Из представленной схемы видно, что в качестве *IaLD* и *ILD* диэлектрика верхнего слоя (*Global*) используется диоксид кремния, а нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) выполняет роль ДБС и вспомогательного антиотражающего слоя. В двух следующих слоях

Таблица 2

Относительная диэлектрическая проницаемость *low-k* диэлектриков [4—7, 12, 16]

| Материал | $\text{SiO}_2$ | $\text{SiO}_2\text{:F}$ | $\text{SiO}_2\text{:C}$ | $\text{SiO}_2\text{:B:C}$ | Аморфный углерод (C) | Аморфный C:F | Черный алмаз | Полимеры  |
|----------|----------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|--------------|--------------|-----------|
| <i>k</i> | 3,9...4,2      | 3...3,5                 | 2,6...2,75              | 1,5...2                   | 2,7...3,2            | 2,3...2,8    | 2,3...2,7    | 1,8...2,7 |

(Semi-Global — 1,2) используется диоксид кремния, легированный углеродом  $\text{SiO}_2\text{:C}$ , а  $\text{SiCN}$  является диэлектрическим диффузионно-барьерным слоем. В средних слоях (Intermediate) в качестве межуровневого (*ILD*) и внутриуровневого (*IaLD*) диэлектрика используется *low-k* диэлектрик  $\text{SiO}_2\text{:C}$  с различным показателем диэлектрической проницаемости, а в качестве ДБС используется карбид кремния  $\text{SiC}$  и органический диэлектрик полиаллиллен (PAr). В первом слое системы межсоединений (Local) применяется полиаллиллен. Стоит отметить, что данная схема демонстрирует частный случай, так как у разных производителей могут различаться структура и набор используемых диэлектриков.

Увеличение степени интеграции ИМС прежде всего связано с уменьшением размеров транзистора. Уменьшение длины канала кремниевых полевых транзисторов требует сокращения эффективной толщины подзатворного диэлектрика диоксида кремния до значения меньше 1 нм при топологических нормах производства ниже 65 нм. При этом сильно возрастают токи утечки за счет прямой туннельной инжекции носителей заряда через тонкий слой подзатворного диэлектрика [7]. Данная проблема решается методом замены стандартного диоксида кремния на диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (рис. 4). Их применение позволило увеличить толщину подзатворного диэлектрика в несколько раз, что существенно уменьшило токи утечки [4, 6—8].

Основные требования к подзатворным *high-k* диэлектрикам состоят в следующем:

- высокое значение статической диэлектрической проницаемости (для увеличения толщины слоя диэлектрика при сохранении значения емкости между затвором и каналом);
- большая ширина запрещенной зоны ( $E_g > 3$  эВ);
- большие значения электронного и дырочного барьеров на границе кремний/диэлектрик (для обеспечения малых токов утечки);
- низкая концентрация ловушек для носителей заряда (для обеспечения стабильности порогового напряжения и малых токов утечки);
- химическая стабильность (не образует химических связей с кремнием, оксидом кремния и материалом затвора);
- совместимость с применяемой технологией производства ИМС [7].

В качестве *high-k* диэлектриков можно использовать оксиды металлов ( $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ ), их сложные соединения



Рис. 4. Пример применения *high-k* диэлектрика в технологии 65 нм

( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{BaSrTiO}_3$ ) и силикаты металлов ( $\text{HfSiO}_4$ ,  $\text{ZrSiO}_4$ ). Относительные показатели диэлектрической проницаемости наиболее распространенных и перспективных *high-k* диэлектриков приведены в табл. 3.

Впервые *high-k* диэлектрик в качестве подзатворного был применен в технологии 65 нм, вместо  $\text{SiO}_2$  был использован аморфный оксинитрид кремния  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ . Использование  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  в логических МДП-приборах позволило значительно повысить надежность и срок службы устройств благодаря подавлению диффузии примесей, снижению захвата заряда в диэлектрике, увеличению напряжения пробоя, многократному уменьшению токов утечки, повышению радиационной стойкости [14]. Однако в быстродействующих схемах с большой рассеиваемой мощностью, например, в современных микропроцессорах, использование  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  не решает проблемы масштабирования. Так, в 2009 г. компания Intel продемонстрировала рабочую версию микропроцессора, созданного по технологическим нормам 32 нм на основе транзисторов нового поколения с подзатворным диэлектриком на основе диоксида гафния  $\text{HfO}_2$  [1]. На сегодняшний день основным подзатворным диэлектриком в микроэлектронике является диоксид гафния, однако диоксид титана  $\text{TiO}_2$  представляет большой интерес в качестве подзатворного диэлектрика для приборов следующего поколения, выполненных с проектными нормами ниже 32 нм, а для использования в флэш-памяти наиболее перспективным материалом является оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### Изменение архитектуры

Миниатюризация элементов ИМС потребовала не только внедрения в производство новых технологических материалов, но и частичного изменения архитектуры этих элементов.

Уменьшение размеров транзисторов потребовало и уменьшения размеров шин системы межсо-

Таблица 3

Относительная диэлектрическая проницаемость *high-k* диэлектриков [4, 6, 7, 13]

| Материал | $\text{HfO}_2$ | $\text{ZrO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Ta}_2\text{O}_5$ | $\text{BaSrTiO}_3$ | $\text{SiO}_x\text{N}_y$ | $\text{HfSiO}_4$ | $\text{ZrSiO}_4$ |
|----------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|------------------|------------------|
| $k$      | 20...40        | 25             | 9                       | 26                      | 300                | ~7                       | 15               | 15               |

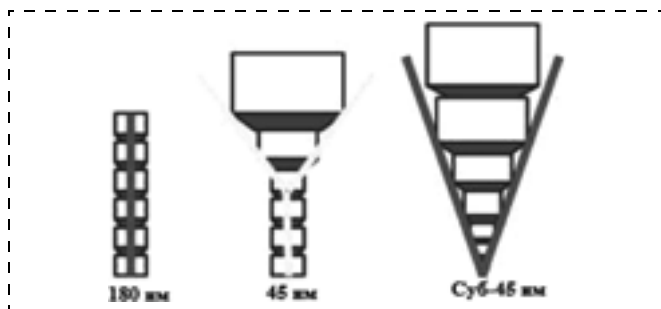


Рис. 5. Изменение размеров проводников от норм производства ИМС [18]

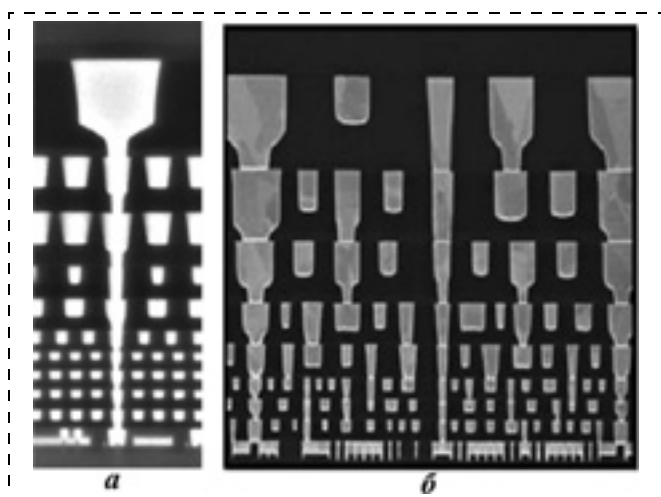


Рис. 6. РЭМ-изображения вертикальных сечений интегральных микросхем компании Intel, выполненных по топологическим нормам 45 нм (а) и 32 нм (б) [1, 19]

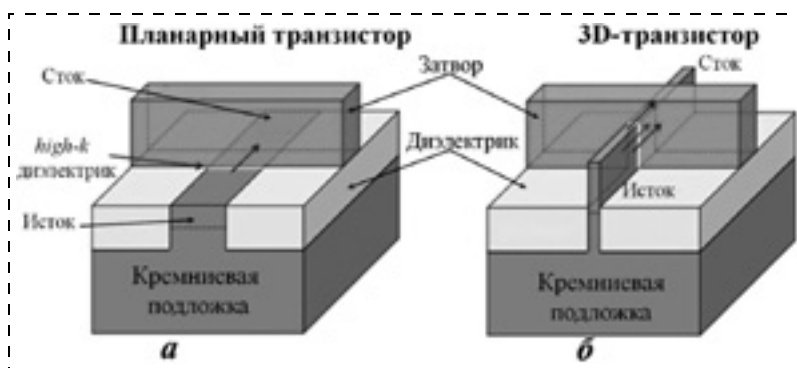


Рис. 7. Схема архитектуры планарного (а) и трехмерного (б) транзистора [19]

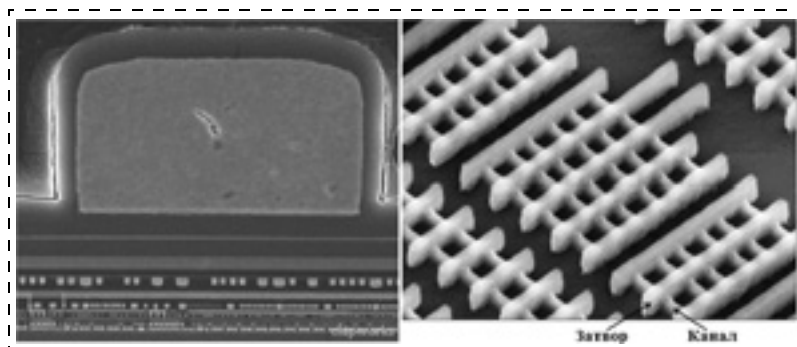


Рис. 8. РЭМ-изображение вертикального сечения микропроцессора Intel Xeon E3-130V2 (слева) и трехмерных транзисторов (справа) [19, 23]

единений, особенно на нижних уровня. При этом размер проводников может увеличиваться от слоя к слою в зависимости от норм производства (рис. 5, 6).

Из представленных вертикальных сечений (см. рис. 6) видно, что в случае ИМС, выполненной с нормами 45 нм, размеры проводников от слоя к слою изменяются Y-образно, в то время как в ИМС, выполненной с нормами 32 нм — V-образно, а в ИМС, выполненной по нормам 180 нм, размеры проводников практически не изменяются.

До недавнего времени решения по увеличению производительности носили эволюционный характер, т. е. уменьшались размеры элементов (транзисторов, проводников) при увеличении степени интеграции. Однако в 2011 г. компания Intel представила революционное решение, заключающееся в использовании новой архитектуры транзистора. Было объявлено, что при переходе к производству ИМС с топологическими нормами 22 нм вместо традиционной планарной архитектуры транзистора будет использоваться трехмерная (Tri-Gate) (рис. 7, 8). Микропроцессорам, произведенным по данной технологии, дали кодовое имя "IvyBridge" [1, 19–22].

Микропроцессор Intel Xeon E3-130V2, вертикальное сечение которого представлено на рис. 8 слева, выполнен с топологическими нормами 22 нм с использованием трехмерной архитектуры транзистора.

Применение новой архитектуры за счет использования трехмерного канала и затвора позволило увеличить степень интеграции, на 10...20 % увеличить производительность, уменьшить потребляемую мощность и тепловыделение ИМС [1, 21].

## Заключение

При уменьшении топологических норм производства ИМС изменяется набор применяемых материалов. Внедряются *low-k* (межслойная и внутрислойная изоляция) и *high-k* диэлектрики (подзатворный диэлектрик), в качестве основного материала системы межсоединений вместо алюминия применяют медь. При развитии производства ИМС, помимо использования новых материалов, частично изменилась архитектура элементов микросхем. Так, в производство ИМС с технологическими нормами 22 нм внедряются транзисторы с трехмерным затвором, характеристики которых на 10...20 % превосходят характеристики планарных транзисторов. По прогнозам специалистов данные нововведения позволят выпускать еще два поколения микросхем без существенных изменений технологических процессов производства [1, 20, 23].

## Список литературы

1. <http://www.intel.com>
2. <http://www.itrs.net>
3. **Абдуллаев Д. А., Зайцев А. А., Кельм Е. А., Милованов Р. А.** Ионно-лучевое травление как промежуточная стадия при удалении пассивирующих слоев микросхем в рамках технологии анализа отказов // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 11. С. 35–39.
4. **Громов Д. Г., Мочалов А. И., Сулимин А. Д., Шевяков В. И.** Металлизация ультрабольших интегральных схем. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 277 с.
5. **Шаширян Д., Парашив В., Булларт В., Бакланов М. Р.** Плазмохимическое травление: от микро- к наноэлектронике // Химия высоких энергий. 2009. Т. 43, № 3. С. 250–258.
6. **Королёв М. А.** Типы диэлектриков с разной величиной диэлектрической проницаемости // Научно-информационный материал. 2009. 6 с.
7. **Перевилов Т. В., Гриценко В. А.** Применение и электронная структура диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 6. С. 587–603.
8. **Sleight J. W., Lauer I., Dokumaci O., Fried D. M., Guo D., Haran B., Narasimha S., Sheraw C., Singh D., Steigerwalt M., Wang X., Oldiges P., Sadana D., Sung C. Y., Haensch W., Khare M.** Challenges and Opportunities for High Performance 32 nm CMOS Technology // International Electron Devices Meeting. 2006. 4 p.
9. **Sicard E.** Introducing 90 nm technology in Microwind // Microwind Application Note. 2004. 9 p.
10. <http://www.amd.com>
11. **Ishimaru K.** 45 nm/32 nm CMOS: Challenge and perspective // Solid-State Electronics. 2008. N. 52. P. 1266–1273.
12. **Chen X., Samavedam S., Narayanan V.** et al. A Cost Effective 32nm High-K/Metal Gate CMOS Technology for Low Power Applications with Single-Metal/Gate-First Process //

Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers. 2008. P. 88–89.

13. **Гриценко В. А., Асеев А. Л.** Синтез, свойства и применение диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью в кремниевых приборах. Новосибирск: СО РАН, 2011. С. 158.
14. **Дубин В. М., Борисенко В. Е.** Формирование наноразмерных медных межсоединений элементов интегральных микросхем // Доклад. БГУИР. 2011. С. 34–39.
15. **Васильев В. А., Воротилов К. А., Сигов А. С., Валеев А. С., Орлов С. Н., Шелепен Н. А.** Новые подходы к процессам формирования систем металлизации СБИС // Матер. VI Междунар. научно-технической конф. INTERMATIC — 2008. 2008. С. 37–42.
16. **Милованов Р. А., Кельм Е. А., Косичкин О. А., Ляпунов Н. А.** Селективное травление меди в технологии анализа отказов ИМС с проводниками на основе меди // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 11. С. 30–32.
17. **Uchida S., Takashima S., Hori M., Fukasawa M., Ohshima K., Nagahata K., Tatsumi T.** Evaluation of Property Changes due to Radiation, Radicals and Ions on Organic Low-k Films in  $H_2/N_2$  Plasma Etching // Japanese Journal of Applied Physics. 2008. V. 47, N. 5. P. 3621.
18. <http://www.eetimes.com>
19. <http://www.chipworks.com>
20. <http://www.cpugarden.ru>
21. **Захаров В.** Развитие CPU: от истоков до 3D-транзисторов // Chip. 2011. № 11. С. 54–57.
22. **Auth C., Allen C., Blattner A.** et al. A 22 nm High Performance and Low-Power CMOS Technology Featuring Fully-Depleted Tri-Gate Transistors, Self-Aligned Contacts and High Density MIM Capacitors // Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers. 2012. P. 131–132.
23. <http://www.russianelectronics.ru>

**D. A. Abdullaev**, Graduate Student, e-mail: daniil0309@gmail.com  
Moscow State Technical University of Radioengineering, Electronics and Automation

## CHANGE SET OF APPLIED MATERIALS AT REDUCTION TOPOLOGICAL NORMS PRODUCTION OF INTEGRATED MICROCIRCUITS

*In this work it is described as changes set of used materials in production of integrated circuits upon transition from topological norms of 180 nm to topological to norms of 32 and 22 nm.*

**Keywords:** integrated microcircuit (IMC), topological norms, low-k dielectrics, high-k dielectrics, aluminum interconnections, copper interconnections

### References

1. <http://www.intel.com>
2. <http://www.itrs.net>
3. **Abdullaev D. A., Zaitsev A. A., Kelm E. A., Milovanov R. A.** Ion beam etching, an intermediate stage of removing passivation layers circuits in failure analysis technology // Nano- and microsystem technique. 2013. N. 11. P. 35–39.
4. **Gromov D. G., Mochalov A. I., Sulimin A. D., Shevyakov V. I.** Metallization of ultra-large-scale integrated circuits. Moscow: Binom, 2009. P. 277.
5. **Shamiryan D., Parashiv V., Boullart W., Baklanov M. R.** Plasmachemical etching: from micro to a nanoelectronics // High energy chemistry. V. 43, N. 3. 2009. P. 250–258.
6. **Korolev M. A.** Types of dielectrics with different value of dielectric permittivity // Scientific — information material. 2009. P. 6.
7. **Perelov T. V., Gritsenko V. A.** Application and electronic structure of high-permittivity dielectrics // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. V. 180, N. 6, 2010. P. 587–603.
8. **Sleight J. W., Lauer I., Dokumaci O., Fried D. M., Guo D., Haran B., Narasimha S., Sheraw C., Singh D., Steigerwalt M., Wang X., Oldiges P., Sadana D., Sung C. Y., Haensch W.,**

- Khare M.** Challenges and Opportunities for High Performance 32 nm CMOS Technology // International Electron Devices Meeting. 2006. P. 4
9. **Sicard E.** Introducing 90 nm technology in Microwind // Microwind Application Note. 2004. P. 9.
10. <http://www.amd.com>
11. **Ishimaru K.** 45 nm/32 nm CMOS: Challenge and perspective // Solid-State Electronics. N. 52. 2008. P. 1266–1273.
12. **Chen X.,** et al. A Cost Effective 32 nm High-K/Metal Gate CMOS Technology for Low Power Applications with Single-Metal/Gate-First Process // Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers. 2008. P. 88–89.
13. **Gritsenko V. A., Aseev A. L.** Synthesis, properties and use of dielectrics with high dielectric permeability in silicon devices. Novosibirsk: SO RAN, 2011. P. 157.
14. **Dubin V. M., Borisenko V. E.** Fabrication of nanodimensional copper interconnects in integrated circuits // Doklady BGUIR. 2003. P. 34–39.
15. **Vasilyev V. A., Vorotilov K. A., Sigov A. S., Valeev A. S., Orlov S. N., Shelepen N. A.** New approaches to processes of formation of metalization systems of very large scale integration // Conference INTERMATIC — 2008. P. 37–42.

16. Milovanov R. A., Kelm E. A., Kosichkin O. A., Lyapunov N. A. Selective Etching of IC Copper Interconnects in Failure Analysis Technology // Nano- and microsystem technique. 2013. N. 11. P. 30–32.

17. Uchida S., Takashima S., Hori M., Fukasawa M., Ohshima K., Nagahata K., Tatsumi T. Evaluation of Property Changes due to Radiation, Radicals and Ions on Organic Low-k Films in  $H_2/N_2$  Plasma Etching // Japanese Journal of Applied Physics. V. 47, N. 5. 2008. P. 3621.

18. <http://www.eetimes.com>

19. <http://www.chipworks.com>

20. <http://www.cpugarden.ru>

21. Zaharov V. CPU development: from sources to 3D-transistors // Chip. 2011. N. 11. P. 54–57.

22. Auth C., et al. A 22 nm High Performance and Low-Power CMOS Technology Featuring Fully-Depleted Tri-Gate Transistors, Self-Aligned Contacts and High Density MIM Capacitors // Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers. 2012. P. 131–132.

23. <http://www.russianelectronics.ru>

УДК 53.06

Д. Н. Зубов, науч. сотр., Е. А. Кельм, науч. сотр., Р. А. Милованов, зам. нач. отд.,  
e-mail: Milovanov\_r@inbox.ru,

Г. В. Молодцова, науч. сотр., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, г. Москва

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННЫХ КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДОК КРИСТАЛЛОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ОТКАЗОВ СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Поступила в редакцию 20.12.2013

*При анализе отказов современных интегральных схем, может возникнуть необходимость в проведении исследований, включающих одновременный анализ топологии кристалла и подачу электрических сигналов на его контактные площадки. Однако при осуществлении доступа к кристаллу контактные площадки могут быть повреждены по различным причинам. Рассмотрены несколько типов повреждений контактных площадок, а также экспериментальные исследования по их восстановлению электрохимическим осаждением серебра и меди.*

**Ключевые слова:** анализ отказов, интегральная схема, контактная площадка, электрохимическое осаждение, термокомпрессионная сварка

### Введение

Современные интегральные схемы (ИС) представляют собой сложные структуры, производство которых состоит из множества (более сотни) разнообразных технологических процессов. На последнем этапе изготовления ИС осуществляется корпусирование (англ. *packaging*) кристалла (кристаллов), после чего ИС готова к монтажу в различные электронные системы [1].

Обычно после корпусирования проводят заключительное тестирование (англ. *final testing*), которое выявляет различные типы неисправностей ИС [2]. При анализе отказов таких неисправностей (обнаруженных в результате заключительного тестирования) может возникнуть необходимость исследования кристалла в рабочем или тестовом режимах (аналогично тесту кристаллов на пластине — англ. *wafer test* [3]).

Для пластиковых корпусов ИС доступ к кристаллу (декапсуляция) обычно осуществляют вывариванием ИС в дымной азотной кислоте [4]. После декапсуляции и удаления золотой проволоки, соединяющей контактные площадки кристалла с внешними выводами ИС, кристалл исследуют различными методами оптической и электронной микроскопии, инфракрасной микроскопии и др. [5].

Реализация некоторых типов исследований (например, ИК микроскопия) требует подачу электрических сигналов на контактные площадки кристалла (сигналы управления, тестовые последовательности и др.). Решение данной задачи возможно с применением контактных зондов (аналогично "wafer test"), однако с учетом сложности, связанной с долговременным удерживанием зонда в области контактной площадки, и затруднений, возникающих при перемещении образца, наиболее предпочтительным является установка кристалла на монтажную плату с повторным восстановлением коммутационной схемы контактных площадок и внешних выводов (повторная разварка).

Поскольку возможны повреждения контактных площадок, их повторная разварка может быть затруднена. Таким образом, решение задачи их восстановления является необходимым условием проведения анализа отказов, обнаруженных после финального тестирования ИС.

### Типы повреждений контактных площадок

Повреждение контактной площадки (КП) может быть вызвано различными причинами. Например, после декапсуляции ИС при удалении золотой проволоки КП может быть повреждена в области контакта с проволокой (рис. 1).

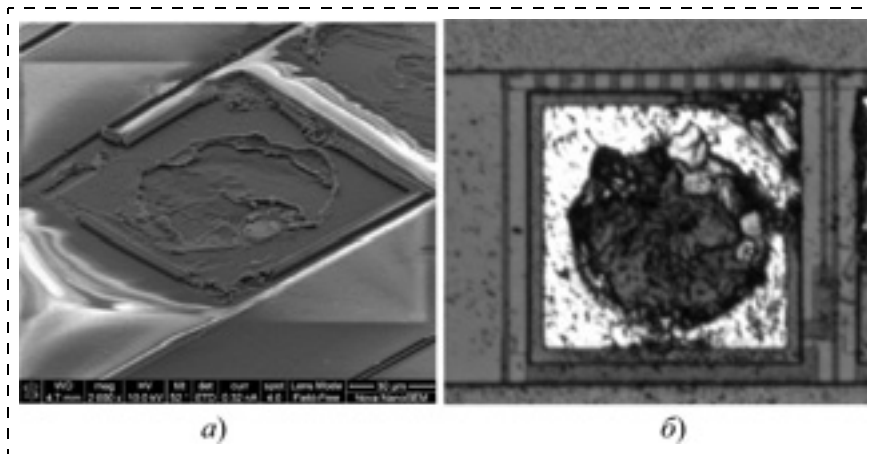


Рис. 1. Поврежденная при удалении золотой проволоки КП: *а* — РЭМ-изображение; *б* — ОМ-изображение

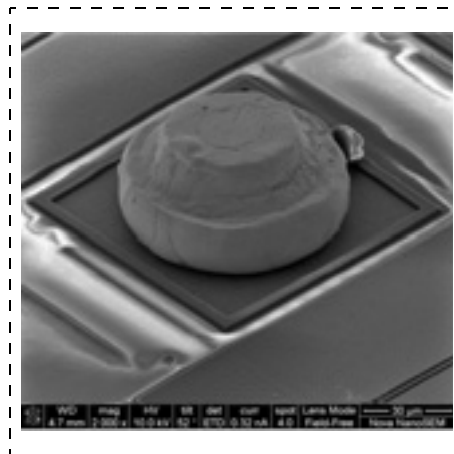


Рис. 2. РЭМ-изображение золотого шарика, соединенного с КП, после удаления проволоки

Обычно проволока отрывается у основания золотого шарика (рис. 2), к которому при восстановлении коммутационной схемы "КП — внешний вывод" методом повторной разварки подсоединяется золотая проволока (рис. 3). Описываемый тип повреждений проявляется достаточно редко и число поврежденных таким образом площадок редко превышает 10 % от общего числа.

Еще один тип повреждений, приводящий к повреждению 100 % КП, проявляется, если при создании коммутационной схемы "КП — внешний вывод" вместо золотой используется медная проволока (рис. 4, см. четвертую сторону обложки). В данном случае, учитывая, что азотная кислота растворяет медь, декапсуляция ИС приводит к удалению КП в области ее соединения с медным шариком (рис. 5).

#### Подходы к восстановлению контактных площадок

Поиск источников, описывающих подходы к восстановлению поврежденных КП кристалла ИС, показал, что в настоящее время эта тема мало изучена. Однако, учитывая необходимость развития методов восстановления КП для анализа отказов ИС, в рамках данной работы были исследованы электрохимические подходы к их восстановлению.

Были исследованы методы электрохимического осаждения серебра и меди. Данный выбор обусловлен тем, что эти металлы относятся к тяжелым, по массе близки к золоту и образуют с ним разнообразные сплавы. Экспериментальные исследования проводили с использованием водных растворов нитрата серебра и сульфата меди (II). Было исследовано влияние концентрации раствора и силы электрического тока на плотность и однородность формируемой пленки металла.

Проведенные экспериментальные исследования по восстановлению КП электрохимическим осаждением серебра показали, что при малых концентрациях раствора и малых токах вокруг КП об-

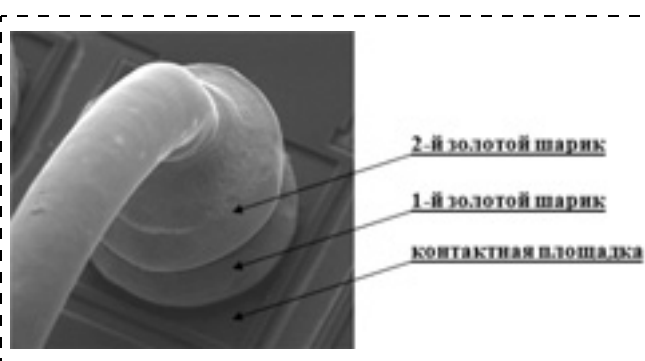


Рис. 3. РЭМ-изображение КП после повторной разварки — соединение золотой проволоки с золотым шариком

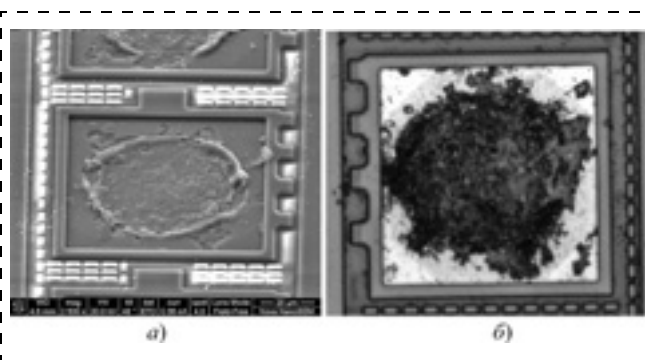


Рис. 5. Контактная площадка, поврежденная при декапсуляции ИС с медной коммутационной системой "КП — внешний вывод": *а* — РЭМ изображение; *б* — ОМ изображение

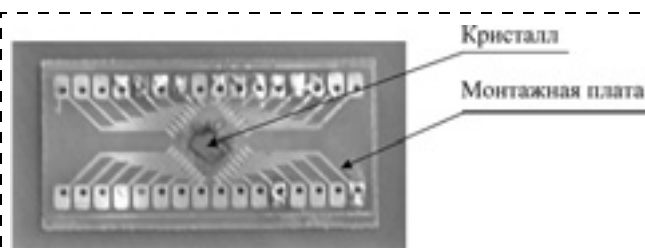


Рис. 8. Кристалл ИС, закрепленный на монтажную печатную плату

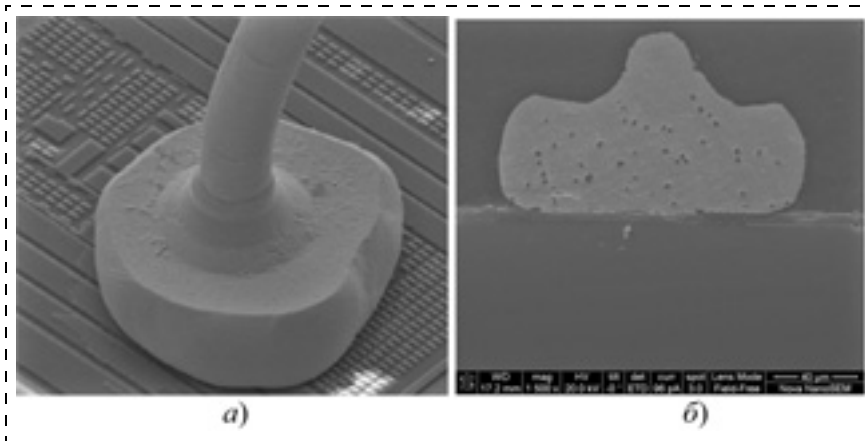


Рис. 9. Изображения области "повторной разварки" — соединения восстановленной КП ИС с золотой проволокой:

а — РЭМ-изображение общего вида; б — РЭМ-изображение вертикального сечения

разуется мелкодисперсное серебро, а при больших концентрациях на КП образуются крупнокристаллические дендритные структуры (рис. 6, а, см. четвертую сторону обложки). Также, предположительно из-за наличия микротрещин в пассивирующем покрытии, имеет место осаждение серебра на некоторых проводниках ИС (рис. 6, б, см. четвертую сторону обложки).

Проведенные экспериментальные исследования по восстановлению КП электрохимическим осаждением меди показали, что при концентрации раствора сульфата меди 5 % и малых (3...5 мА) токах можно получить плотную медную пленку толщиной около 1...2 мкм. Анализ результатов проведенных исследований показал, что осаждение меди произошло только на поврежденной области КП (рис. 7, см. четвертую сторону обложки). Предположительно, такая особенность может быть вызвана тем, что адгезия меди к нитриду титана (область повреждения) выше, чем к алюминию (неповрежденная область КП), или тем, что слой оксида алюминия препятствует протеканию электрического тока и, как следствие, осаждению меди.

#### Восстановление коммутационной схемы "КП — внешний вывод"

Для полного восстановления коммутационной схемы "КП — внешний вывод" полученные КП не-

обходимо повторно разварить на монтажную печатную плату (МПП). После крепления кристалла на МПП (рис. 8) методом "шарик—клин" КП были повторно разварены золотой проволокой (рис. 9). Необходимо отметить, что для формирования прочного соединения "КП — золотая проволока" потребовалось увеличить температуру кристалла и мощность ультразвука.

Работоспособность полученного образца была проверена подачей тестовой последовательности на внешние контакты МПП.

#### Заключение

В работе рассмотрены подходы к восстановлению поврежденных контактных площадок кристаллов ИС на основе электрохимического осаждения серебра и меди. Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование метода электрохимического осаждения серебра затруднительно из-за его осаждения на некоторых проводниках верхнего слоя (предположительно из-за наличия микротрещин в пассивирующем покрытии кристалла), а также из-за крупнокристаллических дендритных структур, которые образуются на контактных площадках. Метод электрохимического осаждения меди позволил получить однородную медную пленку на поврежденных областях КП. Проведенная повторная разварка восстановленных КП позволила получить работоспособный образец для последующего проведения процедур анализа отказов.

#### Список литературы (References)

1. May G. S., Spanos C. J. Fundamentals of semiconductor manufacturing and process control. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2006. 463 p.
2. Van Zant P. Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing, Fifth Edition. New York: McGraw-Hill, 2004. 609 p.
3. www.icknowledge.com/freecontent/Introduction to IC technology rev 5.pdf
4. Beck F. Integrated circuit failure analysis. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1998. 174 p.
5. Ross R. J. Microelectronics failure analysis. Desk reference. Sixth Edition. Ohio: ASM International, 2011. 660 p.

D. N. Zubov, Junior Researcher, E. A. Kelm, Junior Researcher,

R. A. Milovanov, Deputy Chief of a Department, e-mail: Milovanov\_r@inbox.ru, G. V. Molodtsova, Research Associate, Institute of Nanotechnology Microelectronics RAS

#### ELECTROCHEMICAL RECOVERY OF DAMAGED BONDING AREA DURING FAILURE ANALYSIS OF THE MODERN INTEGRATED CIRCUITS

*During failure analysis of modern integrated circuits we may wish to do some investigation, which consist of simultaneous inspection die's surface and signal injection to IC's pad. However, while IC decapsulating, bonding area can be damaged. In present work we consider different types of bonding area damages and approaches to their electrochemical recovery using silver and copper.*

**Keywords:** failure analysis, integrated circuit (IC), bonding area, pad, electrochemical deposition, thermocompression bonding

С. А. Жукова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, нач. комплекса, Д. Ю. Обижаев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, зам. нач. отдела, В. Е. Турков<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, нач. центра, Д. Д. Рискин<sup>1</sup>, вед. инженер, e-mail: dr182@mail.ru, П. Н. Кудрявцев<sup>2</sup>, вед. инженер, Ю. С. Четверов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, нач. отделения

<sup>1</sup> Государственный научный центр Российской Федерации федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт химии и механики", г. Москва

<sup>2</sup> Открытое акционерное общество "ЦНИИ "Циклон", г. Москва

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ

Поступила в редакцию 19.12.2013

*Представлены результаты комплексных исследований основных характеристик микромостиковых структур, а также их зависимость от режимов изготовления и конструктивных особенностей. Изготовленные микромостиковые структуры обеспечивают оптическую плотность полосы поглощения ИК-излучения  $1000\text{ см}^{-1}$  на уровне примерно 0,5, температурный коэффициент сопротивления термочувствительного слоя 1,7 %, тепловую постоянную времени в диапазоне 11,9...12,6 мс.*

**Ключевые слова:** неохлаждаемая микроболометрическая матрица, микромостиковая структура, нитрид кремния, оксид ванадия, температурный коэффициент сопротивления, поглощение инфракрасного излучения, тепловая постоянная времени

### Введение

В настоящее время неохлаждаемые микроболометрические матрицы находят все более широкое применение при создании как российских, так и зарубежных тепловизионных систем. При этом интерес представляет применение как крупноформатных матриц ( $640 \times 480$ ,  $1024 \times 768$  элементов и более), так и малоформатных матриц и линейек. Системы на основе таких матриц по температурной чувствительности близки к современным фотоэлектрическим ИК приемникам с криогенным охлаждением и имеют при этом по сравнению с ними ряд преимуществ, таких как относительно низкая стоимость, малые энергопотребление и массогабаритные характеристики.

Указанные выше преимущества обусловлены применением микромостиковых структур в качестве чувствительных элементов, обеспечивающих преобразование падающего ИК излучения в изменение электрической величины. Они выполнены, как правило, в виде трехслойной конструкции на основе оксида ванадия в качестве терморезистора, нитрида кремния в качестве конструкционного элемента, а также балочных нихромовых выводов.

Основные рабочие параметры микроболометрических матриц определяются интенсивностью поглощения ИК излучения микромостиковыми структурами, теплофизическими характеристиками (теплопроводностью и теплоемкостью), а также свойствами терморезистивного слоя (электрическое сопротивление, температурный коэффициент сопротивления). При этом в литературе практически отсутствуют данные, посвященные комплексным исследованиям одиночной микромостиковой

структуры в целях оптимизации указанных выше характеристик.

Цель настоящей работы — исследование влияния конструктивных особенностей и технологических режимов изготовления микромостиковых структур на интенсивность поглощения ими ИК излучения, теплопроводность, теплоемкость, а также на температурный коэффициент сопротивления терморезистивного слоя.

### 1. Объекты и методы исследования

Для исследования поглощения ИК-излучения, а также теплофизических характеристик использовали микромостиковые структуры двух типов, сформированные на поверхности кремниевых пластин со слоем диоксида кремния. В обоих случаях они представляли собой плоские элементы прямоугольной формы, закрепленные над поверхностью кремниевой пластины со слоем алюминия. В структурах первого типа (для исследования поглощения ИК излучения) элемент был выполнен на основе тонкой пленки нитрида кремния толщиной 400 нм. В структурах второго типа (для исследования теплофизических характеристик) элемент представлял собой слой оксида ванадия, заключенный между слоями нитрида кремния толщиной 200 нм каждый. Электрический контакт оксида ванадия и металлизации на поверхности подложки осуществлялся с помощью нихромовых балочных выводов. Технологические схемы изготовления микромостиковых структур представлены на рис. 1. Схематические изображения образцов представлены на рис. 2.

Для сравнения исследовали слои нитрида кремния толщиной 400 нм на поверхности алюминия,



Рис. 1. Технологические схемы изготовления микромостиковых структур

сформированного на поверхности кремниевых пластин.

Для определения температурного коэффициента сопротивления терморезистивных слоев использовали тонкие покрытия оксида ванадия с сопротивлением, лежащим в диапазоне 155...995 кОм, напыленные на поверхность поликорковых пластин с предварительно сформированными медными контактами. Схематическое изображение и фотография образца представлены на рис. 3.

В качестве кремниевых подложек использовали пластины монокристаллического кремния марки КДБ-4,5 диаметром 100 мм. Отмывку подложек перед нанесением функциональных слоев проводили посредством их последовательного кипячения в перекисно-аммиачном растворе в течение 15 мин и деионизованной воде в течение 15 мин.

Слои алюминия, нихрома и нитрида кремния формировали методами магнетронного распыления на установке ВАТТ-БИН-2М. Осаждение нитрида кремния про-

водили в режиме постоянного тока распылением кремниевой мишени в газовой смеси азота и аргона. Значение тока магнетрона выбирали в диапазоне 1...5 А. Объемный расход азота варьировали в диапазоне 1,08...1,44 л/ч. При этом расход аргона поддерживали постоянным на уровне 0,36 л/ч.

Зазор между микромостиковыми элементами и поверхностью подложки в диапазоне 1,9...3,2 мкм получали с применением технологии "жертвенных" слоев различной толщины. Их формировали на основе позитивного фоторезиста марки ФП 9120 на поверхности кремниевых подложек методом центрифугирования. Толщину формируемого слоя регулировали, варьируя частоту вращения ротора центрифуги в диапазоне 1500...3500 об/мин. Слой фоторезиста подвергали сушке при температуре 363 К, после чего в нем формировали отверстия методом контактной фотолитографии и проводили вторую стадию термообработки при температуре 433 К.

Топологический рисунок в функциональных слоях формировали методом контактной литографии с применением установки совмещения и экспонирования SUSS MA6/BA6.

Удаление "жертвенного" слоя проводили посредством его обработки в высокочастотной плазме тлеющего разряда при частоте 13,56 МГц в реакторах установок объемного типа "Плазма — 600 Т" с применением воздуха в качестве плазмообразующего газа.

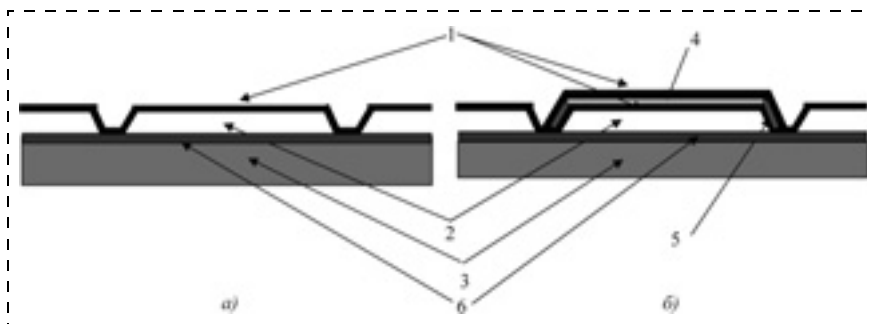


Рис. 2. Схематическое изображение микромостиковых структур для исследования ИК излучения (а) и теплофизических характеристик (б):

1 — конструктивный слой на основе нитрида кремния; 2 — оптическая резонансная полость; 3 — кремниевая подложка; 4 — терморезистивный слой на основе оксида ванадия; 5 — контакты на основе нихрома; б — ИК зеркало на основе алюминия

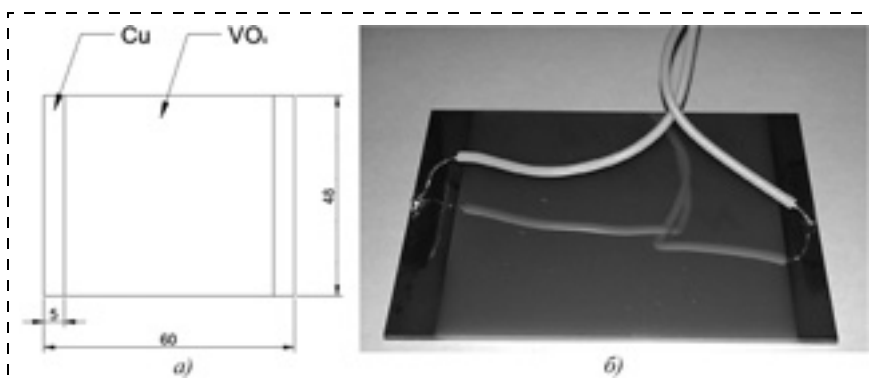


Рис. 3. Схематическое изображение (а) и фотография (б) образца для измерения температурного коэффициента сопротивления тонких слоев оксида ванадия



Рис. 4. Фотография ИК микроскопа Nicolet iN10:

а — общий вид прибора; б — моторизованный столик для размещения образцов

Поглощение инфракрасного излучения полученных микроэлектронных структур исследовали методом ИК спектроскопии с применением ИК микроскопа Nicolet iN10 в диапазоне волновых чисел  $400 \dots 2500 \text{ см}^{-1}$ . Фотография ИК микроскопа представлена на рис. 4. Оценку различий интенсивности поглощения ИК излучения слоями нитрида кремния проводили полуколичественным способом с применением метода базовой линии по рассчитанной оптической плотности полос в соответствии с соотношением  $A = \lg \frac{I_0}{I}$ , где  $I$  — интенсивность пропускания в максимуме полосы поглощения;  $I_0$  — интенсивность фона [1].

Зазор между микроэлектронной структурой и поверхностью подложки, а также значение деформации микроэлектронной структуры оценивали с помощью растрового электронного микроскопа Karl Zeiss CrossBeam Neon 60.

Для определения температурного коэффициента сопротивления тонких пленок оксида ванадия проводили измерения их сопротивления при различных температурах в диапазоне  $25 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$  с шагом  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  с помощью специально созданного стенда, состоящего из термошкафа, источника питания постоянного тока, милливольтметра и потенциометра. Электрическая схема стенда представлена на рис. 5.

На основании полученных данных рассчитывали значения термического коэффициента со-

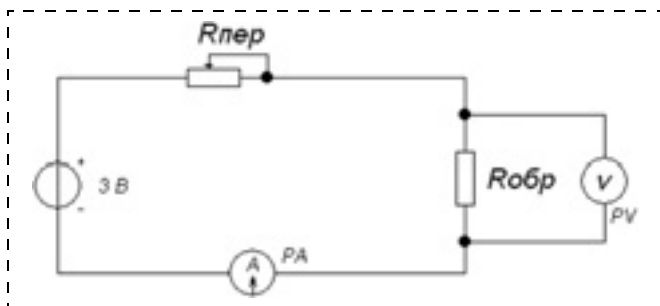


Рис. 5. Электрическая схема стенда для измерения сопротивления терморезистивного слоя на основе оксида ванадия

противления по соотношению  $\alpha = \frac{\Delta R}{R(T_1)\Delta T} \cdot 100 \%$ , где  $\Delta T = (T_2 - T_1)$ ,  $T_2 > T_1$ , — разница температур;  $\Delta R = (R(T_2) - R(T_1))$  — разница сопротивлений образца. При измерении сопротивления напряжение источника питания и значение сопротивления переменного резистора выбирали таким образом, чтобы значение протекающего тока составляло  $10 \text{ мкА}$ , что гарантирует незначительный разогрев образца при протекании электрического тока.

Для определения теплопроводности и теплоемкости микроэлектронных структур был использован метод определения теплофизических характеристик, предложенный в работе [2].

Метод основан на использовании режима, при котором через микроболометр пропускается импульс электрического тока постоянного значения и учитывается изменение выделяемой вследствие протекания тока мощности.

## 2. Результаты и их обсуждение

В работе [3] установлено, что интенсивность поглощения инфракрасного излучения микроэлектронными структурами, во многом определяется режимами формирования слоев нитрида кремния и размером зазора между элементом и поверхностью подложки, на которой она сформирована. Для обеспечения максимума поглощения в диапазоне длин волн  $8 \dots 14 \text{ мкм}$  необходимо соблюдение следующих условий при изготовлении микроэлектронных структур.

1. Обеспечение низкого уровня остаточных напряжений в слое нитрида кремния, вызывающих деформацию микроэлектронных структур после их освобождения (травления "жертвенного" слоя). Деформации приводят к существенному снижению интенсивности поглощения ИК-излучения в результате изменения размеров резонансной полости. Увеличение степени деформации микроэлектронных структур приводит к нарушению их тепловой изоляции в результате соприкосновения мембраны и поверхности подложки.

2. Формирование слоев нитрида кремния заданного химического состава, обеспечивающего максимум поглощения ИК-излучения в заданном диапазоне длин волн.

Таким образом, перед проведением исследований микроэлектронной структуры необходимо было оптимизировать технологические режимы осаждения нитрида кремния для обеспечения максимального уровня поглощения слоем нитрида кремния ИК излучения в области длин волн  $8 \dots 14 \text{ мкм}$ ,

что соответствует спектральному диапазону функционирования микроболометрической матрицы.

Режимы осаждения выбирали исходя из устойчивости горения разряда на поверхности мишени. Устойчивость разряда оценивали по числу микродуг на поверхности мишени. Кроме того, анализировали зависимость напряжения разряда от расхода азота при постоянном расходе аргона и тока разряда, представленные на рис. 6, 7. На основании представленных данных видно, что при увеличении расхода азота при постоянном токе разряда происходит снижение напряжения разряда с его последующей стабилизацией, что соответствует формированию на поверхности мишени сплошного слоя нитрида кремния. При увеличении тока разряда толщина слоя нитрида кремния на поверхности уменьшается, что приводит к повышению разрядного напряжения. При расходе азота менее 0,72 л/ч формировалось матовое непрозрачное покрытие. В диапазоне расходов 1,08...1,44 л/ч разряд горел неустойчиво с большим числом микродуг на

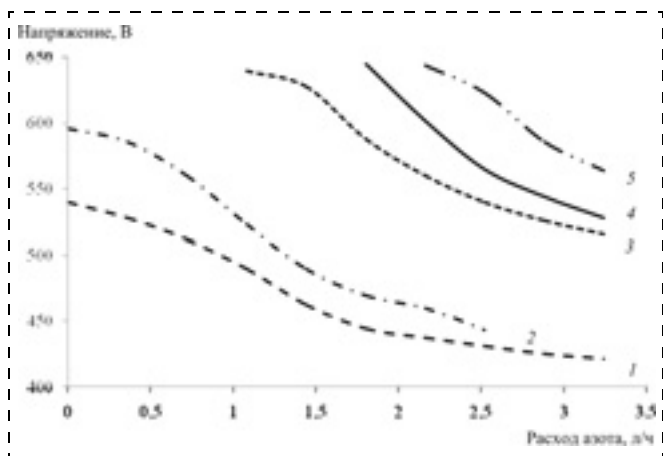


Рис. 6. Зависимость напряжения разряда от расхода азота при постоянном расходе аргона при различных значениях тока разряда: 1 — 1 А; 2 — 1,5 А; 3 — 3 А; 4 — 4 А; 5 — 5 А

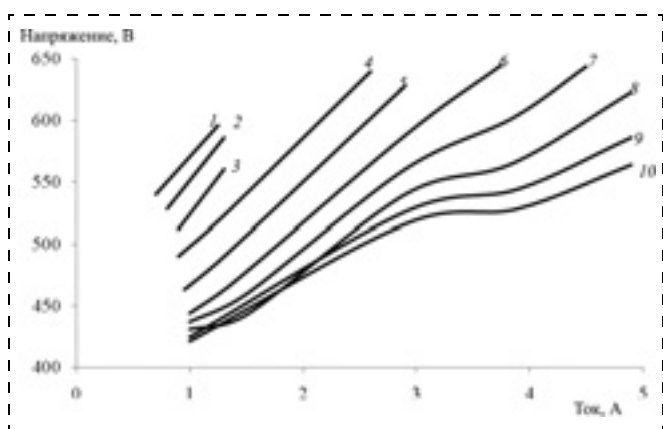


Рис. 7. Зависимость напряжения разряда от его тока при различном расходе азота: 1 — 0; 2 — 0,36 л/ч; 3 — 0,72 л/ч; 4 — 1,08 л/ч; 5 — 1,44 л/ч; 6 — 1,8 л/ч; 7 — 2,16 л/ч; 8 — 2,52 л/ч; 9 — 2,88 л/ч; 10 — 3,24 л/ч

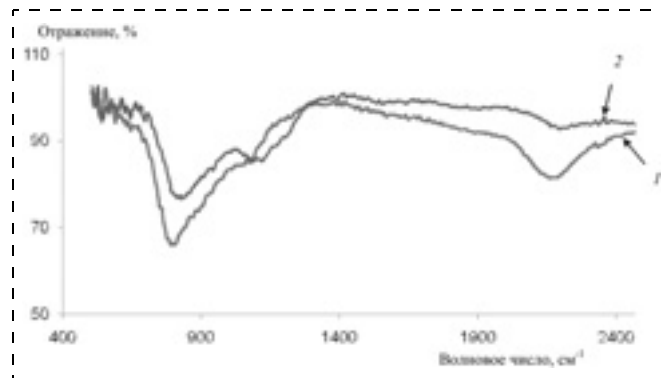


Рис. 8. ИК спектры отражения слоя нитрида кремния, сформированного в различных режимах на поверхности кремниевой подложки со слоем алюминия:

1 — режим 1; 2 — режим 2

мишени. Поэтому нанесение покрытия проводили при расходе азота 1,8...2,16 л/ч. Расход аргона поддерживали постоянным. Увеличение расхода азота выше 2,16 л/ч приводит к снижению скорости осаждения покрытия вследствие формирования сплошного слоя нитрида кремния на поверхности мишени, что приводит к появлению перегиба вольт-амперной характеристики.

В результате для формирования слоев нитрида кремния на тестовых образцах были выбраны два режима. Оба режима характеризуются током разряда 4,5 А и мощностью 2,4 кВт. Для режима 1 объемное соотношение азота и аргона составляло 6,0 (расход азота 2,0 л/ч), а для режима 2 — 5,0 (расход азота 1,38 л/ч) при постоянном расходе аргона, составлявшем 0,36 л/ч.

На рис. 8 представлены ИК-спектры отражения слоев нитрида кремния, осажденные в режимах 1 и 2.

Во всех спектрах присутствуют полосы, характерные для нитрида кремния, а именно: полосы 800...830 см<sup>-1</sup>, характерные для валентных колебаний связей Si—N, полосы с диапазонами 2160...2202 и 627...656 см<sup>-1</sup>, характерные для валентных и деформационных колебаний связей Si—H соответственно. Присутствие пика с волновым числом 1066 см<sup>-1</sup> связывают с колебаниями связей Si—O—Si, что свидетельствует о наличии кислорода в составе осаждаемых слоев. Некоторое уширение плеча пика Si—N в области 1175 см<sup>-1</sup> относят к валентным колебаниям связей N—H. Сравнительный анализ ИК-спектров слоев нитрида кремния, сформированных при различных соотношениях азота и аргона в реакционной смеси (см. рис. 7) показал, что снижение соотношения азота и аргона в газовой смеси приводит к снижению оптической плотности полосы Si—N с 0,22 до 0,113, а также ее смещению в область меньших значений волновых чисел. Это может быть обусловлено образованием связей Si—Si и соответственно повышением содержания кремния в осаждаемом слое.

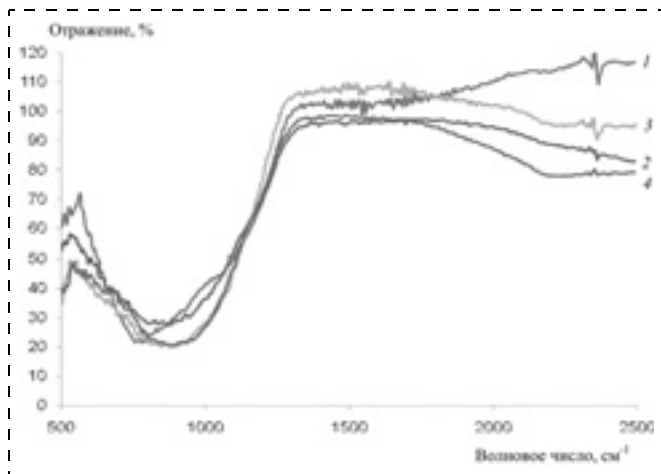


Рис. 9. Спектральная зависимость эффективности отражения электромагнитного излучения для тестовых микромостиковых структур на основе нитрида кремния толщиной 400 нм при высоте зазора:

1 — 1,9 мкм; 2 — 2,2 мкм; 3 — 2,7 мкм; 4 — 3,2 мкм

Кроме того, следует отметить наличие водородсодержащих связей в составе формируемых слоев нитрида кремния. При этом для слоя, сформированного при меньшем содержании азота в газовой смеси, оптическая плотность полосы поглощения связи Si—H снижается с 0,042 до 0,012 с одновременным более четким проявлением в спектре полосы поглощения связи N—H. Вероятно появление водородсодержащих связей в составе слоя связано с диссоциацией молекул воды в разряде с последующим образованием химических связей водорода с кремнием и азотом.

Уменьшение содержания азота в составе газовой смеси приводит также к смещению полосы поглощения связей Si—H в сторону больших значений волновых чисел — от 2160 до 2202  $\text{см}^{-1}$ . Это можно объяснить повышением электроотрицательности атомов, присоединенных к кремнию, т. е. замещением связей Si—Si на Si—N.

Присутствие шумовых колебаний в области 1400...1800  $\text{см}^{-1}$  на обоих ИК спектрах можно от-

нести к присутствию в осажденных слоях молекул воды, сорбированных из окружающей среды.

Таким образом, для изготовления микромостиковых структур был выбран режим осаждения нитрида кремния при большем объемном расходе азота (режим 1), поскольку он обеспечивает формирование слоев с большей оптической плотностью полосы поглощения в области 8...14 мкм по сравнению с режимом 2.

На рис. 9 представлены спектральные зависимости эффективности отражения для микромостиковых структур при различном зазоре между элементом и подложкой. Показано, что для всех полученных структур основной пик поглощения расположен в области 600...1200  $\text{см}^{-1}$ . При зазоре, составляющем 1,9 мкм, максимум поглощения соответствует 762  $\text{см}^{-1}$ . Кроме того, на спектре можно выделить пики, соответствующие колебаниям связей Si—O—Si, а также колебаниям связей N—H. Увеличение зазора между элементом и подложкой приводит к слиянию пиков, обусловленных поглощением химических связей слоя нитрида кремния, а также к смещению минимума отражения (максимума поглощения) пика в сторону больших значений волновых чисел. Так, при значениях зазора 2,2 и 2,7 мкм максимум поглощения соответствует 860 и 880  $\text{см}^{-1}$ . Максимальное смещение пика достигается при зазоре, составляющем 3,2 мкм. При этом максимум поглощения соответствует примерно 910  $\text{см}^{-1}$ .

Оптическая плотность полос в максимуме поглощения для всех исследованных образцов приблизительно одинакова. Однако для обеспечения максимальной эффективности поглощения структурой ИК излучения в рабочей области длин волн максимум поглощения должен соответствовать 1000  $\text{см}^{-1}$ . На рис. 10 представлена зависимость оптической плотности полосы поглощения 1000  $\text{см}^{-1}$  от зазора между элементом и подложкой. Показано, что максимальная оптическая плотность полосы поглощения достигается при зазоре 3,2 мкм и составляет примерно 0,5.

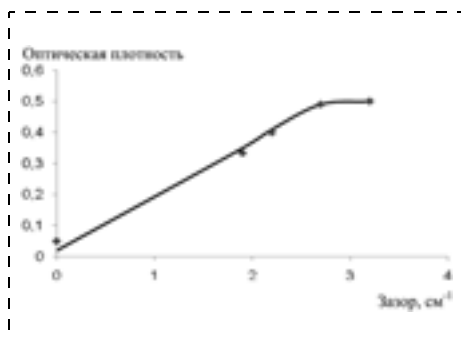


Рис. 10. Зависимость оптической плотности полосы поглощения тестовой микромостиковой структуры в области длины волны электромагнитного излучения 10 мкм от зазора

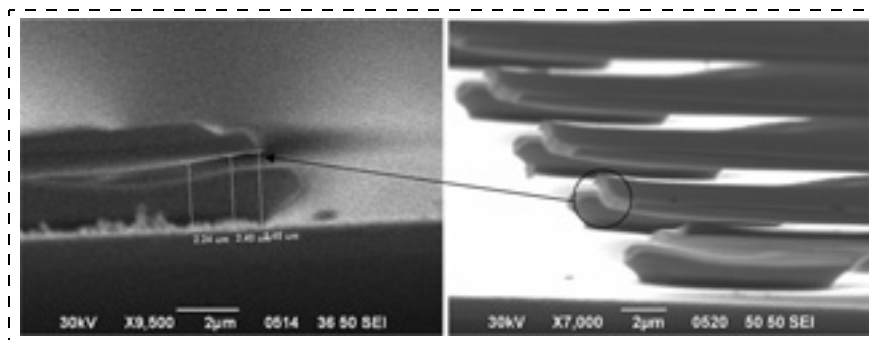


Рис. 11. Электронные микрофотографии деформированных краев микромостиковых элементов

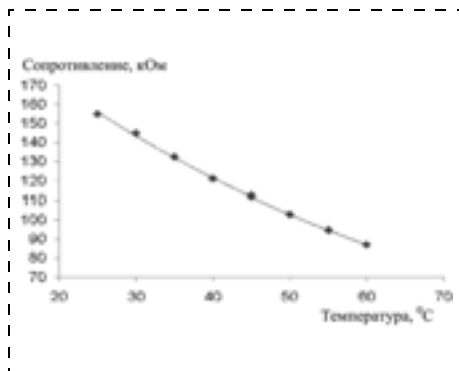


Рис. 12. Зависимость сопротивления слоя оксида ванадия на поверхности поликорровой пластины от температуры

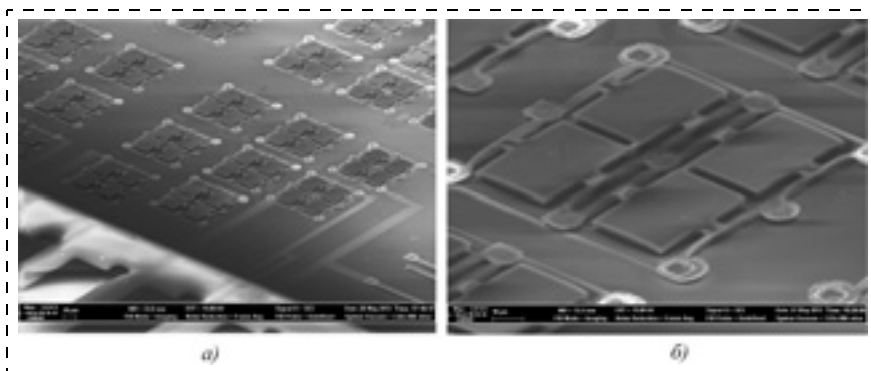


Рис. 13. Электронные микрофотографии тестовых микромостиковых элементов: а — общий вид элементов; б — группа из четырех тестовых микромостиковых элементов

Известно, что максимальная эффективность поглощения ИК излучения обеспечивается при расстоянии между поглощающим и отражающим слоями, равном  $1/4$  длины падающего излучения  $\lambda_p$

в соответствии с соотношением  $nt = \frac{(2k+1)\lambda_p}{4}$ , где  $n$  — показатель преломления среды;  $t$  — расстояние между слоями;  $k$  — порядок резонансной моды.

Так, при  $n = 1$  (вакуум),  $k = 0$  и  $\lambda_p = 10$  мкм, что соответствует стандартной длине волны ИК излучения при проектировании микроболометров для области спектра 8...12 мкм,  $t = 2,5$  мкм.

Некоторое отличие полученных экспериментальных данных от рассчитанных значений может быть вызвано деформацией микромостиковой структуры, обусловленной присутствием в них некоторого уровня остаточных напряжений. Так, край структуры (область измерения зазора) расположен выше ее центральной части. Электронные микрофотографии деформированных микромостиковых элементов представлены на рис. 11.

На рис. 12 представлена зависимость сопротивления слоя оксида ванадия на поверхности поликорровой подложки от температуры при проведении измерения. Сопротивление слоя при температуре 25 °С составляло 155 Ом. Показано, что зависимость носит ярко выраженный экспоненциальный характер. Значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) при этом составляет примерно 1,7 %/°С. Значение ТКС образцов с более высоким сопротивлением (804 и 995 кОм) соот-

ветствует значению для образца с сопротивлением 155 кОм и также составляет примерно 1,7 %. Близкие значения ТКС для трех образцов по-видимому свидетельствует о стабильном химическом составе формируемых слоев. Несмотря на то, что существуют литературные данные, в соответствии с которыми значение ТКС слоев оксида ванадия может достигать 3 %/°С (при высоком значении удельного сопротивления оксида ванадия), такие значения не могут считаться оптимальными [4]. Это обусловлено большой невоспроизводимостью данных и повышенным выделением Джоулевой теплоты при высоком удельном сопротивлении чувствительного слоя. Таким образом, исследуемые слои пригодны для изготовления чувствительных слоев микроболометрических матриц.

На рис. 13 представлены электронные микрофотографии микромостиковых элементов, применяемых для измерения теплофизических характеристик. Результаты измерений трех образцов представлены в таблице. Показано, что тепловая постоянная времени для всех исследованных образцов приблизительно одинакова и соответствует аналогичному показателю для стандартных микроболометров с шагом пикселя 51 мкм. При этом тепловая постоянная времени может варьироваться существенным образом посредством регулирования длины балочных выводов.

## Заключение

Проведены комплексные исследования влияния конструктивных особенностей и технологических режимов изготовления микроболометрических матриц на их основные характеристики. Показано, что максимальная оптическая плотность полосы поглощения ИК излучения  $1000\text{ см}^{-1}$  микромостиковой структурой достигается при зазоре между элементом и подложкой 3,2 мкм и составляет примерно 0,5. Оптическая плотность в максимуме поглощения слоем нитрида кремния, на основе которого выполнена микромостиковая струк-

Результаты измерения теплофизических характеристик микромостиковых элементов

| №<br>пп | $R$ (25 °С), Ом | $G$ , Вт/К            | $C$ , Вт/К            | $\tau$ , мс |
|---------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| 1       | 180 723,0       | $5,68 \cdot 10^{-07}$ | $6,75 \cdot 10^{-09}$ | 11,9        |
| 2       | 154 091,0       | $6,17 \cdot 10^{-07}$ | $7,77 \cdot 10^{-09}$ | 12,6        |
| 3       | 144 045,0       | $6,29 \cdot 10^{-07}$ | $7,61 \cdot 10^{-09}$ | 12,1        |

тура, составляет 0,22. Разработана также воспроизводимая технология формирования тонких слоев оксида ванадия. Значение ТКС слоев практически не зависит от их толщины и составляет 1,7 %/°C. С применением разработанных технологических операций изготовлены тестовые микромостиковые элементы и измерены их теплофизические характеристики. Значение тепловой постоянной времени лежит в диапазоне 11,9...12,6 мс.

Полученные результаты позволяют обоснованно подходить к вопросам разработки технологии неохлаждаемых микроболометрических матриц.

#### Список литературы

1. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия / Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 328 с.
2. Жуков А. А., Четверов Ю. С., Кудрявцев П. Н., Бирюлин П. В., Здобников А. Е., Бабаевский П. Г., Обизхаев Д. Ю. Метод определения теплофизических характеристик неохлаждаемых полупроводниковых микроболометров // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 1. С. 24—27.
3. Niklaus F., Vieider C., Jakobsen H. MEMS-Based Uncooled Infrared Bolometer Arrays — A Review // Proc. SPIE., 2007. V. 6836. P. 68360-D1—68360-D15.
4. Han Y.-H., Choi T. H., Son C. S., Kim K. T. et al. Fabrication of a Surface Micromachined Uncooled Microbolometer Based on the  $V_2O_5/V/V_2O_5$  Sandwich Structure // Journal of the Korean Physical Society. December, 2004. Vol. 45, No. 6. P. 1655—1658.

S. A. Zhukova<sup>1</sup>, Head of the Complex, D. Yu. Obizhaev<sup>1</sup>, Deputy Chief of the Department, V. E. Turkov<sup>1</sup>, Head of the Centre, D. D. Riskin<sup>1</sup>, Leading Engineer, e-mail: dr182@mail.ru, P. N. Kudryavtsev<sup>2</sup>, Leading Engineer, e-mail: dr182@mail.ru, Yu. S. Chetverov<sup>2</sup>, Head of the Department

<sup>1</sup> Central Research Institute of Chemistry and Mechanics

<sup>2</sup> Central Research Institute "Cyclone"

## TECHNOLOGY FEATURES OF HIGH-SENSITIVE UNCOOLED MICROBOLOMETRIC ARRAYS MANUFACTURING

*Complex research of main microbridge structure characteristics was carried out. Also their dependence on technological parameters and construction features were investigated. Manufactured microbridge structures provide optical density of reflective line  $1000\text{ cm}^{-1}$  near 0,5, temperature coefficient of resistance of thermosensitive layer near 1,7 %, time constant between 11,9 ms and 12,6 ms.*

**Keywords:** uncooled microbolometric array, microbridge structure, silicon nitride, vanadium oxide, temperature coefficient of resistance, infrared resistance absorption, time constant

#### References

1. Smit A. Prikladnaya IK-spektroskopiya / Per. s angl. M.: Mir, 1982. 328 p.
2. Zhukov A. A., Chetverov Yu. S., Kudryavtsev P. N., Biryulin P. V., Zdobnikov A. E., Babaevskiy P. G., Obizhaev D. Yu. Metod opredeleniya teplofizicheskikh harakteristik neohlazhdaemih poluprovodnikovih mikrobolometrov // Nano- i mikrosistemnaya tehnika. 2006. N. 1. P. 24—27.

3. Niklaus F., Vieider C., Jakobsen H. MEMS-Based Uncooled Infrared Bolometer Arrays — A Review // Proc. SPIE. 2007. V. 6836. P. 68360-D1—68360-D15.
4. Han Y. H., Choi I. H., Son C. S., Kim K. T. et. al. Fabrication of a Surface Micromachined Uncooled Microbolometer Based on the  $V_2O_5/V/V_2O_5$  Sandwich Structure // Journal of the Korean Physical Society. December 2004. Vol. 45, No. 6. P. 1655—1658.

УДК 621.382.002

К. Н. Томош, инженер-исследователь, e-mail: Sky77781@mail.ru, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысококачественной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

## ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЧ И СВЧ РАЗРЯДОВ ПРИ СОЗДАНИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Поступила в редакцию 29.11.2013

*Представлена информация обзорного характера о применении плазмы ВЧ и СВЧ разряда в технологических процессах производства изделий электронной техники. Указаны области технического применения СВЧ разрядов и основные характеристики структур, формируемых под их воздействием.*

**Ключевые слова:** плазма, СВЧ разряд, ВЧ разряд, реактор, магнитное поле, травление

#### Введение

При производстве интегральных схем (ИС) и дискретных полупроводниковых приборов широко используют плазменные методы. Это процессы формирования активных и пассивных слоев, про-

цессы формирования топологии каждого из слоев изготавливаемого прибора или схемы.

Исторически сложилось так, что первым типом разряда для процесса "сухого травления" был разряд постоянного тока. Однако широкого приме-

ния в промышленности он не нашел ввиду одного своего существенного недостатка — распыления электродов.

Переход к высокочастотному (ВЧ) разряду (емкостному и индуктивному) значительно облегчил проблемы создания "сухих" методов формирования слоев и топологии активных и пассивных элементов ИС. В конце 70-х годов прошлого века появились первые публикации о создании технологических установок, использующих сверхвысокочастотный (СВЧ) разряд низкого давления. Это позволило значительно повысить степень интеграции твердотельных схем [5].

К настоящему времени на базе СВЧ техники разработано значительное число устройств, позволяющих реализовать большинство технологических процессов производства интегральных схем, а именно: плазменную очистку и активирование поверхности подложек; эпитаксию; окисление; литографические процессы, включающие сушку, задубливание, и удаление фоторезистивных слоев; все виды вакуумно-плазменного травления; осаждение тонких пленок, включающее плазмохимическое осаждение и катодное распыление; легирование (ионную имплантацию); термический отжиг полупроводниковых пластин; модификацию поверхности. В настоящей работе мы остановимся на анализе применения в промышленности только двух типов разрядов — ВЧ и СВЧ для реализации процессов травления [1].

### Физические характеристики ВЧ и СВЧ разрядов

Для ВЧ разрядов существуют различные способы их возбуждения, которые различают по признаку того, замыкаются ли силовые линии электрического поля в плазме или нет. К первой группе относятся индукционные разряды (рис. 1, б), когда разряд возбуждается подачей переменного тока в соленоид, внутри которого расположен реактор из диэлектрического материала. Силовые линии электрического поля представляют собой окружности, concentricные с витками соленоида, а магнит-

ное поле направлено вдоль оси соленоида. Такой разряд называют разрядом *H*-типа. Ко второй группе относятся разряды, в которых переменное напряжение подается на электроды, которые могут находиться в непосредственном контакте с плазмой (рис. 1, в) либо быть изолированными от нее (рис. 1, а). Такая система возбуждения по отношению к переменному напряжению аналогична конденсатору. Поэтому такие типы разрядов называются емкостными или разрядами *E*-типа.

Колеблющиеся в ВЧ поле электроны приобретают энергию, достаточную для ионизации и поддержания разряда. Катодная область как источник электронов фактически "отсутствует". Напряжения пробоя снижаются, а разряд может гореть и с электрически изолированными от плазмы электродами. Эти соображения обуславливают тот факт, что при прочих равных условиях ВЧ разряд устойчиво горит при более низких давлениях, чем разряд постоянного тока.

Рассмотрим теперь важную особенность ВЧ разрядов с внутренними электродами, которая связана с распределением электрических полей около электродов.

Поскольку электроды всегда находятся под отрицательным, относительно плазмы, потенциалом, то в приэлектродных слоях положительные ионы двигаются в ускоряющем поле, а электроны — в тормозящем поле. Изменение соотношения площадей электродов приводит к тому, что большая часть питающего напряжения начинает падать на электроде с меньшим размером. При этом потенциал большего электрода меняется слабо и практически равен плавающему. Физически это связано с тем, что для поддержания тока в цепи, поступающего на электрод малой площади, достаточно малых изменений потенциала большего электрода. Малый электрод в положительный полупериод питающего напряжения находится под гораздо более отрицательным потенциалом относительно плазмы, чем большой, т. е. подвергается интенсивной бомбардировке положительными ионами, энергия которых зависит как от приложенного напряжения, так и от соотношения площадей электродов. Это явление принято называть самосмещением [3].

Существование нескольких способов возбуждения ВЧ разряда обуславливает существование нескольких типов конструкций плазмохимических ВЧ реакторов, наиболее часто применяемых для плазменных процессов травления различных материалов (рис. 2).

Первыми были созданы и использовались реакторы диодного

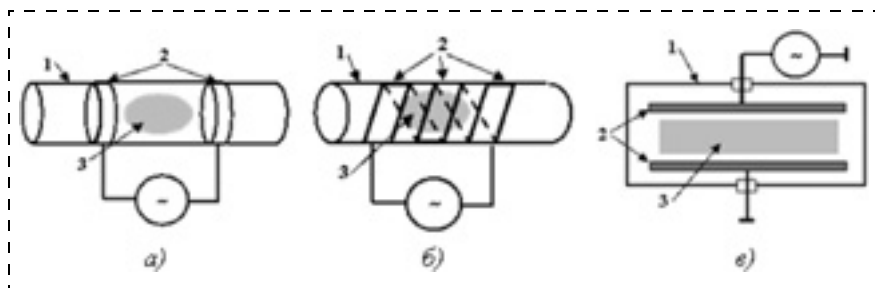


Рис. 1. Способы возбуждения ВЧ разряда:

а — емкостное возбуждение с внешними электродами; б — индукционное возбуждение с внешними электродами; в — емкостное возбуждение с внутренними электродами; 1 — корпус реактора; 2 — электроды; 3 — плазма

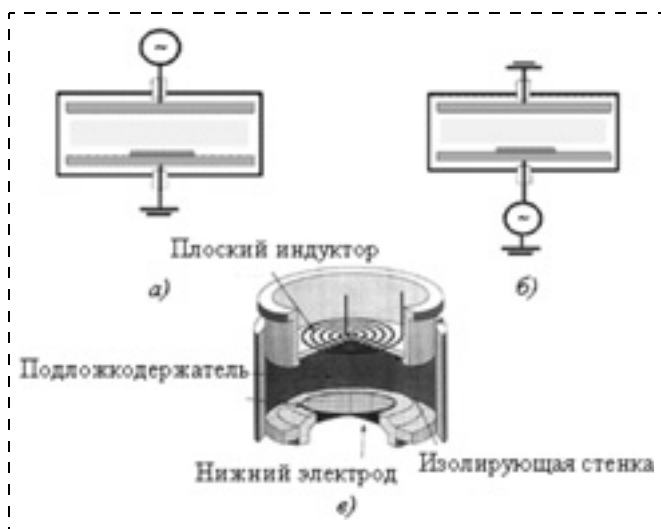


Рис. 2. Некоторые типы плазмохимических реакторов с использованием плазмы ВЧ:

а и б — диодные реакторы с внутренними электродами и емкостным возбуждением разряда; в — безэлектродный реактор с индукционным возбуждением разряда

типа с плоскими параллельными электродами, расположенными внутри рабочей камеры. В конструкции, показанной на рис. 2, а, обрабатываемый материал располагается на заземленном электроде и находится под плавающим потенциалом относительно плазмы. Соответственно, энергия ионов, бомбардирующих образец, здесь невелика (10...30 эВ), и процессами физического распыления материала можно пренебречь. Такой реактор получил следующие названия: реактор объемного травления (*bulk etching reactor*); реактор плазменного травления (*plasma etching (PE) reactor*) или реактор с анодной связью.

При расположении пластины на электроде (рис. 2, б), подсоединенном к ВЧ генератору, значение отрицательного самосмещения на электроде достигает нескольких сотен вольт, так что травление материала обеспечивается одновременно химическим и физическим механизмами. Такая модификация носит название реактора реактивного ионного травления (*reactive ion etching (RIE) reactor*) или реактора с катодной связью. Основными недостатками диодных реакторов являются загрязнение рабочей камеры продуктами распыления и/или взаимодействия плазмы с электродами, а также невозможность независимой регулировки плотности потока и энергии ионов, бомбардирующих обрабатываемый материал. Последнее является особенно важным, так как для минимизации радиационных повреждений поверхности и в то же время для поддержания высокой скорости процесса ионного или реактивно-ионного травления целесообразно проводить процесс при высокой плотности потока ионов, но при минимально допустимом значении отрицательного смещения на подложке. В то же вре-

мя в RIE реакторе увеличение вкладываемой мощности приводит к одновременному усилению обоих факторов за счет роста скорости ионизации, концентрации электронов и ионов в объеме плазмы и значения отрицательного самосмещения на электроде, подсоединенном к ВЧ генератору.

Указанные выше недостатки частично компенсируются в диодных реакторах с наложением постоянного магнитного поля напряженностью 50...200 Гс параллельно электроду, на котором располагается обрабатываемый материал. В англоязычной литературе такие системы получили название MERIE (*magnetically enhanced reactive ion etching*). Магнитное поле вызывает "закручивание" в спираль траектории движения электрона и тем самым увеличивает частоту ионизирующего столкновения и снижает среднюю энергию электронов. Кроме того, диффузия ионов в направлении, перпендикулярном магнитному полю, переходит из амбиполярного режима в свободный, при этом снижается мощность, рассеиваемая на стенках разрядной камеры. В результате, при данном значении вкладываемой мощности и давления газа системы MERIE обеспечивают более высокие концентрации и плотности потоков заряженных частиц на обрабатываемую поверхность, но более низкие значения отрицательного самосмещения на незаземленном электроде, где располагается обрабатываемый материал.

Основным недостатком систем MERIE является существенная деформация пространственных распределений концентраций частиц в реакторе, в результате чего возникает проблема равномерности обработки образцов большой площади.

От указанных выше недостатков практически свободны безэлектродные источники "плотной" плазмы (*high density plasma sources*), позволяющие работать в более низком диапазоне давлений 0,1...10 Па ( $\sim 10^{-2}$  Торр) и обеспечивающие концентрации заряженных частиц на уровне  $10^{11}...10^{12}$  см $^{-3}$ . Типичными представителями здесь являются безэлектродные ВЧ реакторы с индукционным возбуждением разряда ICP (*inductively coupled plasma reactor*) и реакторы, работающие на основе явления электронного циклотронного резонанса (ЭЦР).

На рис. 3, в представлен реактор ICP с плоским спиралевидным индуктором, в настоящее время данный тип реактора является одним из наиболее распространенных в технологии плазменного травления. Индуктор соединен с ВЧ генератором, но отделен от зоны разряда слоем диэлектрического материала, который имеет высокую диэлектрическую проницаемость (для обеспечения эффективной, с минимальными потерями, передачи энергии ВЧ поля от индуктора в рабочую зону) и термостойкость. Этим требованиям хорошо удовлетворяет кварцевое стекло. Обрабатываемый материал находится на проводящем подложкодержателе в

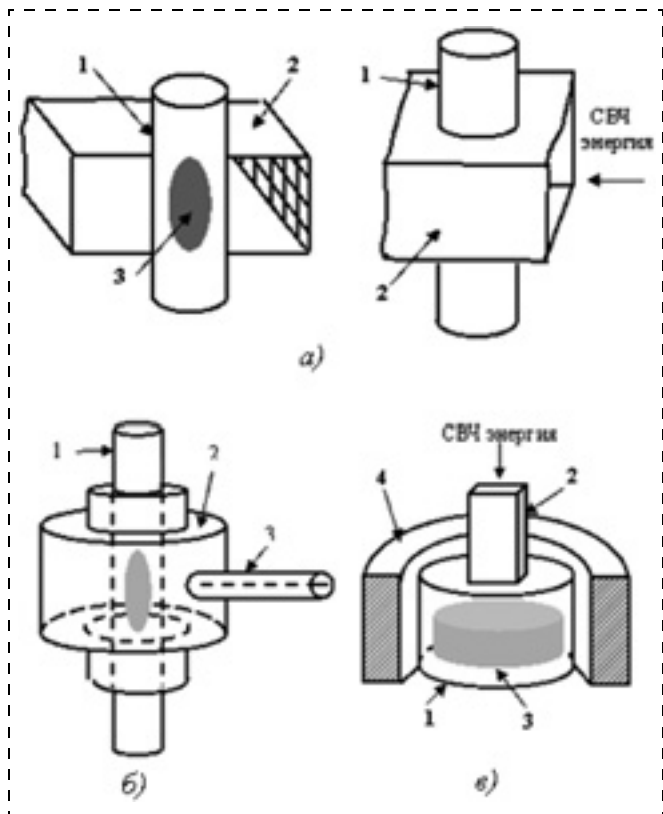


Рис. 3. Способы возбуждения СВЧ разряда:

*a* — резонатор — отрезок прямоугольного волновода; 1 — корпус реактора; 2 — волновод; 3 — плазма; *б* — резонатор цилиндрической формы; 1 — корпус реактора; 2 — резонатор; 3 — ввод СВЧ энергии (антенна); *в* — цилиндрический резонатор-реактор; 1 — корпус реактора; 2 — волновод; 3 — плазма; 4 — соленоид

нижней части реактора, на подложкодержатель подается отрицательное смещение от источника постоянного напряжения или от другого ВЧ генератора. В отсутствие смещения на подложкодержателе энергия ионов, бомбардирующих подложку, определяется их ускорением в двойном электрическом слое на границе плазма — поверхность. Такая система допускает возможность независимой регулировки плотности потока ионов (при варьировании мощности питающего генератора) и их энергии при взаимодействии с поверхностью (при варьировании значения отрицательного смещения на подложкодержателе) [6].

В СВЧ диапазоне, учитывая специфику распространения электромагнитных волн, для возбуждения разрядов используют те или иные виды колебательных контуров, которые называют резонаторами. Резонатором может быть отрезок прямоугольного волновода, перпендикулярно широким стенкам которого вставлен реактор из материала, имеющего низкие диэлектрические потери на частоте возбуждения (рис. 3, *a*), бывают также резонаторы цилиндрической формы (рис. 3, *б*). По существу, цилиндрическим резонатором может быть и сам реактор, как это изображено на рис. 3, *в*.

Здесь энергия в реактор поступает из прямоугольного волновода, отделенного от реактора вакуумноплотным окном из специального диэлектрика. Для поддержания разряда при низких давлениях резонатор помещают в магнитное поле, создаваемое соленоидом [2].

### Электронный циклотронный резонанс и устройства на его основе

При уменьшении давления плазмообразующего газа эффективность отбора энергии от поля начинает падать, так как уменьшается частота столкновений электронов с "тяжелыми" частицами. Поэтому для поддержания плазмы в области низких давлений необходимо увеличивать амплитуду напряженности электрического поля, что создает дополнительные сложности. В то же время в технологии плазмохимического травления в микроэлектронике использование низких давлений является предпочтительным для чистоты процесса и достижения ряда технологических показателей (селективности, анизотропии, равномерности травления), обеспечивающих создание приборов высокой степени интеграции.

Как уже отмечалось, при движении электрона в переменном поле при отсутствии столкновений электрон не отбирает энергию от поля. Работа, совершаемая полем в положительный полупериод, в точности равна работе в отрицательный полупериод, при этом максимальное смещение (путь) электрона в первый полупериод равно смещению во втором полупериоде, но в обратном направлении. Если же создать условия, когда в один из полупериодов электрон будет проходить путь больший, чем в другой, то от периода к периоду энергия электрона будет возрастать. Для этого накладывается магнитное поле, перпендикулярное электрическому. В этом случае на электрон будет действовать сила Лоренца, направление которой перпендикулярно вектору скорости электрона и индукции магнитного поля. Электрон начнет двигаться не только в направлении, задаваемом электрическим полем, но и в перпендикулярном ему. Траектория движения электрона в таких условиях зависит от соотношения между частотой электрического поля и циклотронной (ларморовской) частотой, которая определяется как  $\omega = eB/m_e$ , где  $e$  — заряд электрона;  $B$  — индукция магнитного поля;  $m_e$  — масса электрона. По мере приближения частоты поля к циклотронной частоте (к так называемому электронному циклотронному резонансу) путь, проходимый электроном в электрическом поле (вдоль оси  $X$ ), все более возрастает, радиус его траектории увеличивается во времени, и, в среднем, от периода к периоду растет энергия электрона. Для магнитного поля 875 Гс значение  $\omega_c = 2,45$  ГГц,

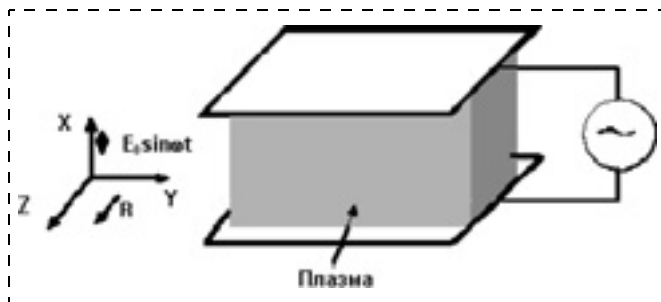


Рис. 4. Схема возбуждения разряда в условиях ЭЦР

при этом, если для возбуждения плазмы используется электрическое поле аналогичной частоты, т. е.  $\omega = \omega_c = 2,45$  ГГц, имеет место явление электронного циклотронного резонанса (ЭЦР).

На рис. 4 представлена схема возбуждения плазмы в скрещенных **E** и **H** полях.

Свойства плазмы ЭЦР-разряда позволяют использовать ее в диапазоне давлений 1,00...0,01 Па ( $10^{-3}$ ... $10^{-5}$  Торр), достигая при этом высоких степеней ионизации (до 10 %) и диссоциации (до 100 %) плазмообразующего газа. Высокая эффективность поглощения энергии электронами от электрического поля приводит к тому, что типичные значения электронной температуры в ЭЦР-плазме (~5 эВ), что выше по сравнению с обычным ВЧ разрядом.

В то же время энергия ионов, бомбардирующих обрабатываемый материал, при безэлектродном способе возбуждения разряда составляет 10...30 эВ и ее можно регулировать относительно независимо при подаче отрицательного смещения на подложкодержатель. Это делает ЭЦР-плазму привлекательным инструментом для наноразмерного анизотропного травления материалов [4].

Существует несколько разновидностей систем возбуждения ЭЦР-плазмы, которые нашли отражение в конструктивных особенностях современных плазмохимических реакторов. Наиболее распространенные из этих систем представлены на рис. 5. Вариант, показанный на рис. 5, а, представляет собой реактор с удаленной зоной резонанса, которая находится вне рабочей камеры реактора, где располагается обрабатываемый материал. Расстояние от зоны резонанса до подложкодержателя может достигать 50 см. По направлению от зоны резонанса к подложкодержателю происходит снижение

плотности потока ионов и увеличение их энергии. В тех случаях, когда такое изменение параметров плазмы является нежелательным, используются реакторы системы, показанной на рис. 5, б, в которых зона резонанса находится в пределах рабочей камеры, на расстоянии 10...20 см от поверхности обрабатываемого материала [3].

Конструкции ЭЦР-реакторов, приведенные на рис. 5, а и б, являются базовыми, а варианты на рис. 5, в и г представляют собой их модификации, выполненные в целях оптимизации результата обработки. Так, например, при обработке материалов большой площади (например кремниевых пластин диаметром 200 мм и более) возникает проблема равномерности процесса травления по площади. Одним из путей решения проблемы является создание условий, при которых радиальные (в плоскости, параллельной обрабатываемому материалу) распределения заряженных частиц являются как можно более плоскими, что обеспечивает равные потоки частиц на поверхность у центра и края обрабатываемого материала. В варианте на рис. 5, в это достигается применением системы из 6—12 линейных постоянных магнитов, которые располагаются вокруг рабочей камеры реактора с чередованием полярности. В реакторе, показанном на рис. 5, г, зона резонанса максимально приближена

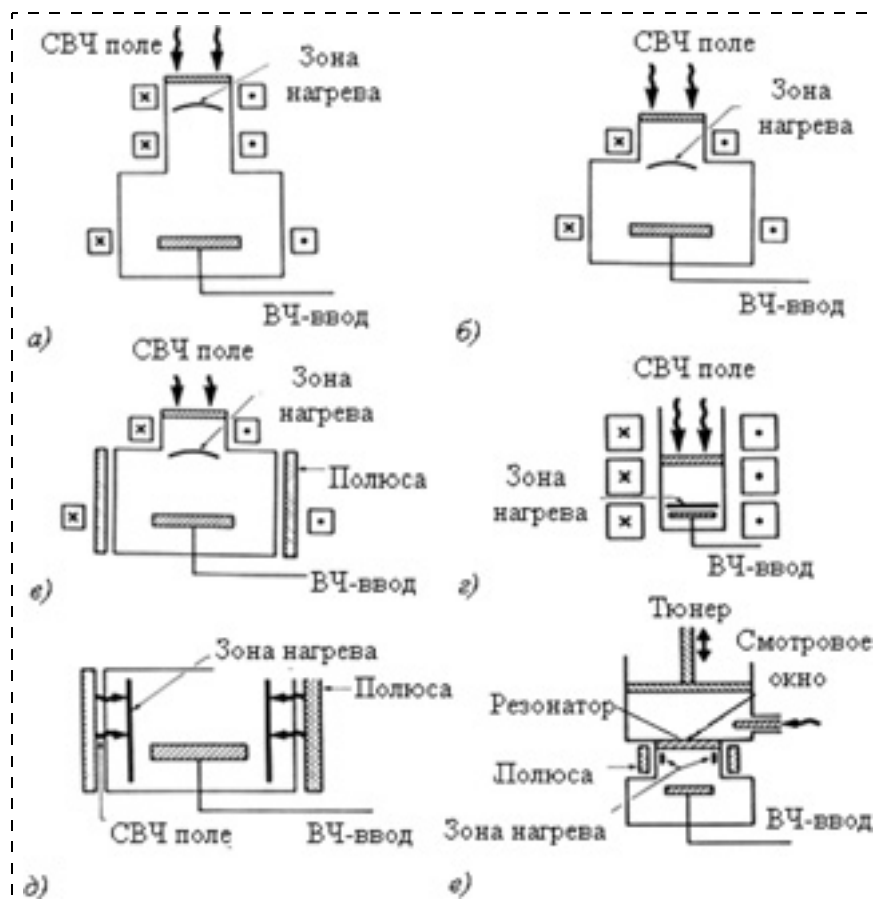


Рис. 5. Некоторые варианты систем возбуждения ЭЦР-плазмы

к подложкодержателю (*close-coupled system*), поэтому равномерность обработки определяется радиальной однородностью самой зоны резонанса. Последнее достигается определенным конфигурированием основной системы магнитов, которые используются для создания условий ЭЦР. И, наконец, варианты, представленные на рис. 5, *д* и *е*, представляют реакторы с поперечным вводом микроволновой энергии, где создается несколько зон резонанса, которые располагаются вокруг обрабатываемого материала. Такие системы получили название распределенных ЭЦР-систем (*distributed ECR — DECR*). В заключение отметим, что все рассмотренные типы ЭЦР-реакторов сохраняют преимущества безэлектродных ВЧ реакторов, т. е. допускают возможность относительно независимой регулировки плотности потока и энергии ионов, бомбардирующих обрабатываемую поверхность, но обеспечивают генерацию разряда при низких рабочих давлениях, вплоть до  $10^{-5}$  Па [3].

## Заключение

Проведенный краткий анализ основных типов разрядов, используемых для формирования топологий твердотельных электронных приборов, показывает, что с увеличением степени интеграции приборов предпочтительным являются разряды, существующие в реакционных камерах при пониженных ( $\sim 10^{-2}$  Па) и низких ( $\sim 10^{-4}$  Па) рабочих давлениях.

Для проведения любого плазменного технологического процесса (независимо от типа разряда) необходимы воспроизводимость плазменных параметров и возможность управления ими, а для этого необходимы обратные связи от плазмы к устройствам, изменяющим внешние параметры техно-

логического процесса (давление, расходы газовых компонентов, выходную мощность генератора, плотность потоков активных компонентов плазмы, температуру подложки и т. д.). Поэтому для диагностики плазмы широко используют как контактные (зонды Лэнгмюра), так и бесконтактные (оптическая эмиссионная спектроскопия) методы. При разработке технологических процессов широкое распространение получила и масс-спектрометрия плазмы, позволяющая для травления конкретного материала правильно выбрать основные параметры плазмы, откорректировать скорость и селективность процесса травления.

Поскольку СВЧ разряды низкого давления перекрывают все диапазоны условий существования и характеристики всех типов разрядов, то их использование в промышленности и научных исследованиях предпочтительнее [1].

## Список литературы

1. Достанко А. П., Бордусов С. В. Плазменные СВЧ технологии в процессах инженерии поверхности // ФИП. 2003. Том. 1. № 1. 2003. С. 4—7.
2. Бордусов С. В. Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники. Минск: Бестпринт, 2002. 452 с.
3. Ефремов А. М., Светцов В. И., Рыбкин В. В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии: учеб. пособие. Иваново: Изд. Иван. гос. хим.-технол. ун-та, 2006. 257 с.
4. Айнспрук Н., Браун Д. Плазменная технология в производстве СБИС. М.: Мир, 1987. 420 с.
5. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
6. Соколов И. В. Магнетроны для СВЧ нагрева и источники СВЧ энергии // Электронная промышленность. 1996. № 3. С. 4—9.
7. Орликовский А. А. Плазменные процессы в микро- и нанoeлектронике. Часть 1. Реактивное ионное травление // Микроэлектроника. 1999. Т. 28, № 5. С. 344—362.
8. Данилин Б. С., Киреев В. Ю., Кузнецов В. И. Рабочие газы и их влияние на параметры процесса травления // Электронная техника. 1982. Сер. 6, № 4. С. 3—10.

K. N. Tomosh, Engineer Researcher, Institut Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS,  
e-mail: Sky77781@mail.ru

## CHARACTERISTICS OF MICROWAVE AND HIGH FREQUENCY WHILE FABRICATING SEMICONDUCTOR DEVICES

*Microwave plasma discharge applications in manufacturing of microelectronic products are reviewed. Some characteristics and material treatment conditions with microwave discharge technologies are considered.*

**Keywords:** *plasma, microwave, high frequency, reactor, magnetic field, etching*

## References

1. Dostanko A. P., Bordusov S. V. Plazmennye SVCh tehnologii v processah inzhenerii poverhnosti // FIP. 2003. V. 1, N. 1. 2003. P. 4—7.
2. Bordusov S. V. Plazmennye SVCh-tehnologii v proizvodstve izdelij jelektronnoj tehniki. Minsk: Bestprint, 2002. 452 p.
3. Efremov A. M., Svetcov V. I., Rybkin V. V. Vakuumno-plazmennye processy i tehnologii: uchebnoe posobie. Ivanovo: Ivan.gos.him.-tehnol. un-t, 2006. 257 p.
4. Ajnspruk N., Braun D. Plazmennaja tehnologija v proizvodstve SBIS. M.: Mir, 1987. 420 p.

5. Ivanovskij G. F., Petrov V. I. Ionno-plazmennaja obrabotka materialov. M.: Radio i svjaz', 1986. 232 p.
6. Sokolov I. V. Magnetrony dlja SVCh nagreva i istochniki SVCh jenerгии // Jelektronnaja promyshlennost. 1996. N. 3. P. 4—9.
7. Orlikovskij A. A. Plazmennye processy v mikro- i nanojelektronike. Chast' 1. Reaktivnoe ionnoe travlenie // Mikrojelektronika. 1999. V. 28, N. 5. P. 344—362.
8. Danilin B. S., Kireev V. Ju., Kuznecov V. I. Rabochie gazy i ih vlijanie na parametry processa travlenija // Jelektronnaja tehnika. 1982. Ser. 6, N. 4. P. 3—10.

# КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ, ВЫСТАВКИ

## CONFERENCES, SEMINARS, EXHIBITIONS

УДК 623.3

**Л. С. Раткин**, канд. техн. наук, заместитель генерального директора,  
ООО "АРГМ", г. Москва, e-mail: rathkeen@bk.ru

### К ТРИДЦАТИЛЕТИЮ ОТДЕЛЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Поступила в редакцию 12.03.2014

*Тридцатилетию Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук была приурочена серия конференций, проведенных в Национальном исследовательском центре (НИЦ) "Курчатовский институт". Особое внимание уделялось фундаментальным и прикладным аспектам разработки нано- и микросистемной техники, лабораторным исследованиям и промышленному освоению новых образцов наноиндустриальной продукции, а также высокой степени интеграции вузовской науки с инвестиционными компаниями.*

**Ключевые слова:** Российская академия наук (РАН), Национальный исследовательский центр (НИЦ) "Курчатовский институт", МГУ им. М. В. Ломоносова, нанотехнологии, наноструктуры, наночастицы, нанотрубки, наномедицина, бионаноматериалы, наноматериалы

Доклад члена-корреспондента РАН Е. А. Гудилина (Факультет наук о материалах, Химический факультет, НОЦ по нанотехнологиям МГУ им. М. В. Ломоносова) был посвящен нанотехнологическим исследованиям в сфере наук о материалах. Рассматривались нано- и микроструктурированные функциональные материалы, в частности, наноматериалы, функциональные свойства которых определяются наноуровнем их структуры 1...100 нм. Проявлением фундаментальной особенности наноматериалов является наноструктурирование — наличие развитой поверхности с особыми свойствами. Среди представленных объектов изучения — супрамолекулярные материалы, нанодисперсные (0D) материалы (квантовые точки, нанокристаллы, нанопорошки), наноструктурированные планарные 2D-материалы (самособирающиеся монослои, нанопечатная литография, напыления и напыленки), нанокомпозиты (наночастицы в полимерной, металлической и керамической матрице, наноструктурированные матрицы), наноструктурированные (1D) материалы (нанопроволоки, нанотрубки, наноагрегаты и нановолокна) и объемные (3D) наноструктурированные материалы (нанокерамика, металлы и сплавы с ультразернистой структурой).

Наблюдаемый в мире рост интереса к фундаментальным и прикладным разработкам в сфере нано- и микросистемной техники во многом обусловлен возможностями миниатюризации технических устройств со значительной экономией финансово-экономических ресурсов и появлением принципиально новых методов диагностики наноразмерных объектов, в том числе туннельной и атомно-силовой микроскопии и современной электронной микроскопии. Также развитию мировой наноиндустрии во многом содействует наличие специфических оптических, электрических, магнитных и прочих свойств наноматериалов, включая специфическое взаимодействие с жи-

выми системами (биомиметика), высокую реакционную способность, самоорганизацию и слабые дальнodelействующие связи и квантовые и туннельные эффекты.

В докладе были представлены принципиальные различия технологий "снизу—вверх" (при создании наноструктур отдельные атомы и молекулы выстраиваются в упорядоченную структуру) и "сверху—вниз" (обработка макромасштабного объекта или структуры с постепенным уменьшением их размеров вплоть до получения изделий с нанометровыми параметрами). Рассматривались особенности реализации методов диспергирования, химической гомогенизации и "мягкой" химии (криохимическая технология, пиролиз аэрозолей, соосаждение, сольвотермальная обработка и золь-гель метод). Исследуя коллоидные квантовые точки, следует обращать внимание на требования к стабилизатору (в т. ч. прочную связь с поверхностью и объемный "хвост") и к наночастицам (пассивация оборванных связей на поверхности, отсутствие агломерации и узкое распределение по размерам), учитывая, что "зародыш" представляет собой баланс изменения "объемной" и "поверхностной" свободной энергии. При химическом синтезе квантовых точек синтез наночастиц CdTe проводят в режиме пересыщения, а синтез гетероструктур "ядро—оболочка" — методом наращивания на ядре CdTe слоя CdSe. Золь-гель метод предусматривает раствор солей металлов с образованием хелатных комплексов металлов с многофункциональными органическими кислотами, реакцию полимеризации с многоатомными спиртами и термическое разложение с получением материалов. При росте вискозиса (например, Si/Au) механизм "пар—жидкость—кристалл" предполагает смачивание подложки каплей, при этом растворенное вещество капли не должно захватываться кристаллом в больших концентрациях и не должно реагировать с газовой фазой, но должно растворять компоненты, необходимые для роста

кристалла. Среди физических методов осаждения особо отмечены методы магнетронного и лазерного напыления и метод молекулярных пучков, что, в частности, предполагает ограниченные возможности масштабирования технологии и непрерывного осуществления процесса, дороговизну и сложность оборудования, высокие требования по достижению вакуума, пересыщение, плохую ростовую морфологию в ряде случаев и излишний расход энергии.

В докладе детально рассматривались особенности реализации самосборки и самоорганизации. Отмечалось, что самосборка — это процесс создания упорядоченной надмолекулярной среды или структуры с участием в практически неизменном виде элементов (компонентов) базовой (исходной) структуры, которые аддитивно собирают (т. е. составляют) сложную структуру из частей. В отличие от самосборки, самоорганизация — это механизм создания сложных структур, процессов и "шаблонов" на более высоком иерархическом уровне, чем наблюдаемый в исходной системе. Это достигается за счет многовариантных и многочисленных взаимодействий и компонентов на низких уровнях с локальными законами взаимодействия, отличными от законов поведения самоорганизующейся системы. При этом характерно ограничение степеней свободы на ряде уровней организации системы, а также различие по масштабу (в количественном выражении — по порядку) энергий взаимодействия. В качестве примера были продемонстрированы цепочечные наноструктуры на основе вируса табачной мозаики и микрофотографии сформированной вокруг вируса нанотрубки  $\text{SiO}_2$ .

Мезопористые оксиды характеризуются, в частности, химической изоляцией наночастиц, созданием анизотропных систем, однородностью распределения пор по размеру, а также изолированностью и упорядоченностью каналов пор с варьируемым размером от 1 до 10 нм. В докладе был представлен обзор разработок в сфере углеродных нанотрубок, нанотубуленов и нановискеров, литий—воздушных аккумуляторов, микропечати, фотоники, мембранных технологий, наноэлектроники и информационных технологий, каталитических нанокомпозитов, нанокатализа и сенсорики, квантовых точек, тетраподов, бионаноматериалов, нанобиокомъюгатов и наномедицины. В частности, НИЦ "Курчатовский институт" совместно с МГУ им. М. В. Ломоносова и Московским научно-исследовательским онкологическим институтом им. П. А. Герцена (группа члена-кор. РАМН профессора И. В. Решетова) разработали препарат, способный проникать в клетки без заметного некроза тканей в условиях темноты. Установлен факт корреляции активности препарата со степенью его проникновения в клетки и уровнем освещенности поверхности, что подтверждает протекание фотохимических реакций внутри клеток. В завершение выступления член-кор. РАН Е. А. Гудилин выразил благодарность авторам, результаты работ которых были использованы в докладе: Д. А. Семененко, А. Е. Чекановой, Д. М. Иткис, А. В. Лукашину, К. С. Напольскому, А. В. Григорьевой, Р. Б. Васильеву и А. А. Елисееву (Факультет наук о материалах МГУ им. М. В. Ломоносова, профессору Р. Тенне (Weizmann Institute, Израиль), А. С. Синицкому (Rice University, США) и другим коллегам.

Нanomатериалы для накопления и передачи энергии рассматривались в сообщении члена-кор. РАН Е. В. Антипова (Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова). Особое внимание уделялось литиевым аккумуляторам и высокотемпературным сверхпроводникам. Основным открытием стала разработка 1980 года ученых К. Mizushima, P. C. Jones, P. J. Wiseman и J. B. Goodenough (Inorganic Chemistry Laboratory, South Park Road, Oxford, OX1 3QR) [1]. Для ее реализации в промышленное изделие потребо-

валось 10 лет. Коммерциализацию технологии с 1990 года проводила корпорация "Sony". К катодному материалу был предъявлен ряд дополнительных требований, в том числе наличие иона переходного металла с высоким Redox-потенциалом, интеркаляция/деинтеркаляция большого количества лития, повышенная электронная проводимость с быстрой диффузией ионов  $\text{Li}$ , обратимость процессов интеркаляции/деинтеркаляции  $\text{Li}$  (минимальные структурные изменения) и электрохимическая стабильность на всем интервале циклирования. Выбор лития был обусловлен более широким "электролитным окном" с высокой энергоемкостью, высокой электропроводностью электролита, его небольшим размером и механической стабильностью. Для разработки также пригодны кристаллохимические свойства катиона лития: ионный радиус и координационное окружение составляют 0,74 Å (октаэдр) — 0,59 Å (тетраэдр). При разработке было уделено повышенное внимание увеличению рабочего напряжения и скорости диффузии ионов лития, наращиванию мощности и влиянию катионного разупорядочения, росту электропроводности и улучшению транспортных характеристик, оптимизации морфологии структуры и наращиванию скорости диффузии  $\text{Li}^+$ . В докладе рассматривались различные аспекты экспериментального обнаружения диффузии лития, создания наноразмерных покрытий для быстрого транспорта  $\text{Li}$ , конструирования нового высоковольтного катодного материала, измерения циклической вольт-амперной характеристики, дифракционных исследований *Ex-situ*, измерения параметров ячейки структурных изменений при экстракции  $\text{Li}$ . Подчеркивалась важная роль нанокомпозитов в создании нового поколения накопителей энергии. При анализе разработок в сфере высокотемпературных сверхпроводников рассматривались структурные критерии сверхпроводимости в слоистых структурах, структуры когерентного срастания и наноразмерные структуры.

В выступлении академика РАН М. П. Кирпичникова (Биологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова) были затронуты вопросы nanoиндустриального развития в сфере биотехнологий и биоэкономики. Среди глобальных современных проблем были особо отмечены процессы изменения климата, оскудения биологического разнообразия, роста численности человечества, загрязнения окружающей среды и истощения жизненно важных ресурсов. Также необходимо решение вопросов, связанных с обеспечением экологической и промышленной безопасности и сохранением биоразнообразия, фармакологией и медициной, продовольственным обеспечением и развитием энергетической и производственной инфраструктур. Нанотехнологии обеспечат профилактический и персонализированный характер медицинских исследований. Например, если в 2001 году стоимость расшифровки генома одного человека составляла 3 млрд долл. при сроке в 10 лет, то создание нового поколения устройств и систем на наноэлементной базе позволили сократить ее до 200 млн долл. (срок 1 год) в 2007 году, и до 2 млн долл. (срок 3 мес.) в 2008 году. В настоящее время необходимо решение задачи по достижению секвенирования генома за 1 день при стоимости процедуры в 1 тыс. долл. Достижение этой цели позволит не только повысить уровень доступности данной операции для разных социальных слоев (возможна разработка системы дотаций и специальных программ), но и сформировать банк данных о результатах расшифровки геномов, проанализировать индивидуальные особенности геномов и сформировать программы поиска новых мишеней.

Вследствие всевозрастающего антропогенного воздействия на биосферу наблюдаются опасные последствия, угрожающие экологической безопасности и биоразнообразию, в том числе, глобальные биосферные процессы, оску-

дение биологического разнообразия, рост населения Земли, загрязнение окружающей среды, истощение жизненно важных ресурсов. Демографический прогноз развития человечества свидетельствует о возрастании в обществе доли пожилых людей и существенном изменении количественного соотношения между численностью населения различных континентов и стран. На фоне повсеместного снижения рождаемости и смертности в результате дальнейшей урбанизации и повышения уровня жизни населения ожидается стабилизация численности народонаселения в мире на уровне 10–12 млрд человек уже в течение XXI века. Прогнозируемые изменения предполагают увеличение потребления человеческих ресурсов и, как следствие, проблемы с обеспечением продовольствием, дефицитом пресной воды и уменьшением объемов невозобновляемых ресурсов. Согласно экспертным оценкам, приведенным в докладе, общий объем земельного фонда в мире составляет 13054,4 млн га. Структура мирового земельного фонда такова: земли сельскохозяйственного назначения составляют 4846,1 млн га (37,1 %), леса — 4138,0 (31,7 %) и прочие земли — 4061,3 млн га (31,2 %). Земли сельскохозяйственного назначения включают пашни — 1345,3 млн га (10,3 %), земли для многолетних культур — 105,5 млн га (0,8 %) и пастбища — 3395,3 млн га (26,0 %).

Как видно из представленной структуры мирового земельного фонда, вопрос о том, возможно ли на Земле обеспечение продовольствием 9 млрд человек через 30 лет, является одним из важнейших. Мировая экономика еще не вышла из состояния посткризисной рецессии, финансовые возможности у разных стран и регионов различны, но необходимо оперативное рассмотрение и решение проблем, связанных с расширением сельхозугодий. В случае возможности применения для этой цели нового поколения агротехнологий необходимо выяснить, каковы побочные последствия от их применения, и если они есть, насколько можно эти последствия минимизировать. Соответственно, перед мировой наноиндустрией, как одной из инновационных экономических отраслей, ставится задача комплексного развития агротехники и сельскохозяйственных технологий, и одна из ключевых ролей в ее решении отводится нанотехнологиям.

В докладе была представлена динамика применения минеральных удобрений и пестицидов в мире с 1950 по 2000 гг., а также данные о ежегодном производстве зерна в мире и изменения количества зерна на одного человека за указанный период. Сопоставление этих данных свидетельствует о том, что практически каждая агротехнология наряду с позитивными имеет также негативные стороны, проявляющиеся при ее чрезмерном использовании. Рост производительности сельскохозяйственной продукции на ограниченной территории также имеет предел, и во многих странах и мировых регионах он уже достигнут. Вместе с тем, производительность в АПК непрерывно увеличивается благодаря применению более совершенных технологий — получению продуктов так называемой "зеленой революции". Эта отрасль является инвестиционно-привлекательной и конкурентоспособной, но у России традиционно очень сильные конкуренты в этой сфере, и для увеличения объемов производства высокотехнологичной агропродукции с применением нанотехнологий инвестиционных ресурсов ОАО "Роснано" может оказаться недостаточным. Привлечение же капиталовложений со стороны предприятий малого и среднего бизнеса предполагает внесение изменений в нормативно-правовую базу, улучшающую качество инвестиционного климата в РФ. Известно, что ряд правовых пробелов и противоречий в законодательстве России снижают инвестиционную привлекательность инновационных проектов, в частности, в

нанотехнологической сфере, и повышают уровень рисков для потенциальных инвесторов.

С точки зрения агротехнологов, на Земле уже задействована треть суши для выращивания сельскохозяйственной продукции. Дальнейшее расширение сельхозугодий нецелесообразно и труднореализуемо. В сложившихся условиях перед мировой наноиндустрией возникает ряд вопросов, в частности, как оправдать возлагаемое на отрасль доверие и каким образом можно повысить урожайность и сократить издержки при применении новой нанопродукции в АПК? Приведенная в докладе динамика трансгенных посевов кукурузы, сои, хлопка и рапса в мире также характеризует неустойчивый характер отраслевого и регионального развития в непростых финансово-экономических условиях. Это стимулирует экспертов к оценке состояния отрасли и уточнению ряда вопросов, в том числе, на какой период человечеству хватит разведанных минеральных ресурсов, какова доля вторичного использования ресурсов и на какой срок на Земле хватит энергоресурсов?

В докладе было отмечено, что вопросы биотехнологии и биоэкономики имеют к нанотехнологиям столь же непосредственное отношение, как и вопросы энергообеспечения и развития промышленной инфраструктуры. Динамика мирового потребления первичной энергии за последнее столетие, ослабевая и усиливаясь в определенные периоды, в целом демонстрирует непрерывный рост. Учитывая характер циркуляции углекислого газа при использовании разных видов топлива (например, незамкнутый цикл при использовании нефтяного топлива, и замкнутый цикл при поглощении  $\text{CO}_2$  в производстве топлива из водорослей), возможно рассмотрение движущих сил, регулирующих промышленное развитие и стимулирующих инвесторов к капиталовложениям в инновационные нанотехнологические проекты. Для предприятий малого и среднего бизнеса очевидны социальные выгоды от участия в нанотехнологических проектах: повышение уровня занятости, улучшение условий соцразвития и повышение качества жизни. Также видна универсальность использования капиталовложений в наноиндустриальные проекты в различных сферах: транспорт, энергетика, информационные технологии, промышленность. Экологическая составляющая нанотехнологических проектов обусловлена высоким уровнем охраны окружающей среды с выявлением источников, оказывающих влияние на климат, деградацию земель и снижение выбросов парниковых газов. Энергетическая безопасность нанотехнологий предполагает поиск новых источников в регионах и диверсификацию существующих источников энергии. Это способствует устойчивому развитию регионов с формированием сети источников чистой и возобновляемой энергии: например, инвестиционно-привлекательным является проект по организации эффективного регионального производства биодизеля.

В докладе подчеркивалось, что биоэкономика — это мироустройство, при котором биотехнологии (в том числе, бионанотехнологии) обеспечивают существенную часть материального производства. Базовыми компонентами биоэкономики являются интеграция биотехнологических знаний и их приложений в разных отраслях экономики, применение возобновляемых источников биомассы для целей устойчивого производства и экологического обеспечения, разработка и освоение геномных и постгеномных сложных клеточных технологий для получения новых процессов и продуктов. Основанная на знаниях биоэкономика объединяет ряд отраслей, включая биоинженерию, биоэнергетику, медицину и фармакологию, химическую промышленность, диагностику, продукты питания, очистку сточных вод и биотопливо.

Также состоялось обсуждение актуальных проблем наноиндустриального развития и ее приложений в сфере водородной энергетики. Отмечалось, что при получении наноматериалов для водородной энергетики применимы плазменно-мембранные и мембранно-каталитические технологии. В частности, использование наноструктурных мембран на базе Pd обеспечивает интеграцию в одном устройстве двух или всех трех стадий со сдвигом химического равновесия, повышения степени конверсии и снижения энергозатрат. При значительной роли государства на стадии исследования и разработок в сфере микро- и наносистемной техники на следующем этапе наблюдается возрастание роли промышленности в коммерциализации наноиндустриальной продукции. Например, разработка нанотехнологии предполагает изучение для соответствия техническим характеристикам и стоимости объектов для технологической подготовки, а первичное завоевание рынка основано на стратегических инвестициях в инфраструктуру (в частности, в ее мобильные и стационарные компоненты). Но развитие инфраструктуры базируется на реализованных инвестиционных и инновационных проектах (в том числе, энерготранспортных систем), а полностью развитая инфраструктура рынков соответствует высокой степени доступности коммерческих систем во всех регионах.

Отмечалось, что одним из пилотных проектов в наноиндустриальной сфере является переход к водородной экономике. В США он запланирован на 2022—2045 гг., но этому предшествуют этапы реализации НИОКР и демонстрационных проектов в течение 30 лет (2000—2030 гг.) и создание инфраструктуры для развития рынков с 2005 по 2038 годы (начальная стадия коммерциализации предполагается в период 2004—2015 гг.). В РФ переход к водородной энергетике с созданием развитой рыночной инфраструктуры пока не имеет четких временных границ, но исходя из первых двух этапов (НИОКР в 2000—2009 гг. и начальной стадии коммерциализации с 2009 по 2015 гг.), попавших на два кризисных для мировой экономики периода, можно прогнозировать задержку в реализации проекта. И дело не только в недостаточно высокой степени инвестиционной привлекательности и доминирующей государственной поддержке инвестпроектов и программ до 2015—2020 гг. До сих пор отсутствует законодательная мотивация бизнес-структур и регионов. Программы развития региональных демонстрационных проектов водород-

ной энергетики в РФ нет, что уже сказывается на торможении переходных процессов к водородной экономике.

Для решения задач, связанных с развитием отечественной энергетической инфраструктуры, при НИЦ "Курчатовский институт" создан экспериментально-промышленный полигон инновационной энергетики (шифр "ИКЕБАНА"). Не имеющий мировых аналогов уникальный энергокомплекс обеспечивает решение ряда задач по снижению выбросов оксидов азота и углекислого газа, производству энергии и топлива из возобновляемых источников и созданию нового поколения энергосберегающих технологий. Полигон производит востребованную на энергорынках продукцию: газообразные аргон, ксенон, кислород, криптон, водород и "хитан"; электроэнергию; жидкие гелий, кислород и азот, а также моторное топливо.

## Выводы

1. Правые пробелы и противоречия в законодательстве существенно влияют на сдерживание инвестиционной активности и увеличение объемов капиталовложений в нанотехнологической сфере. Развитие энергетической инфраструктуры России возможно благодаря усилению роли альтернативных энергорынков, что, в частности, предполагает устранение законодательных недоработок.

2. Необходимо внесение изменений в нормативно-правовую базу для формирования законодательной мотивации регионов и бизнес-структур для решения задач по развитию водородной энергетики в России. Устранение законодательных недоработок будет способствовать созданию программы развития региональных демонстрационных проектов водородной энергетики в РФ и повышению ее инвестиционной привлекательности.

3. Для создаваемых программно-аппаратных комплексов хранения данных о результатах расшифровки геномов в целях их защиты целесообразна разработка нового поколения информационных систем, основанных на инновационных принципах обеспечения безопасности. Уровень защиты данных может быть повышен при использовании стеганографических технологий [2].

## Список литературы (References)

1. Mizushima K., Jones P. C., Wiseman P. J. and Goode-nough J. B. A new cathode material for batteries of high energy density // Mat. Res. Bull. 1980. Vol. 15. P. 783—789.
2. Rathkeen L. Russian Patent № 2322693.

L. S. Rathkeen, Deputy General Director, ARGM LLC, e-mail: rathkeen@bk.ru

## TO THE 30<sup>th</sup> ANNIVERSARY OF DEPARTMENT OF NANOTECHNOLOGIES AND INFORMATION TECHNOLOGIES OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES: FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS OF DEVELOPMENT OF NANO- & MICROSYSTEM TECHNIQUE

*To the 30<sup>th</sup> of Department of nanotechnologies and information technologies of Russian Academy of Sciences were devoted a wide spectrum of conferences, which were organized by National Scientific & Research Center "Kurchatov institute". Were discussed problems of fundamental and applied aspects of development of nano- & microsystems technique, laboratory researching and industrial producing of new types of nanoindustrial products, high level of integration of education & investments.*

**Keywords:** Russian academy of sciences (RAS), National Scientific & Research Center "Kurchatov institute", Lomonosov state university, nanotechnologies, nanostructures, nanoparticles, nanotubes, nanomedicine, bionanomaterials, nanomaterials

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.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 19.03.2014. Подписано в печать 24.04.2014. Формат 60×88 1/8. Заказ МС514. Цена договорная  
Оригинал-макет ООО «Авансд солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансд солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.