

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 5(178) ✧ 2015

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 реферируется в базе данных INSPEC

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н, проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н, проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

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

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

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

Издается с 1999 г.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Булярский С. В., Булярская С. А., Вострецова Л. Н., Дудин А. А., Орлов А. П., Павлов А. А., Басаев А. С., Кищук Е. П., Шаманаев А. А., Шаман Ю. П. Параметры переноса тока контактов металл — углеродные нанотрубки 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Шелепин Н. А. Физические основы моделирования паразитных элементов КНИ КМОП СБИС 9
Суханов В. С., Гусев Д. В., Литвиненко Р. С. Моделирование кристалла тензорезистивной матрицы чувствительных элементов давления 17

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Аржанова Н. А., Проказников А. В. Самоорганизационные процессы в ходе электролитического наноструктурирования кремния 20
Грязин Д. Г., Величко О. О. Оценка характеристик микромеханических датчиков и модулей при их групповом изготовлении. Метод и его техническая реализация 37
Мальцев П. П., Редькин С. В., Скрипниченко А. С., Побойкина Н. В., Духновский М. П., Смирнова А. К. Технология лазерной резки поликристаллических алмазных пластин 44

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Парфенов Н. М., Тимошенков С. П., Тимошенков А. С. Исследование и разработка интегральных МЭМС-преобразователей механических величин 49
Стариков А. Н., Коростелёв В. Ф. Повышение вибрационной устойчивости микроэлектронных устройств 54

ИНФОРМАЦИЯ 60

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 2013 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

Journal of NANO- and MICROSYSTEM TECHNIQUE

NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEHNIKA

ISSN 1813-8586

№ 5

(178)

2015

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. — **CHIEF EDITOR**
Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA) —
DEPUTY CHIEF EDITOR

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

Executive secretary:

Lysenko A. V.

Editorial staff:

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

Our:

Web: www.microsystems.ru/eng;
e-mail: nmst@novtex.ru

To subscribe, please contact with:

JSC "MK-Periodica":
Tel: +7 (495) 672-7012
Fax: +7 (495) 306-3757
E-mail: import@periodicals.ru

The Journal is included in the list
of the Higher Attestation Commission
of the Russian Federation,
in the Russian system of science citation index
and INSPEC data base

Published since November 1999

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

Bulyarsky S. V., Bulyarskaya S. A., Vostretsova L. N., Dudin A. A., Orlov A. P., Pavlov A. A., Basayev A. S. Kitsyuk E. P., Shamanayev A. A., Shaman Yu. P. Parameters of Current Transport in Metal — Carbon Nanotube Contacts 6

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Shelepin N. A. Physical Foundations for Modeling of the Parasitic Elements of SOI CMOS VLSI 14

Sukhanov V. S., Gusev D. V., Litvinenko R. S. Crystal Modelling of the Tensoresistive Matrixes of the Sensitive Pressure Elements 18

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Arzhanova N. A., Prokashnikov A. V. Self-Organizing Processes During an Electrolytic Nanostructuring of Silicon. 31

Gryazin D. G., Velichko O. O. Estimation of Characteristics of the Micromechanical Sensors and Modules in Case of their Group Manufacture. The Method and its Technical Realization . . . 42

Maltsev P. P., Redkin S. V., Skripnichenko A. S., Poboykina N. V., Doukhovskiy M. P., Smirnova A. K. Technology for Laser Cutting of the Polycrystalline Diamond Plates 47

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Parfenov N. M., Timoshenkov S. P., Timoshenkov A. S. Research and Development of Integral MEMS-transducers of Mechanical Quantities. 52

Starikov A. N., Korostelev V. F. Improvement of the Vibration Resistance of the Microelectronic Devices 58

INFORMATION 60

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 621.315

С. В. Булярский, д-р физ.-мат. наук, проф., нач. лаб., **С. А. Булярская**, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., e-mail: svet2954@mail.ru, **Л. Н. Вострецова**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. ФГБОУ ВПО Ульяновский государственный университет, **А. А. Дудин**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., **А. П. Орлов**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., **А. А. Павлов**, канд. техн. наук, нач. отдела, ФГБНУ Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, **А. С. Басаев**, канд. физ.-мат. наук, зам. директора, **Е. П. Кицюк**, мл. науч. сотр., **А. А. Шаманаев**, мл. науч. сотр., **Ю. П. Шаман**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. ГНЦ РФ НПК "Технологический центр", г. Москва

ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕНОСА ТОКА КОНТАКТОВ МЕТАЛЛ — УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Поступила в редакцию 25.12.2014

Контакт металл—полупроводник является полезной моделью для исследования процессов переноса тока в структурах с областью пространственного заряда. Не являются исключением контакты углеродных нанотрубок с металлом. Показано, что на концах одиночных нанотрубок и их пучков возникают потенциальные барьеры. Один образуется металлом зонда, а другой металлическим катализатором, из которого растет нанотрубка. При приложении внешнего смещения один контакт смещается в прямом направлении, а другой — в обратном. В этом случае сила тока определяется обратносмещенным контактом. Преобладающим механизмом переноса тока в нем являются силы зеркального изображения. Анализ вольт-амперных характеристик при таком механизме переноса позволяет определить среднюю высоту потенциального барьера на границах и концентрацию свободных электронов в нанотрубке.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, контакты металл — полупроводник, высота потенциального барьера, концентрация носителей заряда

Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются перспективными для использования во многих технических важных приложениях [1]. Контакт металл — полупроводник всегда привлекал исследователей как образец простейшего полупроводникового прибора. Поэтому важно знать свойства контактов и механизмы переноса тока в них. Подобные исследования были выполнены и на УНТ [2—5]. В работе [3] анализировалась область контакта металл — УНТ. Было показано, что переход между ними можно рассматривать как переход между металлом и полупроводником. Кулоновское взаимодействие в указанных структурах изменяет процессы переноса в области контакта так же, как в полупроводниковом гетеропереходе. Имеет место эффект экранирования, возникает область пространственного заряда и электрическое поле, которое изгибает энергетические уровни УНТ. В данной работе изу-

чаются такие контакты одиночных нанотрубок и их пучков, а также определяются некоторые параметры данных структур.

Экспериментальные результаты

Измерения проводили в высоком вакууме двухлучевой системы FEI Helios NanoLab 650i. Система способна получать изображения с разрешением не хуже 0,7 нм при ускоряющем напряжении не более 1 кВ. Рабочее давление в измерительной камере составляло $5 \cdot 10^{-5}$ Па. В этой камере установлена зондовая система Kleindiek Nanotechnik с четырьмя отдельными независимыми манипуляторами, способными работать при напряжениях до 150 В. Каждый манипулятор может двигаться в любом направлении с высокой точностью благодаря пьезоэлектрической системе перемещения. Каждый зонд имеет собственный коаксиальный разъем. Для измерений вольт-амперных характеристик на постоян-

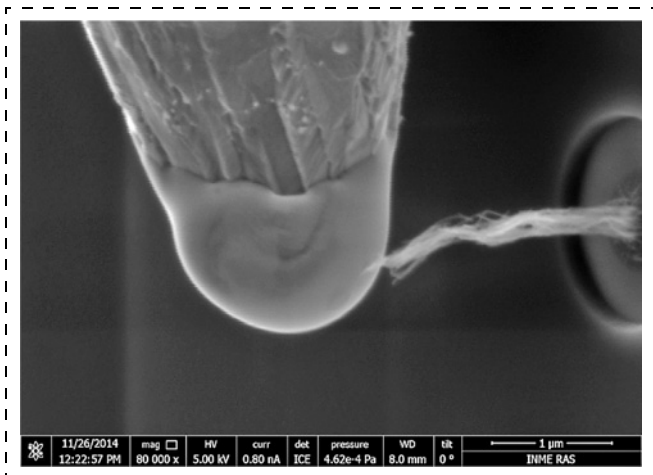


Рис. 1. Крепление пучков углеродных нанотрубок в измерительной системе

Fig. 1. Fixing of the CNT bundles in the measuring system

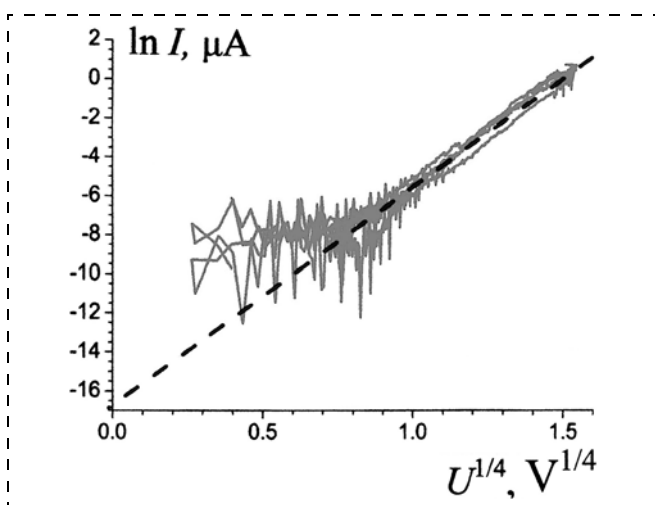


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики пучков УНТ в координатах $\ln I = f(U^{1/4})$, характерных для токов в контактах, формируемых силами зеркального изображения

Fig. 2. CVC of CNTs bundles in the coordinates $\ln I = f(U^{1/4})$, which are characteristic for the currents in the contacts formed by the inverse image force

ных токах использовали программируемый двухканальный источник-измеритель Source Meter 2634B фирмы Keithley. Прибор оптимизирован для измерений слабых сигналов вплоть до 10^{-15} А и оснащен специальными экранированными триаксиальными выводами с функцией компенсации сверхмалых токов. Входное сопротивление прибора (более 100 ГОм) обеспечивает при измерениях самый минимальный уровень вносимых искажений и ошибок в тестируемые схемы в этом классе приборов.

Для исследования образцы пучков УНТ и одиночных УНТ закреплялись (рис. 1) таким образом, что свободный конец пучка касался противоположного измерительного зонда. При включении электрического поля в пучке УНТ индуцируются

свободные носители заряда и возникают подемоторные электростатические силы, которые заставляют пучок притягиваться к зонду. В результате пучок распрямляется и его контакт с зондом становится более плотным. Происходит процесс формирования контакта.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) пучков УНТ, построенные в линейном масштабе, имеют S-образный характер. В координатах $\ln I = f(U^{1/4})$ они в целом линейны (рис. 2). Линейность ВАХ отражает особенности поведения измеряемой наноструктуры на границах. Таких границ две: пучок нанотрубок — кремний и пучок нанотрубок — зонд. На этих границах существуют потенциальные барьеры. Рассмотрим причины их возникновения. Нанотрубка растет из металлического катализатора. При температурах роста катализатор взаимодействует с поверхностью кремния и образует омический контакт. Поэтому барьер на этой поверхности следует рассматривать как барьер УНТ с металлом катализатора, так же как на границе УНТ — зонд с металлом зонда.

Таким образом, изучаемая структура представляет два контакта металл — полупроводник, включенных навстречу друг другу. Процессы переноса тока в таких структурах впервые обсуждались С. В. Булярским при исследовании структур с контактами к высокоомным широкозонным полупроводникам: GaP; CdIn_2S_4 ; ZnIn_2S_4 [6, 7]. Тогда же разработана методика обработки результатов таких измерений. Линейность ВАХ в координатах $\ln I = f(U^{1/4})$ указывает на то, что на формирование тока исследуемых структур влияют силы зеркального изображения.

Обсуждение экспериментальных результатов

Вольт-амперная характеристика, формируемая под действием сил зеркального изображения. Силы зеркального изображения возникают в момент пересечения электроном границы раздела металл — полупроводник. Электрон при попадании в полупроводник индуцирует в металле заряд противоположного знака. Между электроном и индуцированным зарядом возникает сила, которая носит наименование *силы зеркального изображения*. Эта сила может быть рассчитана, если индуцированный заряд заменить зеркально расположенным положительным зарядом, который равен заряду электрона и находится на таком же расстоянии от границы раздела. Расчет силы зеркального изображения дает:

$$f(x) = -e^2/16\pi\epsilon_s x^2, \quad (1)$$

где e — заряд электрона; ϵ_s — диэлектрическая проницаемость нанотрубки.

Совместное действие сил зеркального изображения и электрического поля области пространст-

венного заряда контакта металл — полупроводник понижает высоту контактного потенциального барьера. Величина понижения потенциального барьера определяется выражением [7]

$$\Delta\phi_b = -\beta(\phi_0 \pm eU)^{1/4},$$

где

$$\beta = -(e^6 n / 8\pi \epsilon_s^3)^{1/4}, \quad (2)$$

ϕ_0 — высота невозмущенного потенциального барьера на границе полупроводника и металла; U — приложенное к контакту напряжение смещения (+ соответствует обратному смещению); n — концентрация свободных электронов в полупроводнике.

Измеряемая структура представляет собой три нелинейных сопротивления, включенных последовательно. Сопротивление первого контакта формируется потенциальным барьером при прямом смещении, второе сопротивление — это сопротивление пучка УНТ, а третье сопротивление — сопротивление потенциального барьера при обратном смещении. Все три сопротивления нелинейные. При последовательном соединении ток в них протекает одинаковый, а внешнее напряжение смещения распределяется между всеми сопротивлениями. Сумма падений напряжений на них равна приложенному напряжению. Выражение для вольт-амперной характеристики имеет вид

$$I = sAT^2 \exp\left(-\frac{\phi_0 - \Delta\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

где A — постоянная Ричардсона, $A = 120m^* [A/cm^2 K^2]$; m^* — относительная эффективная масса; k — постоянная Больцмана; s — площадь диода; T — температура окружающей среды.

При напряжении смещения $U > 3kT$ и $\phi_0 > \Delta\phi_b$ эта формула упрощается и показывает, что с ростом напряжения смещения сопротивление первого контакта быстро падает:

$$I = sAT^2 \exp\left(-\frac{\phi_0}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \right]. \quad (4)$$

Сопротивление контакта, смещенного в обратном направлении, напротив, быстро возрастает. Он, в основном, определяет силу тока измеряемой структуры. При условиях $|U| > 3kT/e$, $eU \gg \phi_0$ сила тока определяется выражением

$$I = sAT^2 \exp\left(-\frac{\phi_0}{kT}\right) \exp\left[\beta \frac{(e|U|)^{1/4}}{kT}\right]. \quad (5)$$

Анализируя результаты экспериментов, приведенные на рис. 2, приходим к выводу, что в достаточно большом диапазоне напряжений прямого смещения выполняется соотношение (5). В этом случае можно вычислить два важных параметра уг-

леродных нанотрубок: потенциальные барьеры на границе с металлом зонда и кремнием, а также оценить концентрацию свободных носителей заряда.

Оценка высоты потенциальных барьеров на контакте УНТ — металл. Для вычисления высот потенциальных барьеров экспериментальные результаты перестраивались в координатах $\ln I = f(\sqrt[4]{U})$. Из формулы (5) получаем

$$\ln I = \ln I_s + \beta \frac{(e|U_3|)^{1/4}}{kT}, \quad (6)$$

где I_s — ток насыщения, который задается формулой

$$I_s = sAT^2 \exp\left(-\frac{\phi_0}{kT}\right),$$

откуда

$$\phi_0 = kT \ln\left(\frac{I_s}{sAT^2}\right). \quad (7)$$

Из-за достаточно больших шумов и близких значений высот потенциального барьера на обеих границах УНТ с металлами оценивалось усредненное значение высоты потенциального барьера на них. Для этого вольт-амперные характеристики, независимо от полярности, перестраивались в указанных выше координатах, и определялось усредненное значение тока насыщения. В расчетах используется логарифм площади, поэтому без больших погрешностей площадь можно оценить по диаметру пучка УНТ, который измеряется прибором.

Расчеты эффективных масс нанотрубок различной хиральности и диаметра выполнены в работах [8, 9]. Относительную эффективную массу для диаметров исследуемых УНТ можно принять равной 0,3.

Анализ результатов работ [10, 11] показывает, что статическую диэлектрическую проницаемость можно считать равной 12.

Высота потенциального барьера рассчитывалась по формуле (7) с использованием данных рис. 2. Результаты расчета приведены в таблице. Для оди-

Параметры углеродных нанотрубок
Parameters of carbon nanotubes

ϕ_0 , eV		Концентрация электронов, см ⁻³ <i>Electron concentration, cm⁻³</i>
До формования <i>Prior to forming</i>	После формования <i>After forming</i>	
0,77	0,25	$3 \cdot 10^{18}$
0,44	0,32	$2 \cdot 10^{19}$
0,84	0,72	$5 \cdot 10^{19}$
0,84	0,77	$5 \cdot 10^{19}$
0,90	0,84	$5 \cdot 10^{19}$
1,07	0,77	$5 \cdot 10^{19}$

ночных углеродных нанотрубок высота потенциального барьера определялась аналогичным образом и ее значение лежало в пределах 0,6...0,8 эВ.

Оценка концентрации свободных электронов в углеродных нанотрубках. Для оценки концентрации свободных электронов воспользуемся формулой (2). Преобразовав ее, получаем:

$$n = \frac{8\pi\epsilon_s\beta^4}{e^6}. \quad (8)$$

Коэффициент β находим из наклона ВАХ, которая определяется формулой (6):

$$\beta = kT \frac{\ln(I_1/I_2)}{(e|U_{23}|)^{1/4} - (e|U_{13}|)^{1/4}}. \quad (9)$$

Величины токов I_1 и I_2 выбираем произвольно на участке, который описывается линейной зависимостью $\ln I = f(\sqrt[4]{U})$. По этим значениям рассчитывают коэффициент β по формуле (9), а затем концентрацию электронов по формуле (8). Результаты расчетов также приведены в таблице. Концентрация носителей заряда в одиночных нанотрубках была того же порядка. Значения полученных концентраций указывают на полупроводниковый характер проводимости исследуемых пучков УНТ.

* * *

В данной работе исследованы вольт-амперные характеристики контактов углеродных трубок с металлом. Разработаны методики определения высоты потенциального барьера, а также концентрации свободных носителей заряда в углеродных нанотрубках.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственной поддержки научных исследований.

Список литературы

1. Булярский С. В. Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение. Ульяновск: Стрелжень, 2011. 432 с.
2. Odintsov A. A., Tokura A. A. Contact phenomena and Mott transition in carbon nanotubes // Journal of Low Temperature Physics. 2000. V. 118, N. 5/6. P. 507–511.
3. Srivastava D., Menonand M., Ajayan P. M. Branched carbon nanotube junctions predicted by computational nanotechnology and fabricated through nanowelding // Journal Nanoparticle Research 2003. V. 5. P. 395–400.
4. H-Nha Nguyen. Monte Carlo modeling of Schottky contacts on semiconducting carbon nanotubes // Simulation of Semiconductor Processes and Devices. 2007. V. 12. P. 457–460.
5. Nardelli M., Yakobson B. I., Bernholc J. Contact phenomena in carbon nanotubes // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 4656–4660.
6. Булярский С. В., Кудинцева Г. А. Механизм протекания тока в поверхностно-барьерных диодах Au–CdIn₂S₄ // ФТП. 1977. N. 10. С. 2021–2025.
7. Булярский С. В., Невский О. А., Желяпов Г. Е. Определение параметров глубоких уровней в эпитаксиальных слоях GaP:ZnO с помощью двойных поверхностно-барьерных структур // ФТП. 1981. Т. 15, № 7. С. 1660–1664.
8. Shabrawy K. E., Maharatna, Bagnall D., Al-Hashimi B. Modeling SWCNT Band-gap and Effective Mass Variation using a Monte Carlo Approach // ICICDT Grenoble, France, 2008. V. 87. P. 345–349.
9. Akinwande D., Nishi Y., Wong H.-S. P. An Analytical Derivation of the Density of States, Effective Mass, and Carrier Density for Achiral Carbon Nanotubes // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. V. 55. P. 289–297.
10. Pandolfo A. G., Hollenkamp A. F. Carbon properties and their role in supercapacitors // J. Power Sources. 2006. V. 157. P. 11–27.
11. Wakai C., Oleinikova A., Ott M., Weingartner H. How Polar Are Ionic Liquids. Determination of the Static Dielectric Constant of an Imidazolium-based Ionic Liquid by Microwave Dielectric Spectroscopy // J. Phys. Chem. B. 2005. V. 109. P. 17028–17030.

S. V. Bulyarsky, D. Sc., Professor, S. A. Bulyarskaya, Ph. D., Associate Professor, e-mail: svet2954@mail.ru, L. N. Vostretsova, Ph. D., FGBOU VPO Ulyanovsk State University, A. A. Dudin, Ph. D., Senior Researcher, A. P. Orlov, Ph. D., Senior Researcher, A. A. Pavlov, Ph. D., Institute of Nanotechnology of Microelectronics, RAS, A. S. Basayev, Ph. D., Deputy Director, E. P. Kitsyuk, Junior Researcher, A. A. Shamanayev, Junior Researcher, Yu. P. Shaman, Ph. D., Senior Researcher, Technological Center, Moscow

Parameters of Current Transport in Metal — Carbon Nanotube Contacts

Metal-semiconductor contact is a useful model for studying of the current transport processes in the structures with a space charge area. The contacts of carbon nanotubes with metal are not an exception. It was demonstrated that at the ends of the single nanotubes and their bundles potential barriers are formed. One barrier is formed by a metal probe and the other barrier is formed by a metal catalyst, from which a nanotube grows. When an external force is applied, one contact shifts in the forward direction and the other one in the reverse direction. In this case the current strength is determined by a reverse-biased contact. The predominant transport mechanism of the current in this contact is the mirror-image force. Analysis of the voltage-current characteristics in this transport mechanism allows us to determine an average height of the potential barrier at the borders and concentration of free electrons in a nanotube.

Keywords: carbon nanotubes, metal-semiconductor contacts, potential barrier height; charge carrier density

Introduction

Carbon nanotubes (CNT) are promising for many technically important applications [1]. Contact "metal-semiconductor" always attracts researchers as an example of the simplest semiconductor device. Therefore, it is important to know the properties of the contacts and the current transfer mechanisms therein. Such studies were also carried out on the CNT [2–5]. The area of metal-CNT contact was analyzed in [3]. It was shown that the transition between them can be considered as a transition between the metal and the semiconductor. Coulomb interaction in the mentioned structures changes the transport in the contact area as well as in a semiconductor heterojunction. There is a screening, a region of space charge and electric field occur that bends the energy levels of the CNT. In this paper we study the contacts of the single nanotubes and their bundles, as well define some parameters of such structures.

Experimental results

The measurements were performed in a high vacuum of two-beam system of FEI Helios NanoLab 650i. The system is capable to take images with a resolution better than 0,7 nm at an accelerating voltage of less than 1 kV. The operating pressure in the measuring chamber was $5 \cdot 10^{-5}$ Pa. Kleindiek Nanotechnik probe system with 4 independent manipulators able to work up to 150 V is installed in it. Each arm can move in any direction with high accuracy due to the piezoelectric displacement system. Each probe has its own coaxial connector. The programmable two-channel source-meter Source Meter 2634B by Keithley is used for measurements of current-voltage characteristics (CVC) at constant currents. The device is optimized for low current signals measurement of up to 10^{-15} A and equipped with special shielded triaxial leads with function of compensation of ultra-low currents. The input impedance of the device (100 TΩ) provides at measurements the most lower level of introduced distortions and errors into the testing devices' circuits.

At studying, the bundles' samples and single CNT were fixed (fig. 1) so that the free end of the beam touched the opposite probe. When the electric field switches on, the free carriers are induced in the CNT beam and the ponderomotor electrostatic forces occur that cause the beam to be gravitated to the probe. As a result, the beam becomes straightened and its contact with the probe becomes more dense. Formation of a contact occurs.

CVC of the CNT bundles, built on a linear scale, have S-shaped character. In coordinates $\ln I = f(\sqrt[4]{U})$ they are generally linear (fig. 2). The linearity of the current-voltage characteristics reflects the behavior of the measured nanostructure on the borders. There are two boundaries: a CNT beam — silicon and CNT beam — probe. The potential barriers are situated on these boundaries. Let's consider the reasons of their occurrence. The nanotube grows from the metal catalyst. At growth temperature it interacts with the surface of the silicon and forms an ohmic contact. Therefore, the barrier on this surface should be regarded as a barrier between CNT and catalyst's metal, as well as on the border CNT-probe with the probe's metal. Thus, the studied structure represents two contacts metal-semiconductor included towards each other. Current transport in these structures was firstly

discussed by S. V. Bulyarsky at studying of structures with contacts to high-ohmic wide bandgap semiconductors: GaP, CdIn_2S_4 , ZnIn_2S_4 [6, 7]. At the same time, a method for processing of the results of measurements was developed. The linearity of the current-voltage characteristics in the coordinates indicates $\ln I = f(\sqrt[4]{U})$ shows that the inverse image forces affect on formation of the current in the studied structures.

Discussion of experimental results

CVC formed under the action of an inverse image forces.

Inverse image forces occur at the time when an electron crossing metal-semiconductor border. When an electron hits a semiconductor, it initiates a charge of opposite sign in the metal. A force occurs between the electron and the induced charge that is named *inverse image force*. It can be calculated if the induced charge to replace by contralateral positive charge, which is equal to the electron charge and situated at the same distance from the interface. The calculation of this force gives:

$$f(x) = -e^2/16\pi\epsilon_s x^2, \quad (1)$$

where e — the charge of an electron; ϵ_s — the dielectric permittivity of CNT.

The combined action of the inverse image forces of the electric field of the space charge region of metal-semiconductor contact lowers the height of the contact potential barrier. Lowering of the potential barrier is given by the expression [7]:

$$\Delta\phi_b = -\beta(\phi_0 \pm eU)^{1/4},$$

where

$$\beta = -(e^6 n / 8\pi\epsilon_s^3)^{1/4}, \quad (2)$$

ϕ_0 — height of undisturbed potential barrier at the interface of the semiconductor and metal; U — bias voltage applied to the contact (+ corresponds to the reverse bias); n — concentration of free electrons in the semiconductor.

The measured structure consists of three serially connected nonlinear resistances. The resistance of the first contact is formed by potential barrier at forward bias, the second is formed by the resistance of the CNT bundle, and the third is formed by the resistance of the potential barrier at the reverse bias. All three resistances are non-linear. When they are serially connected, the same current flows in them, and the external bias voltage is distributed among all resistances. The sum of the voltage drops on them is equal to the applied voltage. The expression for the current-voltage characteristic is as follows:

$$I = sAT^2 \exp\left(-\frac{\phi_0 - \Delta\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

where A — Richardson constant, $A = 120 \cdot m^*$ [A/cm²K²]; m^* — relative effective mass; k — Boltzmann constant; s — area of the diode; T — temperature of the environment.

At bias voltage of $U > 3 kT$ and $\phi_0 > \Delta\phi_b$ the formula becomes simplified and shows that with increasing of bias voltage the resistance of the first contact quickly falls:

$$I = sAT^2 \exp\left(-\frac{\phi_0}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \right]. \quad (4)$$

Resistance of the contact shifted in the opposite direction, conversely, increases rapidly. It mainly determines the current's strength of the measured structure. Under the conditions: $|U| > 3kT/e$, $eU \gg \phi_0$ the current is given by

$$I = sAT^2 \exp\left(-\frac{\phi_0}{kT}\right) \exp\left[\beta \frac{(e|U_3|)^{1/4}}{kT}\right]. \quad (5)$$

Analyzing the experiments (fig. 2), we come to the conclusion that the relation (5) can be fulfilled in a sufficiently large voltage range of forward bias. In this case, we can calculate two important CNT parameters: the potential barriers at the interface between the metal of the probe and silicon, to estimate the concentration of free charge carriers.

Evaluation of the potential barrier height at the contact CNT – metal. To calculate the heights of the potential barriers, the experimental results were converted in the coordinates $\ln I = f(\sqrt[4]{U})$. From (5) we obtain:

$$\ln I = \ln I_s + \beta \frac{(e|U_3|)^{1/4}}{kT}, \quad (6)$$

where I_s — the saturation current, which is given by the formula

$$I_s = sAT^2 \exp\left(-\frac{\phi_0}{kT}\right),$$

from which

$$\phi_0 = kT \ln\left(\frac{I_s}{sAT^2}\right). \quad (7)$$

Due to the rather large noises and close potential barrier heights at both ends of the CNTs border with the metals, the average height of the potential barriers on them were estimated. For this, CVC regardless of the polarity was reconstructed in the above mentioned coordinates, and the average saturation current was determined. The logarithm of the area was used in the calculations, so the area can be estimated without much error by the CNTs beam diameter, which is measured by the instrument.

The calculations of the effective CNT masses of various chirality and diameter were made in [8, 9]. The relative effective mass for diameters of the studied CNTs can be taken as 0,3. The analysis of the results [10–11] shows that the static dielectric permittivity can be considered to be equal to 12.

Potential barrier height was calculated according to (7) using fig. 2. The calculation results are shown in the table. For single CNTs the potential barrier height was defined similarly, and its value lies in the range of 0,6...0,8 eV.

Estimation of concentration of the free electrons in carbon nanotubes. To estimate concentration of the free electrons we use (2). Transforming it, we will get:

$$n = \frac{8\pi\epsilon_s^3\beta^4}{e^6}. \quad (8)$$

The coefficient β can be found from the CVC slope, which is determined by (6):

$$\beta = kT \frac{\ln(I_1/I_2)}{(e|U_{23}|)^{1/4} - (e|U_{13}|)^{1/4}}. \quad (9)$$

Currents I_1 and I_2 can be chosen arbitrarily on the site, which is described by a linear dependence $\ln I = f(\sqrt[4]{U})$. The coefficient β can be calculate by them (9), and then the electron density (8). The calculations are also shown in the table. The concentration of charge carriers in single CNT was of the same order. The resulting concentrations indicate the semiconductor character of the conductivity of investigated CNT bundles.

* * *

CVC of the CNT-metal contacts were investigated in the work. The procedures for determining of the potential barrier height, as well as the concentration of free charge carriers in carbon nanotubes were developed.

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the State support for research.

References

1. Bulyarskiy S. V. *Uglerodnye nanotrubki: Teshnologiya, upravlenie svoystvami, primeneniye*. Ulyanovsk: Stregen, 2011. 432 p.
2. Odintsov A. A., Tokura A. A. Contact phenomena and Mott transition in carbon nanotubes. *Journal of Low Temperature Physics*, 2000. V. 118, N. 5/6. P. 507–511.
3. Srivastava P., Menonand M., Ajayan P. M. Branched carbon nanotube junctions predicted by computational nanotechnology and fabricated through nanowelding. *Journal Nanoparticle Research*. 2003. V. 5. P. 395–400.
4. H-Nha Nguyen. Monte Carlo modeling of Schottky contacts on semiconducting carbon nanotubes. *Simulation of Semiconductor Processes and Devices*. 2007. V. 12. P. 457–460.
5. Nardelli M., Yakobson B. I., Bernholc J. Contact phenomena in carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81. P. 4656–4660.
6. Bulyarskiy S. V., Kudintceva G. A. Meshanizmy protokaniya toka v povershnochno-barierhysh diodah Au–CdIn₂S₄. *FTP*. 1977. N. 10. P. 2021–2025.
7. Bulyarskiy S. V., Nevskiy O. B., Gelyapov G. E. Opre-delenie parametrov gloobokih urovney d epitaksialnyh sloyah GaP:ZnO s pomogtyu dvoynyh povershnochno-barierhysh diodov. *FTP*. 1981. V. 15, N. 7. P. 1660–1664.
8. Shabrawy K. E., Maharatna, Bagnall D., Al-Hashimi B. Modeling SWCNT Band-gap and Effective Mass Variation using a Monte Carlo Approach. *ICICDT Grenoble, France*, 2008. V. 87. P. 345–349.
9. Akinwande D., Nishi Y., Wong H.-S. P. An Analytical Derivation of the Density of States, Effective Mass, and Carrier Density for Achiral Carbon Nanotubes. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2008. V. 55. P. 289–297.
10. Pandolfo A. G., Hollenkamp A. F. Carbon properties and their role in supercapacitors. *J. Power Sources*. 2006. V. 157. P. 11–27.
11. Wakai C., Oleinikova A., Ott M., Weingartner H. How Polar Are Ionic Liquids. Determination of the Static Dielectric Constant of an Imidazolium-based Ionic Liquid by Microwave Dielectric Spectroscopy. *J. Phys. Chem. B*, 2005. V. 109. P. 17028–17030.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.3.049.774.2

Н. А. Шелепин, д-р техн. наук, первый зам. ген. директора АО "НИИМЭ", Зеленоград; Москва,
e-mail: nchelepin@mikron.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КНИ КМОП СБИС

Поступила в редакцию 22.01.2015

Решение проблем радиационной стойкости элементов СБИС, используемых в космической аппаратуре, очевидно являются весьма актуальным для эффективного обеспечения космического приборостроения высоконадежными современными микросхемами. Рассмотрены особенности обеспечения радиационной стойкости элементов КМОП СБИС на основе технологии "кремний на изоляторе" (КНИ). Показано, что наиболее "узким" местом для КНИ КМОП является обеспечение гарантированной стойкости к накопленной дозе ионизирующего излучения. Представлена физическая и математическая модель полевого взаимодействия в структуре "полупроводник — диэлектрик — полупроводник" (ПДП), которое возникает между карманами МОП-транзисторов и несущей подложкой. Эта модель учитывает кинетику накопления заряда в скрытом изолирующем оксиде.

Ключевые слова: КМОП-транзистор, КНИ, космическое излучение, накопленная доза ионизирующего излучения, радиационная стойкость, ПДП-структура, модель транзистора

Введение

Радиационная стойкость интегральных схем является важным условием при создании систем космического применения [1]. Радиация в космосе обусловлена наличием частиц и ионизирующих излучений (ИИ) в нашей солнечной системе и излучений множества источников вне ее пределов. Соответственно вопросам обеспечения радиационной стойкости (РС) посвящено немалое количество научных статей, докладов на конференциях и диссертаций. Так, например, в МИФИ регулярно защищаются кандидатские диссертации по типовой тематике: "Методы и средства оценки и прогнозирования радиационной стойкости (далее называется какой-либо тип микросхем)". Однако подавляющее большинство этих работ посвящено исследованиям и прогнозированию стойкости конечных изделий. Исследований РС именно элементной базы микросхем много меньше, так как в данном случае необходима организация совместных работ между технологами и разработчиками, способными

спроектировать и изготовить специальные тестовые кристаллы с нужным и тестопригодным набором элементов, и исследователями, владеющими средствами радиационных воздействий и измерений характеристик этих элементов. Очевидно, что без обеспечения высокой РС отдельных элементов ИС невозможно получить радиационно-стойкие микросхемы.

Достаточно подробное описание конструктивно-технологических способов повышения РС элементов КМОП СБИС как на основе технологий "объемного" кремния, так и на основе технологий "кремний на изоляторе" (КНИ) представлено в работе [2]. При этом следует специально отметить один важный вывод, следующий из данного анализа. Применение технологии КНИ совершенно не означает автоматического получения высокой РС. Для технологического уровня 180 нм изменения пороговых напряжений транзисторов при дозовом воздействии ионизирующих излучений становятся незначительными вследствие очень малой толщины подзатворного диэлектрика, по крайней мере для

цифровых микросхем. Поэтому основными проблемами достижения высокой РС по накопленной дозе для технологии на объемном кремнии становятся внутритранзисторные токи утечки вдоль относительно толстого слоя оксида боковой диэлектрической изоляции и межтранзисторные токи утечки "под" этим слоем. При этом использование "кольцевых" транзисторов и охранных колец для технологии объемного кремния практически решает данную проблему. В технологии КНИ автоматически решается проблема межтранзисторных утечек, но возникает проблема внутритранзисторной утечки в n -МОП транзисторах вследствие накопления в скрытом оксиде положительного заряда и инверсии типа проводимости в области, прилегающей к скрытому оксиду, что приводит к недопустимому увеличению токов утечки в этих транзисторах. Проблемам моделирования таких эффектов для КНИ КМОП-технологии посвящена, в частности, диссертация М. Горбунова [3]. Однако детального физического рассмотрения полевого взаимодействия в структурах "полупроводник — диэлектрик — полупроводник" (ПДП), которые образуются несущей подложкой, скрытым оксидом и "телом" (т. е. карманом) транзисторов, в работе не предусматривалось. Ниже представлена разработанная автором данной статьи модель ПДП-структуры [4], которая может быть основой для разработки компактных моделей паразитных КНИ-транзисторов или уточнения параметров моделей "BSIM SOI".

Описание модели ПДП-структуры

На рис. 1 схематично изображена интегральная структура КНИ-транзисторов. Очевидно, что здесь образуются два типа ПДП-структур: "карман n -типа — скрытый оксид — подложка" и "карман p -типа — скрытый оксид — подложка" (ПДП-структуры в области стоков-источков не рассматриваем, так как кремний в этих областях будет вырожденным полупроводником).

Основой при разработке математической модели принята известная теория МДП-структур [5]. На рис. 2 представлена зонная диаграмма для структуры полупроводник n -типа — диэлектрик — полупроводник p -типа при отсутствии и наличии внешней разности потенциалов между полупроводниковыми областями. Значение изгиба зон у границ раздела будет зависеть от тех же параметров, что и для МДП-структуры — контактной разности потенциалов, толщины диэлектрика, заряда в диэлектрике (включая заряд поверхностных состояний) и приложенного напряжения. Принципиальным отличием от МДП-структуры будет наличие изгиба зон и, соответственно, изменение по-

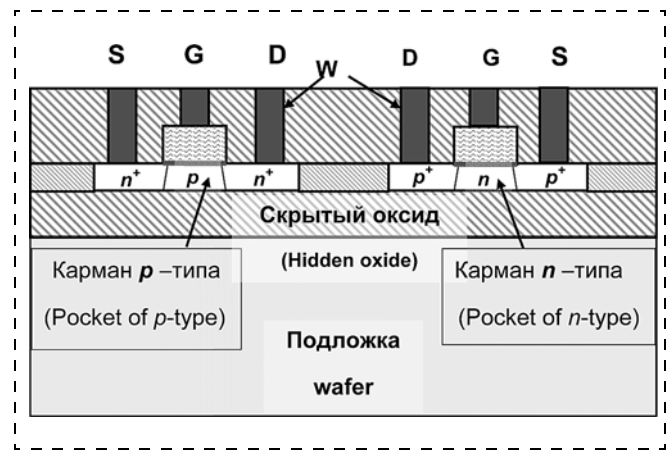


Рис. 1. Интегральная структура МОП-транзисторов, изготовленных по технологии КМОП КНИ: S — исток; D — сток; G — затвор; W — вольфрам. Структуры ПДП: карманы МОП-транзисторов — скрытый оксид — подложка

Fig. 1. The integral structure of MOS-transistors fabricated by CMOS SOI technology: S — source; D — drain; G — gate; W — tungsten; Structure SDS: MOS-transistors pockets — hidden oxide — substrate

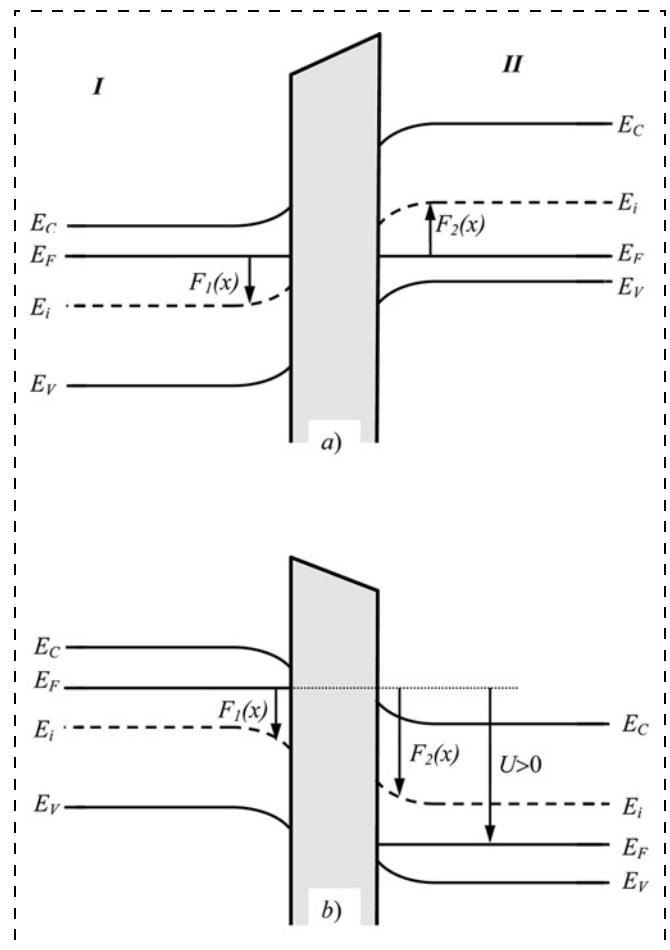


Рис. 2. Зонная диаграмма структуры полупроводник n -типа — диэлектрик — полупроводник p -типа при нулевом (a) и положительном (b) приложенных напряжениях U

Fig. 2. The band diagram of the structure: n -type semiconductor — insulator — semiconductor is p -type at zero (a) and positive (b) applied voltage (U)

тенциала с обеих сторон от диэлектрика, а также воздействие заряда в диэлектрике на обе полупроводниковые области.

Для получения математической модели структуры зададимся следующими условиями, аналогичными тем, что приняты в классической литературе по физике полупроводниковых приборов [5]:

- размеры полупроводниковых областей больше максимально возможных областей обеднения в них; при постоянном смещении отсутствует перенос тока сквозь диэлектрик;
- при любых смещениях в структуре могут существовать только поверхностные заряды полупроводниковых областей, т. е. их областей пространственного заряда (ОПЗ), и заряд в диэлектрике, включая заряды поверхностных состояний (ПС), алгебраическая сумма которых равна нулю.

Рассмотрим обозначения, принятые в настоящей работе и показанные частично на рис. 1. Знак приложенной к структуре внешней разности потенциалов U определим исходя из того, что напряжение U подается на область II относительно области I (т. е. положительные значения U будут смещать зонную диаграмму второй области вниз относительно зонной диаграммы области I, и наоборот). Контактную разность потенциалов определим как разность между значениями потенциалов Ферми $\Phi_k = \Phi_1 - \Phi_2$. Потенциалы Φ_1 и Φ_2 определяются как разность потенциалов соответствующих уровней Ферми и середины запрещенной зоны $\Phi_j = (\text{sign} N_j) F_T \ln |N_j/n_i|$, где j — номер полупроводниковой области (I или II); N_j — результирующая концентрация примеси в полупроводниковой области; n_i — собственная концентрация носителей в полупроводнике; F_T — термодинамический потенциал.

Очевидно, что при выбранных обозначениях и отсутствии заряда в диэлектрике в случае $U = \Phi_k$ в обеих полупроводниковых областях будет состояние плоских зон.

Для расчета зонной диаграммы и определения поверхностных состояний в полупроводниковых областях необходимо решить уравнение Пуассона для всей структуры, которое в данном случае можно записать следующим образом:

для полупроводниковых областей

$$\frac{d^2 F(x)/dx^2}{=} = -(q/\varepsilon_s) \{N_j - 2n_i \text{sh}[(F(x) - U_j)/F_T]\}; \quad (1)$$

для диэлектрика

$$\frac{d^2 F(x)/dx^2}{=} = -R(x)/\varepsilon_d, \quad (1a)$$

где $R(x)$ — функция распределения плотности заряда в диэлектрике, включая ПС; ε_s и ε_d — диэлектрические проницаемости соответственно полупроводника и диэлектрика; $j = 1$ для области I и $j = 2$ для области II; $U_1 = 0$; $U_2 = U$. Граничные условия для решения (1) определяются из условия электронейтральности в глубине полупроводниковых областей:

$$\begin{aligned} F(x_1) &= \Phi_1; \quad F(x_2) = \Phi_2 + U, \\ \text{т. е. } F(x_j) &= \Phi_j + U_j, \end{aligned} \quad (2)$$

где x_1 и x_2 — границы ОПЗ соответственно в полупроводниковых областях I и II.

Допустим, что весь заряд в диэлектрике сосредоточен на границах раздела и эквивалентные значения его поверхностной плотности составляют Q_{s1} и Q_{s2} соответственно. Тогда, учитывая, что электрическое поле в диэлектрике будет постоянным, и применяя теорему Гаусса к границам раздела, определим систему уравнений, связывающих значения поверхностных потенциалов F_{s1} , F_{s2} и полей E_{s1} , E_{s2} с параметрами структуры:

$$\varepsilon_s(E_{s2} - E_{s1}) = Q_{s1} + Q_{s2} = Q_s; \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} F_{s1} - F_{s2} &= E_d h = \\ &= [\varepsilon_s(E_{s1} + E_{s2}) + Q_{s1} - Q_{s2}]/(2C_d), \end{aligned} \quad (3b)$$

где C_d — удельная емкость диэлектрика; E_d — поле в диэлектрике; h — толщина диэлектрика.

Таким образом, полученные уравнения (3), однозначно определяющие связь между искомой функцией $F(x)$ и ее производной $E(x) = -F(x)/dx$ на границах раздела, представляют собой условия "сшивки" для решения уравнения Пуассона (1) в полупроводниковых областях. Интегрирование уравнения (1) дает четыре константы интегрирования (по две для каждой полупроводниковой области), для определения которых имеются два граничных условия (2) и два условия сшивки (3).

Для доказательства возможности однозначного представления заряда в диэлектрике с помощью двух эффективных поверхностных зарядов необходимо установить, имеется ли такое соотношение между Q_{s1} , Q_{s2} и $R(x)$, при котором зависимость между поверхностным потенциалом и полями при воздействии распределенного заряда $R(x)$ будет такой же, как в системе (3). Очевидно, что одно из соотношений следует из теоремы Гаусса, которая выражена в формуле (3) для всего диэлектрика:

$$Q_{s1} + Q_{s2} = Q_s = \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} R(x) dx, \quad (4)$$

где x_{d1} и x_{d2} — координаты границ диэлектрика.

Записав зависимости между разностью поверхностных потенциалов и полем в диэлектрике и выразив также зависимость поля в диэлектрике путем несложных преобразований, получим следующее выражение:

$$F_{s1} - F_{s2} = \left\{ \varepsilon_s(E_{s1} + E_{s2}) + (1/h) \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} \left[\int_{x_{d1}}^x R(x') dx' - \int_x^{x_{d2}} R(x') dx' \right] dx \right\} / (2C_d), \quad (5)$$

где $h = x_{d2} - x_{d1}$ — толщина диэлектрика.

Сравнивая (5) с (3б), находим и второе искомое соотношение:

$$Q_{s1} - Q_{s2} = \Delta Q_s = (1/h) \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} \left[\int_{x_{d1}}^x R(x') dx' - \int_x^{x_{d2}} R(x') dx' \right] dx. \quad (6)$$

Проведя соответствующие преобразования, из (4) и (6) получим

$$Q_{s1} = 1/h \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} \left[\int_{x_{d1}}^x R(x') dx' \right] dx; \quad (7a)$$

$$Q_{s2} = 1/h \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} \left[\int_x^{x_{d2}} R(x') dx' \right] dx. \quad (7б)$$

Данные соотношения однозначно определяют взаимосвязь между произвольно распределенным зарядом в диэлектрике и двумя эквивалентными ему по полемому воздействию на полупроводниковые области поверхностными зарядами.

Беря интегралы в (7) по частям с использованием при этом в качестве одной из функций внутреннее интегральное выражение и проводя соответствующие преобразования, получим известные выражения для значений эффективных поверхностных зарядов:

$$Q_{s1} = (1/h) \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} (x_{d2} - x) R(x) dx; \quad (7в)$$

$$Q_{s2} = (1/h) \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} (x - x_{d1}) R(x) dx. \quad (7г)$$

Выражение (7г) было получено другим методом для МДП-структур [6], что подтверждает правильность сделанных предположений и выкладок.

Аналитическое решение уравнения Пуассона (1) для условий обеднения, обогащения и инверсии в

полупроводниковых областях приводит к следующим зависимостям:

а) при условии обеднения

$$F_j(x) = \Phi_j + U_j - (qN_j/2\varepsilon_s)(x - x_j)^2, \quad (8)$$

где x_j — координата границы ОПЗ в соответствующей области полупроводника ($j = 1$ или 2);

б) при условии обогащения

$$F_j(x) = \Phi_j + U_j + (\text{sign}\Phi_j) F_T \ln\{1 + \text{tg}^2[(x_j - x)/L_{Dj}]\}, \quad (9)$$

где $L_{Dj} = \sqrt{2F_T\varepsilon_s/(qN_j)}$ — длина Дебая соответствующей области;

при условии инверсии

$$F_j(x) = -\Phi_j + U_j + (\text{sign}\Phi_j) F_T \ln[A(x)], \quad (10)$$

$$A(x) = \text{sh}^2[Z_j(x'_j - x)/L_{Dj}],$$

где $Z_j = \sqrt{2|\Phi_j|/F_T - 1}$, а параметры x'_j определяются из условий (3), после чего могут быть определены и координаты границ областей сильной инверсии x_j путем "сшивки" решений для участков сильной инверсии и следующих за ними участков обеднения:

$$x_j = x'_j + (-1)^j L_{Dj} [\ln(\sqrt{2|\Phi_j|/F_T - 1} - Z_j)] / Z_j.$$

Полученные решения уравнения Пуассона позволяют получить выражения для напряжений плоских зон и пороговых напряжений ПДП-структур по аналогии с классическими формулами для МДП-структур.

Подставляя в (8) условие плоских зон в одной области $F_{sj} = \Phi_j + U_j$ через уравнение "сшивки" (3), определяем напряжение плоских зон в ней при обеднении другой:

$$U_{FBj} = \Phi_k + (-1)^j [Q_{sj}/C_d - 2\Phi_i(Q_s/Q_{mi})^2]. \quad (11)$$

Аналогичным образом, определяя условие возникновения сильной инверсии как $F_{sj} = -F_j + U_j$, получаем выражение для порогового напряжения в одной из полупроводниковых областей при условии обеднения в другой:

$$U_{0j} = \Phi_k + (-1)^j \{ Q_{sj}/C_d + 2\Phi_i(1 - N_j/N_i) - 2\Phi_i(Q_s/Q_{mi})^2 + (Q_{mj}/C_d)[1 - \Phi_i(4C_dQ_s/Q_{mi})] \}, \quad (12)$$

где $i = 3 - j$ — индекс, соответствующий противоположной полупроводниковой области; $Q_{mi} = (\text{sign} N_i) 2 \sqrt{q \varepsilon_s N_i \Phi_i}$ — заряд ОПЗ i -й области при ее максимальном размере, т. е. при переходе в состояние инверсии.

Выражения (11) и (12) содержат все слагаемые, соответствующие аналогичным формулам для МДП-структур, и при выполнении условий $|N_j/N_i| \ll 1$ и $|Q_s/Q_{mi}| \ll 1$, что обеспечивается, например, при высоких концентрациях примесей в i -й области (т. е. в затворе), полностью совпадают с ними. Остальные слагаемые отражают наличие изгиба зон в области затвора. Из уравнения (10) аналогичным образом определяется выражение для плоских зон при условии обогащения в области затвора:

$$U_{FBj} = \Phi_K + (-1)^j \{ Q_{sj} / C_d + (\text{sign} \Phi_j) F_T \ln[1 + (Q_s / Q_i)^2] \}, \quad (13)$$

где $Q_i = q N_i L_{Di}$.

Уравнение (8) для одной области и (9) для другой позволяют определить пороговое напряжение при условии обогащения на затворе, что характерно для полупроводников одного типа проводимости:

$$U_{0j} = \Phi_K + (-1)^j \{ Q_{sj} + Q_{mi} \} / C_d + 2 \Phi_j - (\text{sign} \Phi_j) F_T \ln[1 + (Q_s + Q_{mi})^2 / Q_i^2] \}. \quad (14)$$

Полученные соотношения позволяют сделать некоторые выводы о принципиальном отличии характеристик паразитных ПДП-транзисторов от характеристик классических МДП-транзисторов.

Во-первых, без расчета зонной диаграммы при конкретных заданных значениях физических параметров совершенно не очевидно, в каком состоянии будут находиться полупроводниковые области. Соответственно, неоднозначен выбор формул для определения порогового напряжения, используемого в компактной модели.

Во-вторых, при изменении напряжений между стоком и затвором ПДП-транзистора возможен переход затвора из одного состояния в другое (обогащение — обеднение — инверсия) и соответствующее этим переходам изменение порогового напряжения. Таким образом, понятие порогового напряжения для компактной модели становится неопределенным и требует дальнейшего подробного рассмотрения.

В-третьих, приложенное напряжение в ПДП-структуре распределяется не на двух как в МДП, а

на трех областях. При этом, например, в случае обеднения области затвора и инверсии в области канала изменение приложенного напряжения будет в основном приходиться на область затвора. В результате этого модуляция проводимости канала ПДП-транзистора будет существенно меньше, чем для транзистора с высоколегированным затвором.

Заключение

Рассмотрены особенности обеспечения радиационной стойкости КМОП КНИ-транзисторов. Показано, что для создания компактных моделей, учитывающих воздействие на область канала заряда в скрытом оксиде и потенциала на подложке, необходим анализ полевого взаимодействия в ПДП-структуре "карман транзистора — скрытый оксид — подложка". Представлена разработанная модель ПДП-структуры, позволяющая осуществлять аналитическую оценку зонной диаграммы и значения пороговых напряжений и напряжений плоских зон. Полученные соотношения могут стать основой для создания уточненных компактных моделей паразитных ПДП-транзисторов в технологии КМОП КНИ и обеспечить более точный анализ работоспособности микросхем в зависимости от накопленной дозы ионизирующего излучения. Доказательство возможности и однозначности представления заряда в диэлектрике ПДП-структуры путем определения двух эффективных поверхностных зарядов также обеспечивает возможность учета в компактной модели паразитного ПДП-транзистора кинетики накопления заряда при воздействии ионизирующего излучения.

Список литературы

1. Юдинцев В. Радиационно-стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на земле // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2007. № 5. С. 72—77.
2. Селецкий А. В., Шелепин Н. А. Эволюция конструктивно-технологических методик повышения радиационной стойкости КМОП СБИС // Радиопромышленность. 2012. № 3. С. 46—47.
3. Горбунов М. С. Проектирование и моделирование элементов КНИ КМОП СБИС с повышенной стойкостью к дозовым эффектам космического пространства: дисс. ... канд. техн. наук. М., МИФИ, 2010.
4. Шелепин Н. А. Некоторые особенности ВФХ структур полупроводник — диэлектрик — полупроводник // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1990. Вып. 5 (139). С. 49—56.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Ч. 1. М.: Мир, 1984. 436 с.
6. Кобболт Р. Теория и применение полевых транзисторов: пер. с англ. Л.: Энергия, 1975. 304 с.

PHYSICAL FOUNDATIONS FOR MODELING OF THE PARASITIC ELEMENTS OF SOI CMOS VLSI

Problems of radiation resistance of VLSI elements for space equipment are very urgent and their solution is important for an efficient supply of the space instrument industry with highly reliable modern microcircuits. The authors considered the specific features of CMOS elements of VLSI for silicon-on-insulator (SOI) technology. They demonstrated that for CMOS elements the main problem is their resistance to an accumulated dose of the ionizing radiation. They presented physical and mathematical model of the field interaction in the "semiconductor—insulator—semiconductor" structure between the pockets of MOS transistors and a carrier substrate. The model takes into account the kinetics of a charge accumulation in a hidden insulating oxide.

Keywords: CMOS transistor, SOI, cosmic radiation, accumulated ionizing dose, radiation resistance, SIS-structure, transistor model

Introduction

Radiation resistance of integrated circuits is an important condition for creation of the systems for space applications [1]. Radiation in space is caused by presence of the particles and the ionizing radiation (IR) in the solar system and radiation of different sources outside of it. Accordingly, a lot of scientific articles, conference papers and dissertations are devoted to the issues of ensuring of the radiation resistance (RS). For example, the theses on the topic "Methods and tools for evaluation and prediction of the radiation resistance (... for some type of a chip ...)" become regularly defended in Moscow Engineering and Physics Institute (MEPI). However, the great majority of these studies was devoted to research and prediction of radiation resistance of the final products. There are much smaller research of radiation resistance of the element base, since in this case, it needs joint work of technologists and developers, who are able to design and manufacture special test crystals with the desired set of elements, and researchers, who have the means of radiation affection and measurement of characteristics of the elements. Obviously, that the radiation resistant circuit could not be obtained without high radiation resistance of the individual IC elements.

Sufficiently detailed description of structural and technological ways to improve radiation resistance of CMOS VLSI components based on technology of the "bulk" silicon and "silicon on insulator" (SOI) is presented in [2]. It is the important conclusion that follows from this analysis should be specially emphasized. Use of SOI technology does not mean the automatically obtainment of a high radiation resistance. For the technological level of 180 nm, the changes of the threshold voltages of transistors at the dose effect of ionizing radiation become insignificant due to the very small thickness of the gate dielectric, at least for digital circuits. Therefore, the main issues of achieving of a high radiation resistance on the accumulated dose for technology on bulk silicon become intratransistor leakage currents along the relatively thick oxide layer of the side dielectric isolation and intertransistor leakage currents "under" this layer. Use of the "ring" transistors and guard rings for bulk silicon practically solves this problem. In SOI technology, the problem of intertransistor leakage solves automatically, but a problem of intratransistor leakage in *n*-MOS transistors arises due to accumulation of the positive charge and inversion of the conductivity in the region adjacent to the hidden oxide in the latent oxide, which

leads to an unacceptable increase in the leakage current in the transistors. In particular, [3] is devoted to the issue of modeling of these effects for SOI CMOS technology. However, a detailed physical examination of the field interaction in the structures "semiconductor—insulator—semiconductor" (SIS), which are formed by a carrier body, hidden oxide and by the "body" (pocket) of the transistors, was not provided in the work. A model of a SIS structure developed is by the author of this article is presented below [4], which can be the basis for compact models of parasitic SOI-transistors or specification of BSIM SOI models' parameters.

Description of the model of SIS-structure

Fig. 1 shows the integrated structure of the SOI transistors. There are two types of SIS structures become formed: "*n*-type pocket — hidden oxide — substrate" and "*p*-type pocket — oxide hidden — substrate". SIS structures in the drain-source region stay not considered, since the silicon in these areas becomes a degenerate semiconductor.

A well-known theory of metal—insulator—semiconductor structures (MIS-structures) [5] was adopted as a basis for development of the model. Fig. 2 shows the band diagram for the structure "*n*-type semiconductor — insulator — *p*-type semiconductor" with the absence and presence of an external potential difference between the semiconductor regions. The value of the bands bending at the interface will depend on the same parameters as for the MIS-structure — the contact potential difference, the thickness of the dielectric, the charge in the dielectric (including a charge of surface states) and the applied voltage. The principal difference from the MIS-structure are presence of the bands bending and change in the potential from both sides of the dielectric, as well as the impact of the charge in the insulator on the both semiconductor's regions.

The following conditions similar to those adopted in the classical literature on the physics of semiconductor devices [5] should be set to obtain the structure's model:

- the size of the semiconductor's regions are larger than the maximum possible areas of depletion in them; the current transfer through the insulator is absent at a constant bias;
- only the surface charges of the semiconductor's regions may be for any displacements in the structure, i.e. their space-charge regions (SCR), and the charge in the insulator, including the charges of surface states (SS), which algebraic sum is equal to zero.

Let's consider the legend used in the work and partially shown in fig. 1. The sign attached to the structure of the external potential difference U will be determined assuming on the fact that the voltage U becomes applied to the region II relatively to the region I (i.e. the positive values of U will be shift the band diagram of the region II down relatively to the band diagram of the region I, and inversely). The contact potential difference will be defined as the difference between the Fermi potentials $\Phi_C = \Phi_1 - \Phi_2$, where Φ_1 and Φ_2 — the potential difference of the corresponding Fermi levels and the middle of band gap $\Phi_j = (\text{sign} N_j) F_T \ln |N_j/n_i|$, j — number of a semiconductor region (I or II); N_j — resulting concentration of an impurity in the semiconductor region; n_i — an own concentration of carriers in the semiconductor; F_T — thermodynamic potential.

It is obvious that the state of plane zones will occur in both semiconductor regions in the case of $U = \Phi_K$ at the chosen legend and absence of charge in the dielectric.

To calculate the band diagram and to determine the surface states in the semiconductor regions, the Poisson equation must be solved for the entire structure, which in this case can be written as:

for semiconductor regions

$$d^2 F(x)/dx^2 = -(q/\epsilon_s)\{N_j - 2n_i \text{sh}[(F(x) - U_j)/F_T]\}; \quad (1)$$

for dielectric

$$d^2 F(x)/dx^2 = -R(x)/\epsilon_d, \quad (1a)$$

where $R(x)$ — the distribution function of the charge density in the dielectric, including SS; ϵ_s and ϵ_d — dielectric permittivity for semiconductor and insulator, respectively; $j = 1$ for area I and $j = 2$ for area II; $U_1 = 0$; $U_2 = U$. The boundary conditions for solution of (1) are determined from the electrical neutrality in the depths of the semiconductor regions:

$$F(x_1) = \Phi_1; \quad F(x_2) = \Phi_2 + U, \quad \text{i.e.} \quad F(x_j) = \Phi_j + U_j, \quad (2)$$

where x_1 and x_2 — SCR border in semiconductor regions I and II, respectively.

Let us assume that the charge in the dielectric is focused on the interfaces and the equivalent values of its surface density are Q_{s1} and Q_{s2} . Then, considering that the electric field is constant in the dielectric and applying Gauss theorem to the interface, let's define the system of equations connecting the surface potentials F_{s1} , F_{s2} and the field E_{s1} , E_{s2} with the parameters of the structure:

$$\epsilon_s(E_{s2} - E_{s1}) = Q_{s1} + Q_{s2} = Q_s; \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} F_{s1} - F_{s2} &= E_d h = \\ &= [\epsilon_s(E_{s1} + E_{s2}) + Q_{s1} - Q_{s2}]/(2C_d), \end{aligned} \quad (3b)$$

where C_d — specific capacitance of the dielectric; E_d — field in the dielectric; h — thickness of the dielectric.

Thus, the equations (3), defining the relationship between the desired function $F(x)$ and its derivative $E(x) = -F(x)/dx$ at the interfaces, become those "matching" conditions for solving of the Poisson equation (1) in the semiconductor regions. Integration of equation (1) gives the four constants (two for each semiconductor region), to determine which there are two boundary conditions (2) and two matching conditions (3).

For evidence of the unequivocal charge in the dielectric by means of two effective surface charges it is necessary to de-

termine whether there is a correlation between Q_{s1} , Q_{s2} and $R(x)$, in which the relationship between the surface potential and the fields upon exposure of the distributed charge $R(x)$ will be the same, as in (3). Obviously, that one of the relations follows from the Gauss theorem, which is expressed in formula (3) for the entire dielectric:

$$Q_{s1} + Q_{s2} = Q_s = \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} R(x) dx, \quad (4)$$

where x_{d1} , x_{d2} — coordinates of the dielectric's borders.

Specifying of the relationship between the difference in surface potentials and the field in the dielectric and expressing the dependence of the field in the dielectric by simple transformations, we obtain the following expression:

$$\begin{aligned} F_{s1} - F_{s2} &= \left\{ \epsilon_s(E_{s1} + E_{s2}) + \right. \\ &+ (1/h) \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} \left[\int_{x_{d1}}^x R(x') dx' - \int_x^{x_{d2}} R(x') dx' \right] dx \left. \right\} / (2C_d), \end{aligned} \quad (5)$$

where $h = x_{d2} - x_{d1}$ — thickness of the dielectric.

Comparing (5) and (3b), we can find the second desired relation:

$$\begin{aligned} Q_{s1} - Q_{s2} &= \Delta Q_s = \\ &= (1/h) \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} \left[\int_{x_{d1}}^x R(x') dx' - \int_x^{x_{d2}} R(x') dx' \right] dx. \end{aligned} \quad (6)$$

Performing transformations, from (4) and (6) we obtain:

$$Q_{s1} = 1/h \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} \left[\int_{x_{d1}}^x R(x') dx' \right] dx; \quad (7a)$$

$$Q_{s2} = 1/h \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} \left[\int_x^{x_{d2}} R(x') dx' \right] dx. \quad (7b)$$

These relationships define the relation between an arbitrary distributed charge in the dielectric and two surface charges equivalent by the field action on the semiconductor fields.

Taking the integrals in (7) by parts, using the inner integral expression as one of the functions and performing transformations, we obtain the known expressions for the effective surface charges:

$$Q_{s1} = (1/h) \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} (x_{d2} - x) R(x) dx; \quad (7c)$$

$$Q_{s2} = (1/h) \int_{x_{d1}}^{x_{d2}} (x - x_{d1}) R(x) dx. \quad (7d)$$

Expression (7d) was obtained by a different method for MIS structures [6], which confirms the correctness of the made assumptions.

Analytical solution of the Poisson equation (1) for impoverishment conditions, enrichment and inversion in semiconductor regions leads to the dependences:

a) at impoverishment:

$$F_j(x) = \Phi_j + U_j - (qN_j/2\epsilon_s)(x - x_j)^2, \quad (8)$$

where x_j — a coordinate of SCR border in the semiconductor region ($j = 1$ or 2);

b) at enrichment

$$F_j(x) = \Phi_j + U_j + (\text{sign}\Phi_j)F_T \ln\{1 + \text{tg}^2[(x_j - x)/L_{Dj}]\}, \quad (9)$$

where $L_{Dj} = \sqrt{2F_T\epsilon_s/(qN_j)}$ — Debye length of the relevant region; at inversion:

$$F_j(x) = -\Phi_j + U_j + (\text{sign}\Phi_j)F_T \ln[A(x)], \quad (10)$$

$$A(x) = \text{sh}^2[Z_j(x'_j - x)/L_{Dj}],$$

where $Z_j = \sqrt{2|\Phi_j|/F_T - 1}$, and the parameters x'_j are determined from the conditions (3), after that the coordinates of the boundaries of strong inversion x_j can be determined by "matching" of solutions for strong inversion regions and the subsequent impoverishment regions:

$$x_j = x'_j + (-1)^j L_{Dj} [\ln(\sqrt{2|\Phi_j|/F_T} - Z_j)/Z_j].$$

The resulting solutions of Poisson's equation give expressions for the flat-band voltages and threshold voltages of SIS-structures by analogy with the classical formulas for MIS-structures.

Substituting in (8) the condition of the flat-bands in one area $F_{sj} = F_j + U_j$ through the "matching" equation (3), determine the flat-bands voltage in it at impoverishment of the other:

$$U_{FBj} = \Phi_k + (-1)^j [Q_{sj}/C_d - 2\Phi_i(Q_s/Q_{mi})^2]. \quad (11)$$

Similarly, determining the condition of strong inversion as $F_{sj} = -F_j + U_j$, we obtain an expression for the threshold voltage in one of the semiconductor regions at impoverishment of the other:

$$U_{0j} = \Phi_k + (-1)^j \{Q_{sj}/C_d + 2\Phi_i(1 - N_j/N_i) - 2\Phi_i(Q_s/Q_{mi})^2 + (Q_{mj}/C_d)[1 - \Phi_i(4C_dQ_s/Q_{mi})]\}, \quad (12)$$

where $i = 3 - j$ — the index, corresponding to the opposite semiconductor region; $Q_{mi} = (\text{sign}N_i)2\sqrt{q\epsilon_s N_i \Phi_i}$ — SIS charge in the i -th region at its maximum size, i.e. at transition into inversion state.

Expressions (11) and (12) contain the terms corresponding to the same formulas for MIS-structures, and under accomplishment of the conditions $|N_j/N_i| \ll 1$ and $|Q_s/Q_{mi}| \ll 1$, which is provided at, for example, high concentrations of impurities in the i -th region (i.e., in the gate), coincide with them completely. The remaining terms reflect presence of the bands bending in the gate region. The expression for flat-bands in case of enrichment in the gate area is similarly defined from equation (10):

$$U_{FBj} = \Phi_k + (-1)^j \{Q_{sj}/C_d + (\text{sign}\Phi_i)F_T \ln[1 + (Q_s/Q_i)^2]\}, \quad (13)$$

where $Q_i = qN_i L_{Di}$.

The equations (8) for one area and (9) for other area allow to determine the threshold voltage in case of enrichment in the gate area, which is typical for semiconductors of one of the conductivity type:

$$U_{0j} = \Phi_k + (-1)^j \{Q_{sj} + Q_{mj}\}C_d + 2\Phi_j - (\text{sign}\Phi_i)F_T \ln[1 + (Q_s + Q_{mi})^2/Q_i^2]. \quad (14)$$

The relations allow us to make some conclusions about the fundamental difference between the characteristics of parasitic SIS-transistors from classic MIS-transistors.

Firstly, it is not evident in which state the semiconductor region will be without the calculation of the band diagram under the specific set of physical parameters. Accordingly, the choice of formulas for determining of the threshold voltage in a compact model is ambiguous.

Secondly, transition of a gate from one state to another (enrichment — impoverishment — inversion) at voltage change between the drain and gate of the SIS-transistor and the corresponding change in the threshold voltage are possible. Thus, the concept of the threshold voltage for the compact model becomes uncertain and requires further consideration.

Thirdly, the voltage applied in the SIS-structure divides not on two as for MIS-structure, but on three areas. Thus, for example, in the case of impoverishment of the gate region and inversion in the channel region, a change of the applied voltage mainly occurs in the gate region. As a result, modulation of conductivity of channel of the SIS-transistor will be significantly less than for a transistor with highly-alloyed gate.

Conclusion

The features of provision of the radiation resistance of CMOS SOI transistors were reviewed. It was shown that creation of the compact models that take into account the impact of the charge in the hidden oxide and the potential on the substrate on the channel region needs analyzing of the field interaction in the SIS-structure "transistor's pocket — hidden oxide — substrate". The model of SIS-structure that allows to analytically evaluate the band diagram, threshold voltages and flat-band voltages was presented. The resulting ratios may become the basis for creation of refined compact models of parasitic SIS-transistors by CMOS SOI technology and provide more accurate analysis of chips' performance, depending on the accumulated dose of ionizing radiation. The evidence of the representation uniqueness of the charge in the dielectric of SIS-structure by determination of two effective surface charges also provides possibility to take into account the parasitic SIS-transistor of kinetics of charge accumulation in a compact model under action of ionizing radiation.

References

1. **Judincev V.** Radiacionno-stojkie integral'nye shemy. Nadejnost' v kosmose i na zemle. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes*. 2007. N. 5. P. 72—77.
2. **Seleckij A. V., Shelepin N. A.** Jevoljucija konstruktivno-tehnologicheskikh metodik povyshenija radiacionnoj stojkosti KMOP SBIS. *"Radiopromyshlennost"*. 2012. N. 3. P. 46—47.
3. **Gorbunov M. S.** Proektirovanie i modelirovanie jelementov KNI KMOP SBIS s povyshennoj stojkost'ju k dozovym jeffektam kosmicheskogo prostranstva. Dis. ... kand. tehn. nauk. Moskva, MIFI, 2010.
4. **Shelepin N. A.** Nekotorye osobennosti VFH struktur poluprovodnik — dijelektrik poluprovodnik. *Elektronnaja tehnika. Seriya 3 Mikroelektronika*. 1990. N. 5 (139). P. 49—56.
5. **Zi S.** *Fizika poluprovodnikovyx priborov*. Part. 1. M.: Mir, 1984. 436 p.
6. **Kobbolt R.** *Teorija i primenenie polevyh tranzistorov*: per. s angl. L.: Jenergija, 1975. 304 p.

Суханов В. С., начальник НИЛ ММЭА, Гусев Д. В., ст. науч. сотр.,
Литвиненко Р. С., мл. науч. сотр., e-mail: R. Litvinenko@tcen.ru,
Научно-производственный комплекс "Технологический центр" МИЭТ

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОЙ МАТРИЦЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАВЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 20.10.2014

Описаны разработка и исследование тензорезистивных матриц чувствительных элементов давления, изготовленных по технологии объемной микрообработки кремния. Матрица предназначена для использования в составе аппарата тактильной диагностики для минимально инвазивной хирургии.

Ключевые слова: тактильный датчик, МЭМС, минимально инвазивная хирургия

В настоящее время технологии тактильного восприятия находят обширное применение в медицине и робототехнике. Для применения в качестве тактильных датчиков наиболее подходят МЭМС-устройства, так как они способны дать конкурентные преимущества благодаря возможности их серийного изготовления, миниатюрным размерам и расширенным функциональным возможностям. В медицине наблюдается возрастающая тенденция по включению МЭМС-устройств в состав хирургических инструментов. МЭМС-технологии позволяют хирургам получать информацию о плотности и температуре исследуемой ткани в режиме реального времени. Кроме того, МЭМС-технологии позволяют использовать более эффективные и быстрые методы захвата, резки и извлечения тканей, тем самым улучшая результаты хирургического лечения [1].

При открытых операциях хирург имеет свободный доступ к органам и тканям и может свободно ими манипулировать. Однако во многих случаях разрез, позволяющий получить доступ к требуемой области, травмирует пациента в большей степени, нежели сама хирургическая операция.

В настоящее время методы минимально инвазивной хирургии (МИХ) стремительно развиваются, так как позволяют оператору (хирургу) не вступать в прямой контакт с внутренними органами пациента [2]. Значение МИХ трудно переоценить, поскольку при проведении операций не требуются большие разрезы, уменьшаются потери крови, сокращается период восстановления, снижается риск инфицирования, улучшаются косметические результаты.

Основную информацию о состоянии исследуемой ткани хирург получает с помощью осязания. Например, если опухоль скрыта в глубине здоровой ткани, обнаружить ее визуальными методами практически невозможно. В связи с этим для дальнейшего раз-

вития МИХ необходимо создание инструментов, позволяющих получать тактильную информацию.

В целях создания такого инструмента в НПК "Технологический центр" была разработана матрица чувствительных элементов давления для применения в составе аппарата тактильной диагностики, который предназначен для использования во время хирургических операций. Матрица — это кремниевый кристалл МИПД-7, на котором расположены семь интегральных преобразователей давления с мембраной толщиной 18 ± 3 мкм. Каждый преобразователь представляет собой тензорезистивный мост, который рассчитан на работу в диапазоне давлений 0...40 кПа, с чувствительностью 0,4...0,7 мВ/В/кПа. Технология изготовления МИПД-7 включает в себя 10 фотолитографических циклов, один из которых проводится по обратной стороне пластины [3]. Используя циклы объемной микрообработки кремния, удалось придать матрице габаритные размеры, необходимые для использования эндоскопа стандартного диаметра (10 мм). Матрица предназначена для преобразования локальных давлений в электрический сигнал, который в дальнейшем обрабатывается и представляется в удобной для восприятия форме.

С помощью программной системы конечно-элементного анализа ANSYS было проведено компьютерное моделирование кристалла МИПД-7. На основе разработанной модели [4] и параметров преобразователей был проведен расчет деформации мембран чувствительных элементов. На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) показано распределение деформации по оси Z в структуре кристалла при давлении 40 кПа и температуре +20 °С. Максимальное смещение происходит в центре мембраны и составляет 0,43 мкм. Конструкция кристалла позволяет минимизировать взаимное влияние соседних преобразователей под нагрузкой.

На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) представлено распределение интенсивности механиче-



Рис. 3. Общий вид электронного модуля МПДМ-7
Fig. 3. General view of MPDM-7 electronic module

ских напряжений по оси X в кристалле МИПД-7 при давлении 40 кПа и температуре +20 °С.

В целях проверки характеристик матрицы был изготовлен электронный модуль МПДМ-7 (рис. 3), в состав которого входят средства обработки выходного сигнала матрицы.

Матрица чувствительных элементов герметично соединяется с основанием, выполненным по технологии многослойных печатных плат. В основании предусмотрены отверстия для подачи давления. За кристаллом располагается переходная плата, которая служит промежуточным звеном между кристаллом и платой обработки сигналов. Кристалл и переходная плата защищены металлическим кожухом. Ниже представлены полученные в ходе экспериментальных исследований значения параметров преобразователей в составе матрицы:

Тип выходного сигнала	Аналоговый
Напряжение питания, В	5
Номинальный диапазон измерений, кПа	0...40
Выходной сигнал, мВ	55...65
Начальный разбаланс моста, мВ	±6
Коэффициент нелинейности при +20 °С, %	0,07
Температурный коэффициент смещения нуля, %/10 °С	0,11
Температурный коэффициент чувствительности, %/10 °С	0,21

Данные, полученные при компьютерном моделировании, близки к экспериментальным значениям.

Современные тенденции указывают на то, что наиболее продвинутые технологии компоновки электронных компонентов, например, 2,5D-интерпомеры или 3D-интегральные схемы, так или иначе сводятся к flip-chip-монтажу [5]. Все внешние выводы МИПД-7 располагаются на лицевой стороне кристалла, что не только позволяет использовать технологию flip-chip монтажа, но и избежать влияния внешних воздействий при функционировании устройства на межсоединения кристалла.

Дальнейшие исследования будут направлены на улучшение и совершенствование технологии тактильной диагностики, в частности, на увеличение плотности чувствительных элементов давления в составе матриц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта № 14.577.21.0112 (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57714X0112). Работа проводилась с использованием оборудования ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический центр".

Список литературы

1. **Rebello K. J.** Applications of MEMS in Surgery // Proc. IEEE. 2004. V. 92. P. 43—55.
2. **Preusche C., Ortmaier T., and Hirzinger G.** Teleoperation concepts in minimal invasive surgery // Control Eng. Practice. 2002. V. 10. P. 1245—1250.
3. **Амеличев В. В., Буданов В. М., Гусев Д. В., Михайлов Ю. А., Соколов М. Э., Суханов В. С., Тихонов Р. Д.** Конструкция и технология создания матриц преобразователей давления для эндоскопических тактильных датчиков // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 11. С. 27—30.
4. **Суханов В. С., Панков В. В., Годовицын И. В., Михайлов Ю. А., Данилова Н. Л., Земляникова Н. С.** Тензорезистивный кремниевый МЭМС-преобразователь давления мембранного типа // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 36—37.
5. **Beica R.** Flip Chip Market and Technology Trends // EMPC. 2013. September 9—12. Grenoble. France.

V. S. Sukhanov, Head of NIL MMEA, **D. V. Gusev**, Senior Researcher,
R. S. Litvinenko, Junior Researcher: R. Litvinenko@tcen.ru
 MIET Technological Centre, Scientific-industrial Complex

Crystal Modeling of the Tensoresistive Matrixes of the Sensitive Pressure Elements

The work describes R & D of the tensoresistive matrixes of the sensitive elements of pressure manufactured in accordance with the technology of volume microprocessing of silicon. The matrix is intended for use as a part of the devices for the tactile diagnostics of the minimally invasive surgery.

Keywords: tactile sensor, MEMS, minimally invasive surgery

Technologies of tactile sensing find their application in medicine and robotics. For tactile sensors MEMS devices are the most appropriate. They can ensure competitive advantages thanks to their possible batch production, tiny dimensions and expanded opportunities. In medicine a trend is observed for incorporation of MEMS devices in the surgical tools. MEMS technologies allow surgeons to obtain information on the density and temperature of an investigated tissue in a real time mode. Besides, MEMS technologies ensure more effective and fast methods for capture, cutting and extraction of tissues, improving the results of the surgical treatment [1].

In open operations a surgeon gets an access to the organs and tissues and can manipulate them freely. However, in many cases a cut, providing an access to the required area, can injure a patient more than the operation itself.

Methods of the minimally invasive surgery (MIS) are now rapidly developing because they allow a surgeon not to come into a direct contact with the internal organs of a patient [2]. The importance of MIS can hardly be overestimated, because an operation with their application does not require big cuts, the loss of blood and risk of infection are lower, rehabilitation period is shorter, and the cosmetic results are better.

A surgeon receives information concerning the condition of an investigated tissue mainly by means of a touch. For example, if a tumor is hidden in the depth of a healthy tissue, it is practically impossible to detect it visually. In this connection in order to advance MIS we have to develop tools, allowing us to obtain the tactile information.

For this purpose NPK Technological Centre developed a matrix of sensitive pressure elements for a device of tactile diagnostics for use in surgical operations. The matrix is MIPD-7 silicon crystal, on which seven integrated pressure converters with $18 \pm 3 \mu\text{m}$ -thick membranes are located. Each converter is a tensoresistive bridge intended for operation at pressures of 0...40 kPa with sensitivity of 0,4...0,7 mV/V/kPa. Manufacture of MIPD-7 includes 10 photolithographic cycles, one of which is done on the reverse side of a plate [3]. Due to volume microprocessing of silicon, it became possible to make a matrix of the dimensions, necessary for application of an endoscope of a standard diameter (10 mm). The matrix is intended for transformation of the local pressures into the electric signals processed further and presented in a form, convenient for perception.

By means of ANSYS program system of final-element analysis a computer modeling of MIPD-7 crystal was done. On the basis of the model [4] and parameters of the converters the deformation of the membranes of the sensitive elements was calculated. Fig. 1 (look at the figure on the 2-nd page of the cover) demonstrates its distribution on axis Z in the crystal structure at pressure of 40 kPa and 20 °C. The maximum displacement of 0,43 μm occurs in the membrane centre. The design allows us to minimize the mutual influence of the neighboring converters under loading. Fig. 2 (look at the figure on the 2-nd page of the cover) presents distribution of the intensity of the mechanical stresses on axis X in MIPD-7 crystal at pressure of 40 kPa and 20 °C.

With a view to check the matrix characteristics, MPDM-7 electronic module (fig. 3) was made, the structure of which includes means for processing of the output signal of the matrix.

The matrix of the sensitive elements is tightly connected to the basis made by technology of the multilayered printed-circuit boards. In the basis there are apertures for a pressure supply. Behind the crystal is a transition board, an intermediate link between the crystal and the board for signal processing. The crystal and the transition board are protected by a metal case. The Table below presents the parameters of the converters within the structure of the matrix obtained during the investigation:

Type of the output signal	Analog
Supply voltage, V	5
Specified measuring range, kPa.	0...40
Output signal, mV.	55...65
Initial unbalance of the bridge, mV.	± 6
Nonlinearity factor at +20 °C, %	0,07
Temperature coefficient of displacement of zero, %/10 °C.	0,11
Temperature coefficient of sensitivity, %/10 °C	0,21

The data obtained as a result of computer modeling are close to the experimental values.

The trends demonstrate that the most advanced technologies for configuration of the electronic components, for example, 2,5D interposers or 3D integrated schemes, boil down to a flip-chip assembly [5]. All the external terminals of MIPD-7 are situated on the crystal's face, which allows us to use the technology of the flip-chip assembly and avoid the external influences on the crystal interconnections during operation of the device.

The aim of the further research works will be perfection of the tactile diagnostics technology, in particular, increase of the density of the sensitive pressure elements in a matrix.

The work was done with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state contract № 14.577.21.0112 (unique identifier of applied scientific research RFMEFI57714X0112). The work was implemented with the use of equipment of TsKP Functional Control and Diagnostics of Micro- and Nano-system Technologies, based on NPK Technological Center.

References

1. **Rebello K. J.** Applications of MEMS in Surgery. *Proc. IEEE*. 2004. V. 92. P. 43–55.
2. **Preusche C., Ortmaier T., and Hirzinger G.** Teleoperation concepts in minimal invasive surgery. *Control Eng. Practice*. 2002. V. 10. P. 1245–1250.
3. **Amelichev V. V., Budanov V. M., Gusev P. V., Mikhailov Yu. A., Sokolov M. E., Sukhanov V. S., Tikhonov R. D.** Konstrukcija i tehnologija sozdaniya matric preobrazovatelej davlenija dlja jendoskopicheskikh taktil'nyh datchikov. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2012. V. 11. P. 27–30.
4. **Sukhanov V. S., Pankov V. V., Godovitsyn I. V., Mikhailov Yu. A., Danilova N. L., Zemlyannikov N. S.** Tensoresistive Tenzorezistivnyj kremnievyj MJeMS-preobrazovatel' davlenija membrannogo tipa. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2011. V. 12. P. 36–37.
5. **Beica R.** Flip Chip Market and Technology Trends. *EMPC*. 2013. September 9–12. Grenoble. France.

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

УДК 519.6; 530.51

Н. А. Аржанова¹, аспирант, e-mail: natarzhanova@mail.ru,

А. В. Проказников², доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: prokaznikov@mail.ru

¹ Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

² Ярославский филиал физико-технологического института РАН

САМООРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХОДЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ

Поступила в редакцию 15.12.2014

Представлены экспериментальные и теоретические данные, которые свидетельствуют о наличии процессов самоорганизации в системе электролит/полупроводник. Эти процессы выражаются как в различной динамике протекания анодирования в зависимости от параметров процесса, так и в формировании фрактальных пористых кластеров в конечном результате, в том числе и на наномасштабах. Разработаны аналитические модели, описывающие все перечисленные явления.

Ключевые слова: самоорганизация, пористый кремний, бифуркация, фрактальные свойства, наноразмерные кластеры, анодирование полупроводников

Введение

Принцип самоорганизации является одним из общих, базовых положений в объяснении фундаментальных аспектов современного мироустройства [1, 2]. Подобные вопросы общего характера возникают и при исследовании направления развития процессов трансформации структуры поверхности и объема твердых тел при их взаимодействии с химически активными средами, что находит свое применение при наноструктурной модификации свойств поверхности и объема электронных систем. Эти вопросы касаются характерного отклика системы на внешнее воздействие, выражающееся либо в формировании структур пониженной размерности с различной морфологией, либо наличия режима электрополировки, а также смены различных динамических режимов анодирования и др. Важным аспектом для нано- и микроэлектроники является понижение размерности пространства при химическом и электрохимическом воздействии активных сред на ряд твердотельных соединений. Этими соединениями являются вещества, обладающие как металлическими, так и полупроводниковыми свойствами. В подобных соединениях возможно протекание химических либо электрохимических реакций, приводящих к формированию

пористого пространства [3, 4]. Характерными особенностями отмеченных выше процессов являются, во-первых, протекание реакций через поверхность раздела двух сред, и, во-вторых, изменение зарядовых состояний веществ, находящихся в контакте. Изменение зарядового состояния системы может быть, следовательно, своеобразным индикатором активации определенного рода процессов. Технологически освоенной к настоящему времени системой такого рода является пористый кремний (ПК), различным аспектам формирования и использования которого посвящена многочисленная научная литература (обзоры [3–5]). Несмотря на большое количество научной литературы, посвященной исследованию различных аспектов проблемы реакции системы на внешнее воздействие понижением размерности одного из компонентов сложной системы и развитием поверхности раздела, окончательного, общепринятого решения всех теоретических моментов этих явлений к настоящему времени не существует. Одним из таких нерешенных моментов является процесс синхронизации элементарных актов, составляющих процесс анодирования кремния в растворах плавиковой кислоты. В целом ряде работ было продемонстрировано наличие режимов анодирования, сопрово-

ждающихся периодическими изменениями динамических параметров системы, например тока и напряжения [6—11]. Кроме того, процессы самоорганизации, выражающиеся в периодическом изменении тока и напряжения, наблюдались в сенсорных системах на основе низкоразмерных систем, а также пористого кремния. Эти факты свидетельствуют о влиянии процессов, протекающих вблизи границы раздела сред, на формирование совокупного отклика системы в ходе динамического изменения структуры фронта модификации твердотельной составляющей.

Одним из аспектов, вызывающих неизменный интерес при исследовании свойств ПК, является изучение фрактальных характеристик сформированных пористых структур. Это может свидетельствовать о наличии универсального фрактального механизма формирования пористого пространства, о чем упоминалось в работе [12]. В работе [13] представлена геометрическая модель пористого кремния, которая основана на фрактальных построениях. Результаты модели [13] сравниваются с оптическими измерениями, свидетельствующими о согласии экспериментальных и теоретических построений для p -типа кремния. В работе [14] на основе экспериментальных исследований водородного покрытия нанопористого кремния p -типа сделан вывод о фрактальной природе сформированной пористой поверхности. Разработана также фрактальная модель, описывающая морфологию сформированных нанокристаллитов, которая имеет фрактальную размерность 2,1...2,4.

В настоящей работе рассматривается общий подход получения пористого кремния с фрактальными свойствами методом анодного травления без создания специальных затравок. Это позволяет понять возникающие процессы самоорганизации как в общей реакции системы, так и в поведении динамических параметров, управляющих всей системой, в том числе и отдельными ее компонентами.

Экспериментальные данные по колебательным процессам при анодировании кремния и свойства приграничного слоя

Исследование поперечных сколов пористых структур позволило обнаружить закономерность, связанную с периодическим изменением параметров системы кремний — электролит в ходе анодирования: толщина стенок пор периодически меняется с глубиной в соответствии с аналогичным изменением параметров системы с течением времени. Эти закономерности подробно описаны в работах [9—11]. Фотография подобной структуры с периодически изменяющимся профилем пористых каналов приведена на рис. 1.

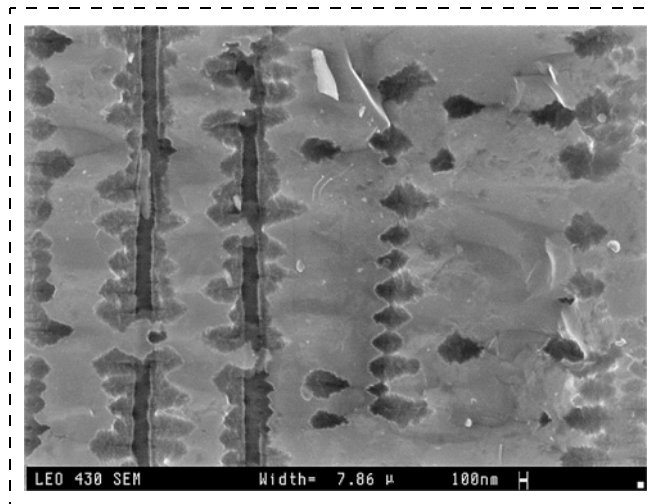


Рис. 1. Периодические изменения пористой структуры вдоль каналов пор

Fig. 1. Periodic changes of the pore structure along the pores' channels

Отметим, что цепочка электрохимических реакций в кремнии, соответствующая реакциям порообразования, не является окончательно установленной к настоящему времени. В работе [15] (см. также [3, 4, 16]) предложена наиболее общепринятая модель последовательного фторирования поверхности. Эта модель базируется на теории, развитой в работе [17].

Исследование свойств интерфейса системы электролит — полупроводник с точки зрения импеданса для процессов порообразования представлено в работе [18]. В этой работе отмечается, что режим порообразования характеризуется наличием одной петли, имеющей отрицательную часть зависимости, а промежуточный режим — наличием двух петель, причем одна из них не имеет отрицательной части зависимости. Электрополировка характеризуется наличием двух петель без отрицательной части зависимости [18]. Это может трактоваться как формирование слоя со специфическими свойствами на поверхности кремния. Приповерхностный заряд в этом слое определяется емкостными свойствами импеданса, а частотные зависимости позволяют выявить специфические частоты, которые характеризуют динамику зарядки зарядовых центров. Формирование диэлектрической пленки приводит к наличию поверхностных состояний — "быстрых" на границе пленки с полупроводником и "медленных" на границе пленки с электролитом.

В динамику обмена носителями заряда между двумя различными средами вносят свой вклад поверхностные состояния. Они могут формироваться при образовании поверхностного диэлектрического слоя сложного состава в ходе электрохимических реакций порообразования, о чем свидетельствуют исследования ИК спектров [12]. ИК спектры свидетельствуют о наличии Si—H, O—Si—H,

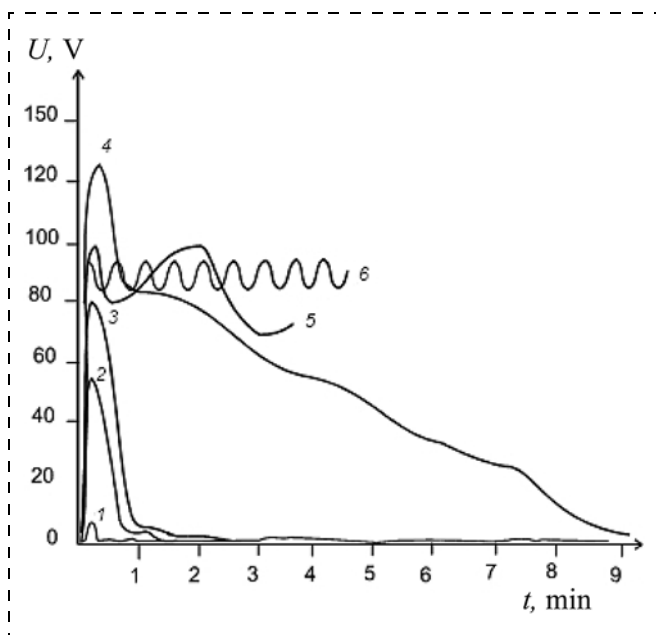


Рис. 2. Зависимости напряжения U в системе электролит — кремний n -типа от времени t , снятые в ходе анодирования при различных условиях для раствора электролита, состоящего из HF и ИПС в соотношении 1:1 по объему

Fig. 2. Dependence of U in the system "electrolyte — n -type silicon" on the time t , obtained at anodizing under various condition for the HF and IPA electrolyte solution in a ratio of 1:1 by volume

Si—O—Si и других связей в приповерхностной зоне пористого кремния [12]. Кроме того, фтор из электролита способен достаточно глубоко проникать в кремний под поверхность раздела сред [19]. Отметим, что аналогичное явление глубокого проникновения фтора в кремний наблюдается и при плазмохимическом травлении кремния во фторсодержащих соединениях [20]. Фтор также способен влиять на состояние приповерхностной диэлектрической пленки, модифицируя ее структуру. Обычно на внутренней поверхности диэлектрического слоя находятся "быстрые" поверхностные состояния, которые характеризуются временем захвата носителей заряда порядка $10^{-8} \dots 10^{-3}$ с. На внешней поверхности диэлектрического слоя присутствуют "медленные состояния" с большим временем захвата — от 10^{-3} с до нескольких часов. Проникающий глубоко в образец кремния фтор способен модифицировать приповерхностный слой и формировать центры захвата заряда внутри кремния [19]. В кинетику процессов в сенсорных структурах на основе ПК вносят свой вклад "медленные состояния". Динамика процессов порообразования и реакция сенсорных структур на основе ПК на воздействие атмосферы полярных молекул имеют много общего.

Перезарядка состояний может приводить к тому, что падение потенциала на диэлектрической пленке будет препятствовать проникновению заряда определенного знака через эту пленку. В этом

случае падение потенциала в пленке нужно взять с обратным знаком, что необходимо учесть в соответствующих уравнениях. Перезарядка поверхностных состояний подробно изучалась в работах [21, 22], в которых отмечалось, что появление осцилляционных явлений связано с направлением прохода ВАХ (вначале — от минуса к плюсу либо наоборот). Только в одном из этих случаев имеется участок с отрицательной дифференциальной проводимостью, где сила тока через систему уменьшается с увеличением напряжения. Этот участок связан с осцилляционными процессами для динамических переменных (рис. 2).

На рис. 2 кривая 1 отображает зависимость $U(t)$, соответствующую формированию ПК нулевого типа морфологии, кривая 2 отображает зависимость $U(t)$ для первого типа морфологии, кривая 3 — $U(t)$ для второго типа морфологии, кривая 4 — $U(t)$ для третьего типа морфологии. Зависимость $U(t)$ для раствора электролита, состоящего из HF и изопропанола (ИПС — изопропиловый спирт) в соотношении 1:3 по объему, отражена кривыми 5, 6, снятыми при различных условиях освещения анодируемого образца, причем зависимость 6 соответствует более высокой интенсивности освещения анодируемого образца по сравнению с зависимостью 5.

Согласно модели процессов электрохимического травления, предложенной в работе [15], с поверхностью раздела двух сред происходит обмен зарядами обоих знаков. Захват поверхностными состояниями носителей отрицательного знака (электронов) затрудняет их доставку к поверхности. Образуется несимметричный барьер, который препятствует проникновению заряженных реагентов к месту реакций, а также их равновесному движению. Этот факт обуславливает смену знака при падении потенциала $V_d = e\epsilon h$ (в единицах энергии, причем $V \equiv eU$, U — разность потенциалов в вольтах, e — заряд электрона) в диэлектрической пленке в члене, описывающем вероятность ухода в реакцию (τ_s^{-1}), ϵ — напряженность поля в диэлектрической пленке, h — толщина диэлектрической пленки. Вид ВАХ в этом случае для сенсорных структур на базе ПК совпадает с ВАХ для процесса анодирования кремния в растворах HF, которая представлена в работе [11]. На этих ВАХ осцилляциям предшествует участок с отрицательной дифференциальной проводимостью [11]. Динамика ВАХ для процесса анодирования кремния в растворах HF в зависимости от условий эксперимента при наличии осцилляций динамических параметров изучалась в работах [7–11] и представлена на рис. 2.

Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о наличии синхронных периодических процессов в системе кремний — электролит

на основе плавиковой кислоты. Эти процессы связаны с активным обменом заряженными компонентами между различными средами через поверхностные состояния. Свойства этих состояний могут радикальным образом меняться как под действием молекул (атомов) среды, так и при модификации самой поверхности, в частности, в процессе формирования тонкого диэлектрического слоя. Все эти факты способны существенным образом влиять на динамику протекающих в системе процессов.

Система уравнений для динамических переменных

Система уравнений, описывающая динамику протекающих в системе процессов, выглядит следующим образом:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{\Gamma_t - \Gamma}{\tau_A} - \frac{\Gamma}{\tau_d} - \frac{N}{\tau_s} + \rho h_p^{2/3} N; \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\Gamma - N}{\tau_T} - \frac{N}{\tau'_T} - \frac{N}{\tau_s} - \rho h_p^{2/3} N; \quad (2)$$

$$\frac{dh_p}{dt} = G - \rho h_p N - \mu h_p, \quad (3)$$

где $\tau_s = \tau_s^0 \exp\{(E_s - e\epsilon h)/k_B T\}$, $\tau_s^0 \approx 10^{-12}$ с — характерное время молекулярных колебаний; E_s — высота барьера; $E'_s = E_s - e\epsilon h$ — высота поверхностного барьера, изменяющаяся за счет возникновения в поверхностной пленке электрического поля; k_B — постоянная Больцмана; ρ , μ — соответствующие коэффициенты; Γ — суммарная поверхностная концентрация нейтральных и заряженных молекул (атомов, ионов); Γ_t — концентрация активных центров адсорбции (совпадающая с концентрацией ловушек); N — концентрация заряженных ионов (фтора); τ_A , τ_d — характерные времена адсорбции/десорбции нейтральных молекул (атомов); τ_s — время активационного преодоления (ухода) поверхностного барьера заряженной молекулой (ионом); τ_T и τ'_T — времена прямого и обратного туннелирования носителя заряда. Отметим, что согласно выводам работ [3, 4, 16, 17], активными атомами (ионами) являются, прежде всего, атомы фтора. При составлении уравнения пренебрегалось зарядом, сосредоточенным в пленке.

Уравнение (1) описывает кинетику прихода/ухода на поверхностные состояния нейтральных полярных молекул. В правой части уравнения (2) первое слагаемое есть число заряженных полярных молекул, образующихся в результате туннелирования электронов, второе слагаемое — число заряженных молекул, теряющих электрон в результате обратного процесса, третье слагаемое — поток заряженных молекул, покидающих поверхность активационным образом. Отметим, что теоретическая модель поверхностных процессов, основанная на уравнениях (1)–(3), достаточно хорошо работает для объяснения процессов травления кремния во фторсодержащей плазме, о чем свидетельствует анализ основных экспериментальных данных. Кроме того, имеет место соотношение $\epsilon = 4\pi e N/\epsilon_1$.

Для решения системы уравнений (1)–(3) их удобно обезразмерить. Решение системы уравнений (1)–(3) проводилось численно, причем экспонента в показателе величины $\tau_s = \tau_s^0 \exp\{(E_s - e\epsilon h)/k_B T\}$ раскладывалась в ряд по параметру $Y = e\epsilon h/k_B T$ до третьей степени включительно, где величина ϵ определялась формулой $\epsilon = 4\pi e N/\epsilon_1$. Знак при параметре Y в экспоненте заменялся на противоположный в связи с перезарядкой поверхностных состояний, физическая причина этого отмечалась выше. Решение представленной системы уравнений (1)–(3) для безразмерных переменных $x(\tau)$, $y(\tau)$, $z(\tau)$ при соответствующих значениях параметров представлено на рис. 3. Можно также трактовать переменную h_p , описывающую концентрацию дырок, как приповерхностную концентрацию, измеряе-

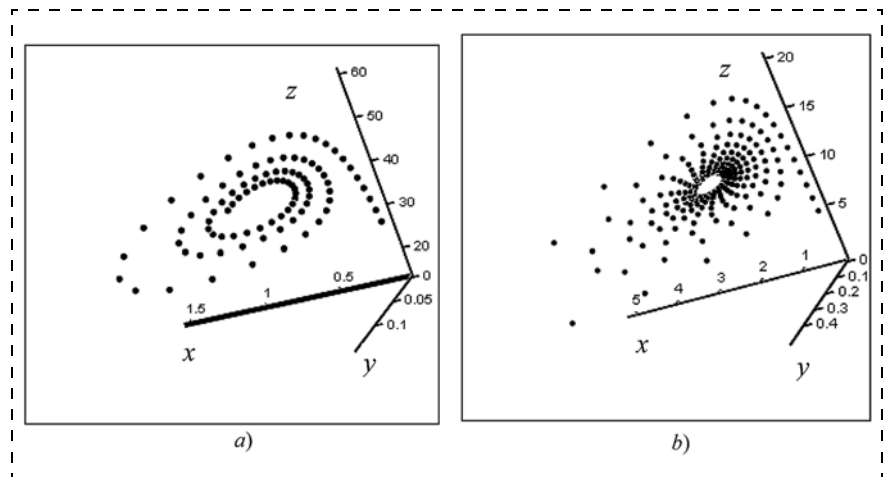


Рис. 3. Решения, представляющие фокус. Разворот осей координат x , y , z и соответствующие масштабы переменных на осях координат выбраны для лучшей демонстрации особенностей поведения кривой: a — вычисления для приведенной к поверхностной плотности концентрации дырок $h_p^{2/3}$; b — вычисления для чисто объемной концентрации дырок h_p

Fig. 3. Solutions that represent the focus. The turnback of the coordinate axes x , y , z and the scale of the variables on the coordinate axes are chosen for a good demonstration of features of the curve: a — calculation of the hole concentration $h_p^{2/3}$ reduced to the surface density; b — calculations for a purely volumetric holes' concentration h_p

мую не в единицах объемной концентрации (м^{-3}), а в единицах поверхностной концентрации (м^{-2}), как и другие соответствующие динамические переменные. Все эти рассуждения связаны с отсутствием на настоящий момент экспериментальных данных, необходимых для более корректных выводов.

Как видно из рис. 3, 4, при соответствующих значениях параметров для динамических переменных имеет место устойчивый фокус. Можно убедиться, что существует также решение в виде предельного цикла при других значениях параметров для динамических переменных. Размер предельного цикла определяется диссипацией энергии в системе.

Уравнения (1)–(3) описывают свойства системы в различных областях. Уравнения (1) и (2) характеризуют свойства системы в приповерхностной области. Уравнение (3) включает в себя объемное описание. На основании этого параметр ρ , входящий в эти уравнения, может быть несколько иным для уравнения (3), т. е. должен быть заменен в нем на ρ' .

В экспериментальной работе [7] было выдвинуто предположение, что в системе кремний — электролит на основе растворов плавиковой кислоты может иметь место бифуркация типа Андронова—Хопфа. Это утверждение требует более тщательного теоретического анализа. Из проведенных теоретического анализа и численного решения следует существование бифуркации рождения предельного цикла из устойчивого фокуса посредством мягкого возбуждения. Отметим, что

экспериментальные данные свидетельствуют о наличии установленных теоретически в настоящем исследовании закономерностей в поведении динамических переменных [7–11], т. е. хорошо согласуются друг с другом.

Постановка проблемы и обоснование алгоритма компьютерного моделирования формирования пористого пространства

Данный раздел посвящен исследованию проблемы связи фрактальных свойств ПК с механизмами формирования пористого пространства, т. е. исследованию причины самоподобия сформированных в полупроводниковых кристаллах кремния пористых структур. Особое внимание уделяется изучению механизма доставки участвующих в электрохимических реакциях дырок. Фактически фрактальный режим формирования пористых кластеров в кремнии связан с масштабной инвариантностью уравнений, управляющих доставкой дырок к месту электрохимических реакций растворения. Физически это осуществляется при достаточно хорошей проводимости электролита, когда поверхность раздела является эквипотенциальной, а заряд распределяется по этой поверхности согласно ее кривизне.

Как продемонстрировано на рис. 5, формирование основных морфологических типов пористых структур может быть сопоставлено с характерными участками ВАХ процесса порообразования в кремнии n -типа. На участке начального подъема ВАХ формируется структура, состоящая из кластеров,

заполненных микроструктурой (условно этот тип морфологии назван тип 0). На участке резкого подъема ВАХ образуются ветвящиеся макрокластеры и соответствующая микроструктура (тип 1). На участке насыщения ВАХ формируются вытянутые маловетвящиеся макрокластеры (тип 2). На участке второго резкого подъема ВАХ формируются практически неветвящиеся кластеры (тип 3). Отметим, что пористая структура кремния n -типа удобна для изучения ввиду наличия макроскопической структуры, наряду с микроструктурой. Для пористого кремния p -типа ВАХ не имеет участка насыщения, и закономерности формирования пористого пространства отличаются от случая n -типа.

Исследование проблемы формирования фрактальных порис-

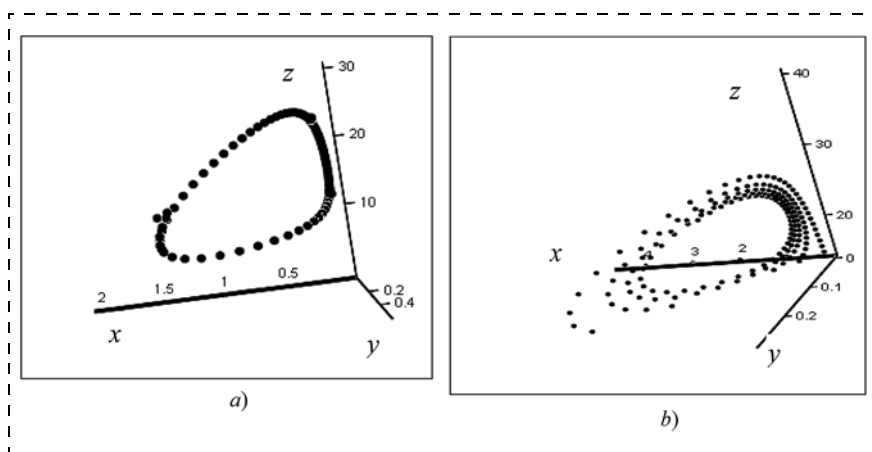


Рис. 4. Решения, представляющие предельный цикл. Разворот осей координат x (влево), y (вперед), z (вверх) и соответствующие масштабы переменных на осях координат выбраны для лучшей демонстрации особенностей поведения кривой: a — вычисления проведены для приведенной к поверхностной плотности величины концентрации дырок $h_p^{2/3}$; b — вычисления проведены для чисто объемной концентрации дырок h_p

Fig. 4. Decisions that represent the limit cycle. The turnback of the coordinate axes x (left), y (forward), z (up) and the scale of the variables on the coordinate axes are chosen for a good demonstration of features of the curve's behavior: a — calculation of the hole concentration $h_p^{2/3}$ reduced to the surface density; b — calculations for a purely volumetric holes' concentration h_p

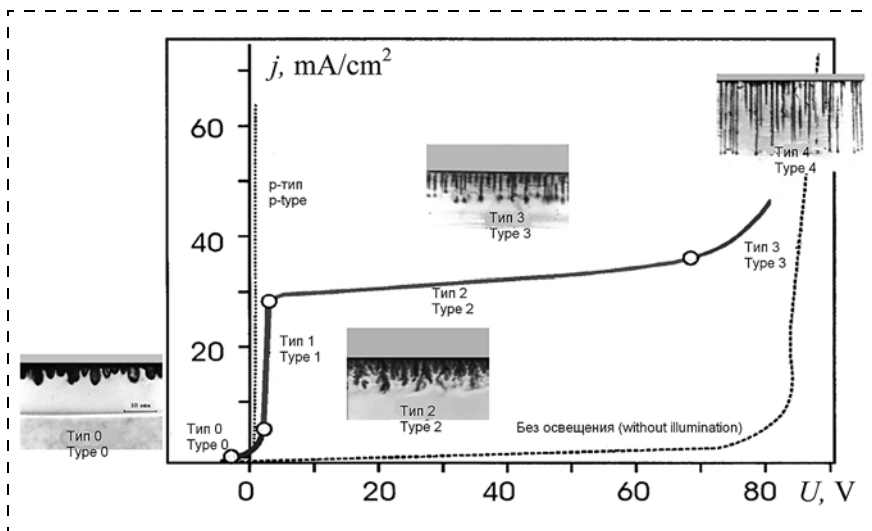


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики *p*- и *n*-типов кремния с подсветкой и без подсветки и соответствующие морфологические типы для *n*-Si, сформированные при нахождении рабочей точки процесса анодирования на соответствующих участках ВАХ
Fig. 5. CVCs of the silicon of *p*- and *n*-type with and without illumination, and the corresponding morphological types for *n*-Si, formed when the operating point of the anodizing process was located on the relevant CVC sections

тых кластеров в кремнии, изложенное в настоящем разделе, базируется на компьютерном моделировании. Постановка задачи основывается на реальных условиях проведения экспериментов по формированию пористого кремния посредством анодирования соответствующей подложки в растворе плавиковой кислоты в режиме самоорганизующегося процесса, т. е. без формирования специальных затравок, определяющих преимущественное развитие пористого пространства. Типичную постановку этой экспериментальной части проблемы можно найти в работах [3, 11].

В задаче следует выделить несколько аспектов. Во-первых, постановка в общем случае трехмерной задачи близка к задаче Стефана с движущейся границей [23]. Конфигурация этой границы электролит/полупроводник меняется со временем, и граница распространяется вглубь образца, становясь все более изрезанной. Во-вторых, на поверхности границы раздела электролит/полупроводник происходят электрохимические реакции растворения кремния, точный характер которых до конца не выяснен [3, 18, 24]. Неясен также до конца механизм воздействия на поверхность различных добавок в электролит типа поверхностно-активных веществ (ПАВ), приводящих, по-видимому, к перераспределению заряда на границе раздела. В-третьих, развиваемая теория существенным образом опирается на модель формирования пористого пространства, которая определяется доставкой дырок к месту электрохимических реакций [3, 11, 15], что характерно для кремния *n*-типа; протекание же реакций связано с последовательным фторированием кремния [15].

Компьютерный алгоритм базируется на рассмотрении следующей схемы процесса. Известно, что на границе раздела электролит/полупроводник происходят многоэтапные электрохимические реакции с участием положительно заряженных частиц (дырок), приводящие к электрохимическому растворению кремния при наличии разности потенциалов между электролитом (катодом) и кремнием (анодом). К поверхности раздела электролит/кремний из глубины полупроводника диффузионным образом при наличии соответствующего внешнего потенциала доставляются дырки, которые участвуют в электрохимических реакциях. Для появления дырки полупроводниковые кристаллы кремния *n*-типа требуется освещать электромагнитным

излучением. В ходе формирования пористого пространства граница раздела сред сильно модифицируется. Пористое пространство заполняется проводящим электролитом, что вносит вклад наряду с внешним приложенным потенциалом в формирование результирующего электрического потенциального поля, управляющего движением дырок.

Движение случайно блуждающей дырки при наличии потенциала различной природы моделировалось на основе следующего уравнения [25]:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{U}(\mathbf{r}, t), \quad \mathbf{r}(t_0) = \mathbf{r}_0, \quad (4)$$

где $\mathbf{U}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{u}_f(\mathbf{r}, t) + \mathbf{u}_l(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{u}_f(\mathbf{r}, t)$ — детерминированная компонента поля скоростей, связанная с внешним приложенным потенциалом; $\mathbf{u}_l(\mathbf{r}, t)$ — случайная компонента поля скоростей, зависящая от температуры кремниевой подложки; $\mathbf{r}_0$ — начальное положение блуждающей частицы.

Детерминированная и случайная компоненты полей скоростей связаны с потоками частиц:

$$f\mathbf{u}_f = -\frac{1}{\gamma} f \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}}, \quad f\mathbf{u}_l = -D \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}}, \quad (5)$$

где $f \equiv f(\mathbf{r}, t)$ — функция распределения носителей заряда (дырок); D — коэффициент диффузии (для дырок — D_h); γ — коэффициент, описывающий сопротивление среды; ϕ — потенциал, равный сумме потенциалов $\phi = \phi^{ext} + \phi^{clust} + \phi^{non-elect}$, причем ϕ^{ext} , ϕ^{clust} , $\phi^{non-elect}$ — потенциалы, соответственно, внешний, формируемого кластера и неэлектрической природы (например, деформационный). Выраже-

ния (5) позволяют в дальнейшем сформулировать исследуемую проблему в терминах функции распределения и связать задачу с уравнением типа Фоккера—Планка. Движение дырок предполагается термализованным, т. е. распределение по скоростям является максвелловским, и дырки находятся в тепловом равновесии с кристаллической решеткой.

Новое положение частицы рассчитывается по формуле

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = \mathbf{r}(t) + (\mathbf{u}_f + \mathbf{u}_r)\Delta t, \quad (6)$$

которая является формальным решением уравнения (4), причем $\mathbf{r}(t)$ представляет собой положение частицы на предыдущем шаге; Δt — шаг по времени.

Направление вектора $\mathbf{u}_r$ выбирается случайным образом согласно алгоритму, описанному ниже, а длина приравняется к среднеквадратичной скорости частицы идеального электронного газа:

$|\mathbf{u}_r| = \sqrt{3k_B T/m_h^*}$, где k_B — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура (изменяемый параметр модели); m_h^* — эффективная масса дырки в кремнии.

Вектор скорости $\mathbf{u}_f$ в модели является детерминированной величиной, определяется электрическим полем и рассчитывается согласно формуле $\mathbf{u}_f = \mu_h \mathbf{E}$, где $\mathbf{E}$ — вектор напряженности электрического поля; μ_h — подвижность дырок в кремнии.

Хотя второе слагаемое в уравнении (4) по внешнему виду имеет простую линейную зависимость от времени, однако вклад в движение, описываемый вторым слагаемым вида $\mathbf{u}_r \Delta t$, носит чисто стохастический характер типа σdW (σ — среднее квадратичное отклонение случайной величины; dW — случайный винеровский процесс), так что это равенство имеет прямую аналогию с уравнением Ито [26], а задача в этом случае близка к проблеме Орнштейна—Уленбека.

Масштабная инвариантность задачи

В случае описания движения термализованных частиц, т. е. носителей заряда, которые находятся в тепловом равновесии с кристаллической решеткой, так что их распределение по скоростям имеет вид распределения Максвелла, уравнение непрерывности для потоков частиц приводит к следующему результату:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \text{div}(f\mathbf{U}) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} - \text{div}\left(f \cdot \frac{1}{\gamma} \text{grad}\phi\right) - D_h \Delta f = 0, \quad (8)$$

которое аналогично диффузионному уравнению Фоккера—Планка. Отметим, что времена релаксации импульса электронов при комнатной температуре в полупроводниках составляют порядка $10^{-12} \dots 10^{-14}$ с. Потенциал ϕ^{clust} находится из уравнения Пуассона $\Delta\phi = -4\pi\rho$, которое в случае равенства нулю концентрации свободных носителей ρ переходит в уравнение Лапласа, причем $\mathbf{u}_f = \mu_h \mathbf{E}$, $\mathbf{E} = \mathbf{E}^{ext} + \mathbf{E}^{clust} + \mathbf{E}^{non-elect}$, где $\mathbf{E}^{non-elect} = -\text{grad}(\phi^{non-elect})$, μ_h — подвижность дырок в кремнии, Δ — оператор Лапласа.

В основе уравнения (5) лежит уравнение диффузии: $\partial f / \partial t = D_h \Delta f$, которое инвариантно относительно следующих масштабных преобразований [27]: $\mathbf{r}' = \lambda^{1/2} \mathbf{r}$, $t' = \lambda t$, где λ — безразмерный масштабный множитель.

Для более детального анализа уравнения (8) перепишем его в следующем виде:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = D_h \Delta f + \frac{1}{\gamma_h} \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{1}{\gamma_h} f \frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 \mathbf{r}}, \quad (9)$$

где $1/\gamma_h = \mu_h$ — подвижность частицы (дырки). Потенциал ϕ удовлетворяет уравнению Пуассона либо уравнению Лапласа в отсутствие свободных зарядов. Проанализируем более детально второе слагаемое в уравнении (9). Так как имеет место соотношение $\mathbf{E} = -\partial\phi/\partial\mathbf{r}$, то масштабная инвариантность всего выражения (9) в случае, если для пространственных переменных имеют место преобразования $\mathbf{r}' = \lambda^{1/2} \mathbf{r}$, $t' = \lambda t$, определяется преобразованиями потенциала или напряженности поля. Если, например, потенциал имеет вид кулоновского потенциала ($\phi = kq/r$, k — размерный множитель, причем в системе СГСЭ — $k = 1$), то, в случае если заряд преобразуется согласно $q' = \lambda^{1/2} q$, выражение (9) остается неизменным после следующих преобразований:

$$\mathbf{r}' = \lambda^{1/2} \mathbf{r}, \quad t' = \lambda t, \quad q' = \lambda^{1/2} q. \quad (10)$$

В этом случае объемная плотность заряда локально преобразуется как обратная площадь S , пропорциональная гауссовой кривизне K : $\rho = q/V \rightarrow \rightarrow [\lambda^{1/2}/\lambda^{3/2}] = [\lambda^{-1}] \rightarrow 1/S \rightarrow K$, где K — гауссова кривизна пространства в данной точке, равная произведению двух главных кривизн в данной точке $K = k_1 k_2$, так что $[k] = [1/r]$, r — радиус кривизны [28, 29]. Последнее соотношение $1/S \rightarrow K$ можно получить, используя теорему Гаусса о существовании связи между площадью поверхности S_f , площадью ее сферического изображения S_{sph} и гауссовой кривизной K поверхности f . Эта связь выражается следующей теоремой Гаусса: отношение

площади сферического изображения области на поверхности к площади этой области стремится к абсолютному значению гауссовой кривизны в данной точке поверхности, когда область стягивается к данной точке [28]: $\lim_{\gamma \rightarrow 0} (S_{sph}/S_f) = K$, где γ — граница области S_f . Этот факт позволяет при анализе заменить площадь поверхности вблизи выделенной точки соответствующей площадью сферы единичного радиуса (сферическое изображение), деленной на гауссову кривизну.

Отметим, что напряженность электрического поля на границе раздела преобразуется как поверхностная плотность заряда ($E = q/r^2 \rightarrow [\lambda^{1/2}/\lambda] = [\lambda^{-1/2}]$), т. е. в рассматриваемом случае пропорционально средней кривизне пространства $M = 1/2 \cdot (k_1 + k_2)$, где k_1, k_2 — главные кривизны поверхности [29]. На искривленной поверхности заряженного проводника имеет место соотношение для напряженности электрического поля $\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial n} = -2M = -\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$, причем r_1, r_2 — главные радиусы кривизны [30]. Гауссова и средняя кривизны связаны друг с другом следующим соотношением: $M^2 - K = 1/4(1/r_1 - 1/r_2)^2 \geq 0$. Отметим, что в омбилических точках (когда $r_1 = r_2$), где индикатриса Дюпена имеет форму окружности, действительно соотношение $M^2 = K$, так что в этом случае можно использовать любую из величин M или K для описания свойств изогнутой поверхности.

Для системы двух проводящих сфер, соединенных проводником, имеют место следующие соотношения: $\phi_1 = \phi_2 = \text{const}$, т. е. равенство потенциалов обеих сфер. При этом для зарядов имеют место соотношения: $q_1 = Qr_1/(r_1 + r_2) \approx r_1$, $q_2 = Qr_2/(r_1 + r_2) \approx r_2$, где $Q = q_1 + q_2$ — суммарный заряд сфер радиусами r_1 и r_2 , причем $q_1/q_2 = r_1/r_2$, т. е. заряды пропорциональны радиусам сфер. Для плотностей зарядов имеет место соотношение $q_1/4\pi r_1^2 > q_2/4\pi r_2^2$ (или $q_1 K_1 > q_2 K_2$, K_1, K_2 — гауссовы кривизны сфер соответственно с радиусами r_1 и r_2), если $r_1 < r_2$, то $\sigma_1 > \sigma_2$. Таким образом, в этом случае происходит распределение заряда на искривленных поверхностях в соответствии с их кривизной, причем плотность заряда больше на поверхности большей кривизны. Отметим, что в выражении для плотности заряда $\rho = q/V \rightarrow [\lambda^{1/2}/\lambda^{3/2}] = [\lambda^{-1}] \rightarrow K$ стоит в этом случае гауссова кривизна, т. е. произведение главных кривизн. Следовательно, если распределение плотности заряда на поверхности раздела в формируемом отдельном пористом кластере происходит пропорционально гауссовой кривизне, то масштабные преобразования

(10) оставляют уравнение (9) неизменным. Неизменность потенциала вдоль поверхности раздела электролит/кремний свидетельствует об эквипотенциальности границы [11].

Исследование закономерностей решения и результаты компьютерного моделирования

В случае, когда для описания потенциала имеет место уравнение Лапласа, автомодельное решение уравнения (9) имеет следующий вид [31]:

$$f(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{(4\pi D_h t)^{3/2}} \exp\left\{-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{u}_f t)^2}{4 D_h t}\right\}, \quad (11)$$

где $\mathbf{u}_f = \mu_h \mathbf{E}$. Выражение (11) представляет собой гауссову кривую и является автомодельным решением уравнения (9) при $\Delta\phi = 0$.

При использовании дискретных алгоритмов случайного блуждания можно показать, что решение факторизуется в аналогичную (11) формулу. Как следует из анализа работ по закономерностям фрактального роста [27, 32, 33], наиболее интенсивно происходит развитие концов фрактальных структур. Фрактальный рост пористого кластера происходит, когда локальная плотность заряда выше в местах большей кривизны кластера. Вероятность процесса роста в этих местах возрастает.

Для исследования закономерностей фрактального роста кластеров был разработан пакет программ, дающий широкие возможности для визуализации процесса роста кластеров в двумерном (2D) и трехмерном (3D) случаях. Пакет программ позволил изучать любое горизонтальное или вертикальное сечение системы в любой момент времени моделирования процесса и делать мгновенные снимки процесса.

Ниже представлены результаты исследования системы на основе разработанной компьютерной модели и их сопоставление с экспериментальными данными. В основном изучалось кристаллографическое направление (100). На рис. 6 представлены расчеты распределения потенциала и соответствующих двумерных пористых структур, а также фотография одной из полученных пористых структур в n -типе кремния. Хорошо заметно, что распределение потенциала неравномерно, так что градиент потенциала достигает своего максимума вблизи концов пор. Вблизи нижней границы, как это видно из рис. 6, а, потенциал распределен достаточно равномерно. Внешний вид структур, представленных на рис. 6, а, хорошо согласуется со структурами, фотографии которых опубликованы в работе [34].

Фрактальную размерность D_f вычисляли согласно общепринятой формуле [27]: $D_f = \lim_{\delta \rightarrow 0} (-\ln N(\delta)/\ln \delta)$, где δ — диаметр шаров, которыми покрывалась

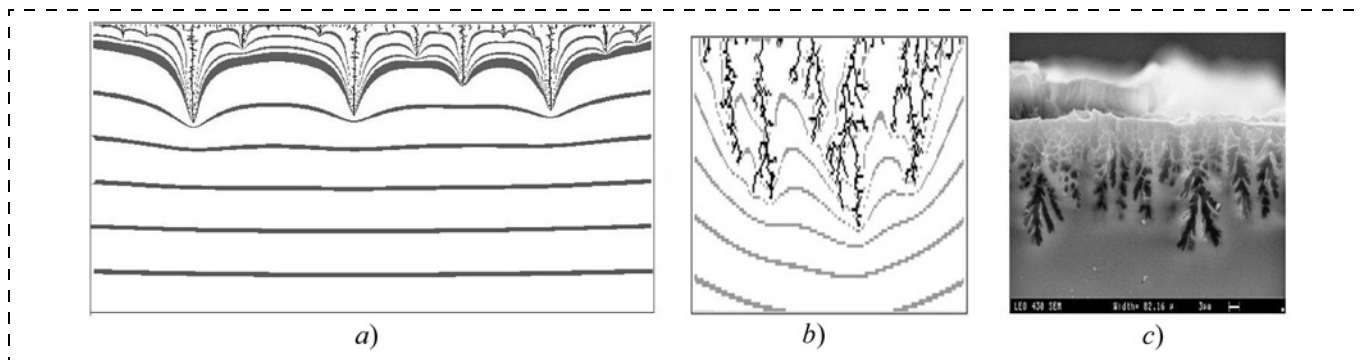


Рис. 6. Структура двумерных пористых кластеров, полученная при разных параметрах и соответствующая картина эквипотенциальных линий (a, b); поперечный скол экспериментально полученной пористой структуры (c)

Fig. 6. The structure of the two-dimensional porous clusters obtained at different parameters and the corresponding picture of equipotential lines (a, b); the transverse chip of the experimentally obtained porous structure (c)

структура; $N(\delta)$ — минимальное число шаров с диаметром δ , необходимых для покрытия измеряемой структуры. Результаты вычисления фрактальных размерностей и 3D-моделирования представлены на рис. 7, 8.

Таким образом, анализ автомодельных решений уравнения (9) типа уравнения Фоккера—Планка позволяет понять природу формирования фрактальных пористых кластеров в кремнии. Рассмотрен один из возможных механизмов формирования фрактальных пористых кластеров в полупроводниковых кристаллах кремния, связанный с доставкой дырок к поверхности раздела, где они принимают участие в электрохимических реакциях растворения кремния. Процессы самоорганизации, ведущие к формированию фрактальных пористых кластеров, происходят в диапазоне параметров $E^{clust} > E^{ext}$, т. е. когда вблизи пор движение дырок определяется влиянием поля формируемых кластеров. По мере увеличения внешнего приложенного напряжения движение дырок становится менее хаотичным, и формируются все менее ветвящиеся кластеры.

Полученные на основании расчетов значения фрактальных размерностей двумерных кластеров ($D_f \leq 1,5$) занимают промежуточное значение между моделями пробоя диэлектриков ($D_f = 4/3 = 1,33$) и моделью агрегации, ограниченной диффузией ($D_f = 5/3 \approx 1,7$) [33]. Значение фрактальной размерности в моде-

ли вязких пальцев составляет для сравнительно небольших кластеров $D_f = 1,3 \pm 0,1$, тогда как для развитых кластеров в радиальной геометрии получены значения $D_f = 1,7 \pm 0,05$ [35] (см. рис. 7). Зна-

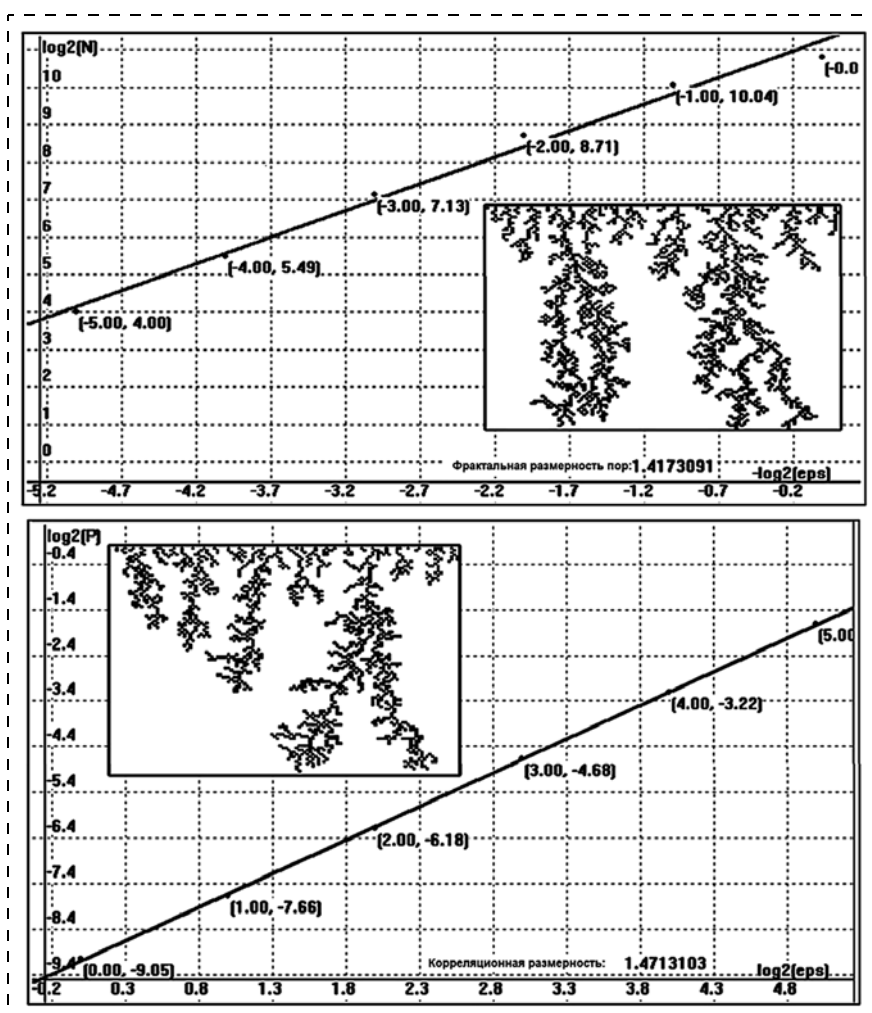


Рис. 7. Результаты вычисления фрактальной размерности для двумерных фрактальных структур $D_f = 1,417$ (вверху) и корреляционной размерности $D_{cor} = 1,471$ (внизу) и соответствующие фрактальные структуры (вставки)

Fig. 7. The results of calculating of the fractal dimension of two-dimensional fractal structures $D_f = 1,417$ (top) and the correlation dimension $D_{cor} = 1,471$ (bottom), and the fractal structures (inserts)

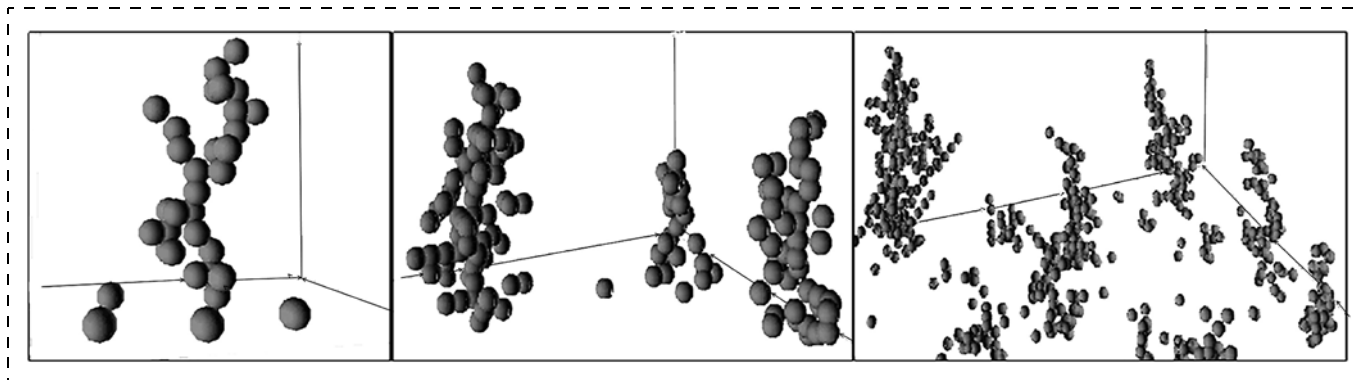


Рис. 8. Результаты моделирования трехмерных кластеров, полученные при различных параметрах

Fig. 8. The results of the simulation of three-dimensional clusters obtained at different parameters

чение фрактальной размерности $D_f \approx 2,39$ для случая трехмерных кластеров (см. рис. 8) в данной модели хорошо согласуется с экспериментально измеренным посредством атомно-силовой микроскопии значением $D_f = 2,36...2,47$ [36].

Заключение

Существенным моментом для интерпретации наблюдаемых эффектов является взаимосвязь локального и глобального поведения динамических переменных [38]. Приведенные выше уравнения (1)–(3) имеют место для однородных по поверхности процессов. В случае, когда система представляет собой совокупность локальных областей, в которых происходят различные процессы, отличающиеся скоростями электрохимических реакций, спецификой их протекания и т. д., в системе могут возникать различные режимы развития общего процесса формирования пор, которые характеризуются разным поведением динамических переменных. Этот аспект кластеризации фрагментированной на отдельные области динамической системы и ее синхронизации требует дальнейшего исследования, подобно тому, как показано в работе [37].

Особенно важным моментом является наличие диэлектрического слоя сложного состава, который ввиду присутствия зарядовых состояний, вносит существенный вклад в формирование динамики поведения параметров системы.

В данной работе был рассмотрен один из возможных механизмов формирования фрактальных кластеров в кремнии, связанный с самоподобием случайного блуждания [27, 32]. К настоящему времени явление осцилляций динамических параметров в процессах анодирования при определенных условиях обнаружено в большом количестве систем. Наличие добавок в составе электролита, приводящих к формированию осциллирующей динамики процесса анодирования кремния в составах $\text{HF}/\text{H}_3\text{PO}_4$, подчеркивалось также в работе [38]. Экспериментально обнаружено, что в глубине пор

формируется приграничный слой со сложным химическим составом, похожий на оксид. В работе [39] осцилляции напряжения наблюдали в процессе анодирования подложек InP с n -типом проводимости ориентации (100) в водных растворах HCl при высоких постоянных плотностях тока. При определенных значениях параметров осцилляции приводили к синхронизованным периодическим изменениям контуров каналов пор, подобным тем, которые представлены на рис. 2 настоящей работы. В работе [40] обнаружены осцилляции тока при анодировании алюминия в потенциостатическом режиме в растворах $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$. Профиль пор в подобных режимах также периодически изменялся. Осцилляции тока обнаружены при анодировании жаропрочных сплавов типа ЖС6К (сплавы, включающие никель и хром) в электролитах на основе NaNO_3 [41]. Пленки никеля в водных и водно-органических растворах электролитов нитрата натрия проявляют осцилляционные зависимости тока от времени [41]. Во всех упомянутых в настоящем исследовании работах отмечается отсутствие теории, приводящей к аналитическому описанию осциллирующего поведения системы. Настоящая работа предоставляет аналитическую модель, основанную на формульном описании основных закономерностей динамической системы, приводящих к периодическим зависимостям динамических параметров.

Таким образом, анализ автомодельных решений уравнения (9) типа уравнения Фоккера—Планка позволяет понять природу формирования фрактальных пористых кластеров в кремнии. Процессы самоорганизации, ведущие к формированию фрактальных пористых кластеров, происходят в диапазоне параметров $E^{clust} > E^{ext}$, когда граница раздела полупроводник/диэлектрик является эквипотенциальной поверхностью и распределение заряда на ней происходит пропорционально кривизне поверхности. Это достигается хорошей проводимостью электролита и отсутствием поверхностно-активных добавок в нем. Если поле заряда, распре-

деленного по поверхности, определяет движение дырки к месту электрохимической реакции, то формируется фрактальная структура кластера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.574.21.0099 от 26.08.2014 г. (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57414X0099).

Список литературы

1. Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985. 327 с.
2. Гапонов-Грехов А. В., Некоркин В. И. Нелинейные волны 2010: [сборник статей] // Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2011. 462 с.
3. Smith R. L., Collins S. D. Porous silicon formation mechanisms // J. Appl. Phys. 1992. V. 71, N. 8. P. R1—R22.
4. John G. C., Singh V. A. Porous silicon: theoretical studies // Phys. Reports. 1995. V. 263. P. 93—151.
5. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics // Surf. Sci. Reports. 2000. V. 38. P. 1—126.
6. Foell H. Properties of silicon-electrolyte junctions and their application to silicon characterization // Appl. Phys. A. 1991. V. 53. P. 8—19.
7. Prokashnikov A. V., Buchin E. Yu. Character of dynamics in the electrolyte-n-type silicon system during anodization in HF solutions // Phys. Low-Dim. Struct. 1997. V. 5/6. P. 117—122.
8. Бучин Э. Ю., Проказников А. В. Характер динамики системы электролит — кремний *n*-типа при анодировании в растворах плавиковой кислоты // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, Вып. 5. С. 1—7.
9. Carstensen J., Prange R., Poprikov G. S., Foell H. A model of current oscillations at the Si-HF-system based on a quantitative analysis of current transients // Appl. Phys. A. 1998. V. 67, N. 4. P. 459—467.
10. Carstensen J., Prange R., Poprikov G. S., Foell H. A model for current-voltage oscillations at the silicon electrode and comparison with experimental results // J. Electrochem. Soc. 1999. V. 146, N. 3. P. 1134—1140.
11. Kochergin V., Foell H. Porous semiconductors. Optical properties and applications. Springer, 2009. 207 p.
12. Buchin E. Yu., Churilov A. B., Prokashnikov A. V. Different morphology aspects in *n*-type porous silicon // Appl. Surf. Sci. 1996. V. 102. P. 431—435.
13. Wesolowsky M. Fractal-like model of porous silicon // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. P. 205—207.
14. Nychyporuk T., Lysenko V., Barbier D. Fractal nature of silicon nanocrystallites // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 115402.
15. Lehmann V., Gosele U. Porous silicon formation: a quantum wire effect // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. № 8. P. 856—858.
16. Propst E. K., Kohl P. A. The electrochemical oxidation of silicon and formation of porous silicon in acetonitrile // J. Electrochem. Soc. 1994. V. 141. N. 4. P. 1006—1013.
17. Trucks G. W., Raghavachari K., Higashi G. S., Chabal Y. J. Mechanism of HF etching of silicon surface: a theoretical understanding of hydrogen passivation // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 65, N. 4. P. 504—507.
18. Vanmaekelbergh D., Searson P. C. On the electrical impedance due to the anodic dissolution of silicon in HF solutions // J. Electrochem. Soc. 1994. V. 141, N. 3. P. 697—702.
19. Prokashnikov A. V., Svetovoy V. B. Fluorine penetration through the whole silicon wafer during anodization in HF solution // Phys. Low-Dim. Struct. 2002. V. 9/10. P. 65—69.
20. Winters F. H., Graves D. B., Humbird D., Tougaard S. Penetration of fluorine into the silicon lattice during exposure to F atoms, F₂, and XeF₂: Implications for spontaneous etching reactions // J. Vac. Sci. Technol. A. 2007. V. 25. P. 96—103.
21. Bilenko D. I., Belobrovaya O. Ya., Zharkova E. A., Mysenko I. B., Khasina E. I. The effect of adsorption on the electrical properties of structures based on oxidized porous silicon // Semiconductors. 2002. V. 36, N. 4. P. 466—471.
22. Bilenko D. I., Belobrovaya O. Ya., Zharkova E. A., Terin D. V., Khasina E. I. The properties of structures based on oxidized porous silicon under the effect of illumination and a gas environment // Semiconductors. 2005. V. 39, N. 74. P. 800—804.
23. Lashin A. M. An investigation of the dynamics of first-order phase transition during the directional solidification of a pure metal into an undercooled melt on the base of phase-field model // Pre-print Inst. Appl. Math. RAS. Moscow, 2001. 40 p.
24. Zhang X. G. Mechanism of pore formation on *n*-type silicon // J. Electrochem. Soc. 1991. V. 138, N. 12. P. 3750—3756.
25. Кляцкин В. И., Гуарий Д. Когерентные явления в стохастических динамических системах // УФН. 1999. Т. 169, Вып. 2. С. 171—207.
26. Allen E. Modelling with Ito stochastic differential equation // Springer. 2007. 230 p.
27. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
28. Погорелов А. В. Дифференциальная геометрия. М.: Наука, 1974. С. 176.
29. Дубровин Б. А., Новиков С. П., Фоменко Ф. Т. Современная геометрия. М.: Наука. 1979. С. 759.
30. Джексон Д. Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965. 702 с.
31. Исихара А. Статистическая физика. М.: Мир, 1973. 471 с.
32. Пьетронеро Е., Тозатти Л. Фракталы в физике. М.: Мир, 1988. 672 с.
33. Turkevich L. A., Scher H. Occupancy-probability scaling in diffusion-limited aggregation // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55, N. 9. P. 1026—1029.
34. Aravamudan S., Luongo K., Poddar P., Srikanth H., Bhatsali S. Porous silicon templates for electrodeposition of nanostructures // Appl. Phys. A. 2007. V. 83. P. 773—780.
35. Нитман И., Даккор Ж., Стенли Х. Когда вязкие "пальцы" имеют фрактальную размерность // Фракталы в физике / Под ред. Е. Пьетронеро, Л. Тозатти. М.: Мир, 1988. С. 266—282.
36. Haplo N., Fujiwara N., Iwamatsu M., Horii K. Atomic force microscopy study of self-affine fractal roughness of porous silicon surface // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P. 3951—3953.
37. Wang W., Kiss I. Z., Hudson J. L. Experiments on arrays of globally coupled chaotic electrochemical oscillators: synchronization and clustering // Chaos. 2000. V. 10, N. 1. P. 248—256.
38. Parkhutik V. New effects in the kinetics of the electrochemical oxidation of silicon // Electrochimica Acta. 2000. V. 45. P. 3249—3254.
39. Langa S., Carstensen J., Tiginyanu I. M., Christopher M., Foell H. Self-induced voltage oscillations during anodic etching of *n*-InP and possible applications of three dimensional microstructures // Electrochem. and Solid State Lett. 2001. V. 4, N. 6. P. G50—G52.
40. Lee W., Kim J.-G., Gosele U. Spontaneous current oscillations during hard anodization of aluminum under potentiostatic conditions // Advanced Functional Materials. 2010. V. 20, N. 1. P. 21—27.
41. Невский О. И., Бурков В. Н., Гришина Е. П., Гаврилова Е. Л., Балмасов А. В., Носков А. В., Донцов М. Г. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2006. 282 с.

N. A. Arzhanova¹, Post-Graduate Student, natarzhanova@mail.ru,

A. V. Prokaznikov², D. Sc., Leading Researcher, prokaznikov@mail.ru

¹ Yaroslavl State University named after P. G. Demidov

² Yaroslavl Branch of Physical-technological Institute of RAS

Self-Organizing Processes During an Electrolytic Nanostructuring of Silicon

The work presents experiment and theoretical data, which testify to the presence of the self-organizing processes in the electrolyte/semiconductor system. These processes are expressed both in various dynamics of the course of anodizing depending on the process parameters, and in formation of the fractal porous clusters as the end result, including the nano-scales. Analytical models describing all the above phenomena were developed.

Keywords: self-organizing, porous silicon, bifurcation, fractal properties, nano-sized clusters, anodization of semiconductors

Introduction

Self-organization — one of the basic provisions in explanation of the fundamental aspects of world order [1, 2]. Such issues also arise in the study of the transformation of the surface's structure and volume of solids in their interaction with chemically active medias that is used in nanostructured modification of surface and volume of the electronic systems. These issues relate to the system's response to external action, which is expressed in formation of the low-dimensional structures with different morphology or presence of the electropolishing mode, as well as the change of dynamic regimes of anodizing and others. An important aspect for nano- and microelectronics — lowering of dimensions at chemical and electrochemical affection of the active media on a number of solid-state compounds. These compounds are materials having metallic and semiconducting properties. The chemical or electrochemical reactions leading to the formation of the pore space might flow in such compounds [3, 4]. The characteristic features of the above mentioned processes are reactions which are carried out across the interface between two media and change of the charge states of substances that are in contact. The change in the charge state can be, therefore, a kind of indicator of activation of a certain kind of processes. The technologically utilized system of this kind is a porous silicon (PS), scientific literature [3—5] is devoted to various aspects of its formation and use. Despite the large amount of literature on the study of various aspects of the system response to external affection with decreasing of dimensions of one of the components of a complex system and development of the interface, the conventional solution to the theoretical aspects of these phenomena does not exist. One of such issues is synchronization of the elementary acts constituting the silicon anodizing process in hydrofluoric acid solution. A number of studies demonstrated presence of the anodization modes, accompanied by periodic changes in the dynamic parameters of a system, such as current and voltage [6—11]. Self-organization, which is expressed in a periodic variation of current and voltage was observed in sensory systems based on low-dimensional systems, as well as based on porous silicon. These facts testify influence of the processes near the interface on formation of the total system response during dynamic changes in the structure of the modification front of the solid component.

One of the aspects which attracts interest in study of the properties of the porous silicon, is study of the fractal characteristics of the formed porous structures. This may indicate the presence of a universal fractal mechanism for formation

of the pore space [12]. In [13], a geometric model of porous silicon, which is based on fractal constructions is presented. The results of the model [13] are compared with the optical measurements which indicate good agreement between experiment and theory for silicon of *p*-type. A conclusion was made in [14] about fractal nature of the formed porous surface on the base of experimental studies of hydrogen coverage of nanoporous *p*-type silicon. A fractal model describing the morphology of the formed nanocrystals, which has a fractal dimension of 2,1...2,4 was also developed.

This paper considers the approach to obtaining of the porous silicon with fractal properties by anodic etching without creating special seeds. This allows to understand self-organization in the overall system's response and in behavior of the dynamic parameters that control it, including the individual components.

Experimental data on oscillatory processes in anodizing of silicon and the properties of the boundary layer

Study of the cross chippings of the porous structures has revealed a regularity associated with a periodic changes of the parameters of silicon-electrolyte system during anodization: the thickness of the pore's walls periodically varies with a depth in accordance with the corresponding changes in the system over time. These laws are described in details in [9—11]. An image of the structure with periodically changing profile of porous channels is shown in fig. 1.

It should be noted, that the chain of electrochemical reactions in the silicon corresponding to pore formation is not completely revealed. In [15] (see. also [3, 4, 16]), a common model of sequential surface fluorination is proposed. This model is based on the theory developed in [17].

Study of interface of the system electrolyte-semiconductor in the context of impedance for pore formation is presented in [18], where it is noted that the pore formation is characterized by the presence of one loop, which has a negative part of the dependence, and the intermediate regime is characterized by the presence of two loops, one of which has no negative part. The electropolishing is characterized by two loops without a negative part of the dependence [18]. This can be interpreted as formation of a layer with specific properties on the silicon surface. The near-surface charge in it is determined by capacitive characteristics of the impedance and the frequency dependencies can help to reveal the specific frequencies that characterize the charging dynamics of the charge centers. Formation of dielectric film leads to occurrence of

the surface states — fast on the film's border with the semiconductor and slow on the film's border with the electrolyte.

The surface states contribute in the dynamics of exchange of the charge carriers between the two environments. They may be formed during formation of the complex surface dielectric layer during the electrochemical reactions of pore formation, as evidenced by the study of IR-spectra: availability of Si—H, O—Si—H, Si—O—Si and others links in the surface area of the porous silicon [12]. Moreover, the electrolyte's fluorine capable to deeply penetrate into the silicon under surface of the media interface [19]. It should be noted, that similar penetration of fluorine into the silicon is observed in plasma etching of silicon in fluorine-containing compounds [20]. A fluorine also can affect on the near-surface insulating film, modifying its structure. The "fast" surface states are usually located on the inner surface of the dielectric layer, which are characterized by the capture time of the order of $10^{-8} \dots 10^{-3}$ s. The "slow states" with a large capture time — from 10^{-3} to several hours are located on the outer surface's layer. A fluoride, penetrating deeply into the silicon is able to modify the surface layer and to form charge trapping centers inside of the silicon [19]. The "slow states" contribute into the kinetics of processes of the sensory structures based on porous silicon. The dynamics of pore formation and reaction of the sensory structures based on porous silicon on affection of the atmosphere of polar molecules have much in common.

Recharging of the conditions can lead to a potential drop on a dielectric film, which will prevent penetration of the charge of a certain sign through it. In this case, the potential drop in the film need to be taken with the opposite sign, which must be taken into account in the appropriate equations. Recharge of surface states has been studied in details in [21, 22], in which it was noted that appearance of the oscillatory phenomena is associated with the direction of the CVC passage (firstly — from minus to plus or conversely). Only in one case there is a section with a negative differential conductance, where the current decreases through the system with increasing voltage. This site is associated with oscillatory processes for dynamic variables (fig. 2).

Curve 1 in fig. 2 shows the dependence $U(t)$, corresponding to formation of the porous silicon of the zero type of morphology, the curve 2 shows the relation $U(t)$ for the first type, the curve 3 shows the relation $U(t)$ for the second type, curve 4 shows the relation $U(t)$ for the third type. The dependence $U(t)$ for the electrolyte solution of HF and isopropyl alcohol (IPA) in a ratio of 1:3 by volume is reflected by the curves 5 and 6, taken under the different exposure of the anodized samples, in what connection the dependence 6 corresponds to a higher light intensity of the anodized sample in comparison to the dependence 5.

According to the model of electrochemical etching proposed in [15], an exchange of the charges of both signs with a surface between two media occurs. Capture of the negative sign (electrons) by surface states of the carriers complicates their delivery to the surface. An asymmetrical barrier became formed, which prevents penetration of the charged reactants to the reaction site and their equilibrium movement. This fact causes the change of sign in the potential fall $V_d = e\epsilon h$ (in the units of energy, in what connection $V \equiv e \cdot U$, U — the potential difference in volts, e — electron's charge) in the dielectric film in the term that describes the probability of fade

into the reaction (τ_s^{-1}), at that ϵ — the intensity of the field in the insulating film, h — its thickness. In this case, CVC for sensor structures based on porous silicon coincides with CVC of the silicon anodized in HF solution, presented in [11]. (On these CVC, the section with a negative differential conductivity precedes to the oscillations.) The dynamics of CVC of the silicon anodized in HF solution depending on the experimental conditions in the presence of oscillations in the dynamic parameters was studied in [7–11] and represented in fig. 2.

Thus, the experiments indicate the presence of periodic synchronous processes in the system silicon-electrolyte based on hydrofluoric acid, which are associated with the active exchange by charged components between various media via surface states. Their properties may vary considerably under the influence of molecules (atoms) in the medium and surface modification, particularly at forming of a thin dielectric layer. All these facts can significantly affect on the dynamics of processes in the system.

System of equations for the dynamical variables

The system of equations describing the dynamics of the processes carried out, as follows:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{\Gamma_t - \Gamma}{\tau_A} - \frac{\Gamma}{\tau_d} - \frac{N}{\tau_s} + \rho h_p^{2/3} N; \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\Gamma - N}{\tau_T} - \frac{N}{\tau'_T} - \frac{N}{\tau_s} - \rho h_p^{2/3} N; \quad (2)$$

$$\frac{dh_p}{dt} = G - \rho h_p N - \mu h_p, \quad (3)$$

where $\tau_s = \tau_s^0 \exp\{(E_s - e\epsilon h)/k_B T\}$, $\tau_s^0 \approx 10^{-12}$ s — the characteristic time of molecular oscillations, E_s — the height of the barrier, $E'_s = E_s - e\epsilon h$ — the height of the surface barrier, changing due to appearance of the electric field in the surface film; k_B — Boltzmann constant; ρ , μ — corresponding coefficients; Γ — total surface concentration of neutral and charged molecules (atoms, ions); Γ_t — concentration of active adsorption centers (coincides with the concentration of traps); N — concentration of the charged ions (fluorine); τ_A , τ_d — the characteristic times of adsorption/desorption of the neutral molecules (atoms); τ_s — time of activation overcome of the surface barrier by a charged molecule (ion); τ_T and τ'_T — times of the forward and reverse tunneling of a charge carrier. It should be noted, that according to [3, 4, 16, 17], the active atoms (ions) primarily are the fluorine atoms. The charge in the film was neglected while composing the equation. Equation (1) describes the kinetics of arrival/departure of the neutral polar molecules on the surface states. In the right-hand side of equation (2), the first term is a number of the charged polar molecules, which formed as a result of tunneling of the electrons, the second term is a number of charged molecules, which lose the electrons as a result of the reverse process, the third term is a stream of charged molecules leaving the surface by activation manner. It should be noted, that the theoretical model of the surface processes, based on the equations (1)–(3), works well in explanation of the silicon etching in a fluorine-containing plasma, that as evidenced

by the analysis of the main experimentals. Furthermore, there is a relation: $\varepsilon = 4\pi eN/\varepsilon_1$.

To solve the system of equations (1)–(3) it is convenient to give up on the sizes. This decision was carried out numerically, moreover the exponent in the index in the value $\tau_s = \tau_s^0 \exp\{(E_s - e\varepsilon h)/k_B T\}$ was expanded in a line by the parameter $Y = e\varepsilon h/k_B T$ till the third degree inclusively, where ε was defined by the formula $\varepsilon = 4\pi eN/\varepsilon_1$. The sign at the parameter Y in the exponent was replaced at the opposite due to the recharge of surface states, the physical reason for it was noted above. Solution of the provided system of equations (1)–(3) for the dimensionless variables $x(\tau)$, $y(\tau)$, $z(\tau)$ at corresponding values of the parameters is shown in fig. 3. It is also possible to interpret the variable h_p , which describes the concentration of holes, as the subsurface concentration, which is measured not in terms of volume concentration (m^{-3}), but in terms of surface concentration (m^{-2}), as well as other relevant dynamic variables. All these arguments are related to the lack of experimental data needed for more accurate conclusions.

As can be seen from figs. 3, 4, the stable focus exists at the corresponding parameters for dynamic variables. We can see that there is also a solution in the form of a limit cycle for other parameters for dynamic variables. The size of the limit cycle is determined by the energy dissipation in the system.

Equations (1)–(3) describe the system in different areas. Equations (1) and (2) characterize the properties of the system in the near-surface region. Equation (3) includes the volumetric description. Based on this, parameter ρ , entering in these equations, may be slightly different for the equation (3), i. e., it should be replaced by ρ' .

A suggest was made in [7], that Andronov-Hopf bifurcation may occur in the silicon-electrolyte system based on solutions of hydrofluoric acid. This statement requires a careful theoretical analysis. The existence of a bifurcation birth of the limit cycle from the stable focus through soft excitation results from theoretical analysis and numerical solution. It should be noted that the experimental data indicate the presence of the regularities in the behavior of dynamical variables [7–11], theoretically established in this study, i. e., in good agreement with each other.

Issue statement and justification of the simulation algorithm of pore space formation

This section is devoted to the study of connection of the fractal properties of porous silicon with the mechanisms of the pore space formation, i. e., reasons of the self-similarity of the porous structures formed in semiconductor crystals of silicon. A particular attention was paid to the delivery mechanism of the holes involved into the electrochemical reactions. In fact, the fractal mode of formation of porous clusters in the silicon is associated with the large-scale invariance of the equations that govern the delivery of holes to the site of electrochemical reactions of dissolution. Physically, it can be carried out with a good conductivity of the electrolyte, when the interface has equipotential nature, and the charge distributes on it according to the curvature.

As shown in fig. 5, formation of the main types of porous structures can be correlated with CVC areas of pore formation in *n*-type silicon. The structure organized from clusters and

filled with microstructure (conventionally, this type of morphology is called type 0) become formed in the area of the initial CVC rise. The branching macro-clusters and microstructure become formed in the area of a sharp CVC rise (type 1). The elongated sparingly branched macro-clusters become formed in the area of CVC saturation (type 2). The unbranched clusters become formed in the area of the secondary sharp CVC rise (type 3). The porous structure of *n*-type silicon is useful for study due of the presence of macroscopic structures, along with the microstructure. CVC of the porous *p*-type silicon has no saturation area and the patterns of pore space formation differs from the patterns of pore space formation of *n*-type silicon.

Study of formation of the fractal porous clusters in silicon described in this section are based on computer simulation. Statement of the problem is based on the actual conditions of the experiments on formation of the porous silicon by anodizing of the appropriate substrate in a solution of hydrofluoric acid in a self-organization mode, i. e., without forming of special seeds, which primarily determine the development of the pore space. A typical formulation of the experimental part can be found in [3, 11]. Several aspects of the problem should be highlighted. Firstly, in general, setting of the three-dimensional problem is close to the Stefan problem with moving boundary [23]. The configuration of the boundary electrolyte/semiconductor varies in time, and the boundary extends into the sample, becoming more rugged. Secondly, the electrochemical reactions of silicon dissolving occur on the surface of the interface electrolyte/semiconductor, the exact nature of which has not been fully studied [3, 18, 24]. The mechanism of action of various types of additives in the electrolyte as surface-active agents (SAA) on the surface is unclear, resulting, apparently, to the redistribution of charge at the interface. Third, the developed theory is based on the model of pore space formation, which is defined by holes delivery to the site of electrochemical reactions [3, 11, 15], that is characteristic for *n*-type silicon; reactions behavior is associated with sequential fluorination of silicon [15].

Computer algorithm is based on consideration of the following scheme. It is known that the multistage electrochemical reactions occur on the boundary electrolyte/semiconductor with the positively charged particles (holes), which lead to the electrochemical dissolution of silicon in the presence of potential difference between the electrolyte (cathode) and the silicon (anode). The holes become diffusively delivered to the boundary electrolyte/silicon from the depth of the semiconductor with appropriate external potential, which participate in electrochemical reactions. For occurrence of the holes, the *n*-type semiconductor crystals of silicon required to be irradiated by electromagnetic radiation. During formation of the pore space, the boundary between the media becomes heavily modified. The pore space is filled with a conductive electrolyte that contributes along with external applied potential into formation of the resulting electric potential field, which controls the movement of holes.

The movement of accidentally wandering holes at the potential of a different nature was modeled on the base of the equation [25]:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{U}(\mathbf{r}, t), \quad \mathbf{r}(t_0) = \mathbf{r}_0, \quad (4)$$

where $\mathbf{U}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{u}_f(\mathbf{r}, t) + \mathbf{u}_r(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{u}_f(\mathbf{r}, t)$ — the determined component of the velocity field associated with the external applied potential, $\mathbf{u}_r(\mathbf{r}, t)$ — a random component of the velocity field, which depends on the temperature of the silicon substrate, $\mathbf{r}_0$ — the initial position of the wandering particle.

The determined and random components of velocity fields are associated with the flow of particles:

$$f\mathbf{u}_f = -\frac{1}{\gamma}f\frac{\partial\phi}{\partial\mathbf{r}}, \quad f\mathbf{u}_r = -D\frac{\partial f}{\partial\mathbf{r}}, \quad (5)$$

where $f \equiv f(\mathbf{r}, t)$ — distribution function of the charge carriers (holes); D — diffusion coefficient (for holes — D_h); γ — coefficient describing the resistance of the medium; ϕ — potential equal to the sum of potentials $\phi = \phi^{ext} + \phi^{clust} + \phi^{non-elect}$, and ϕ^{ext} , ϕ^{clust} , $\phi^{non-elect}$ — potentials, respectively: external, of a cluster becomes formed and of non-electrical nature (e. g., deformational).

The expressions (5) allow us to formulate the studied problem in terms of the distribution function and to relate the task with the Fokker—Planck equation. The movement of holes is expected to be thermalized, i.e. the velocity distribution will follow the Maxwellian rule, and the holes are in thermal equilibrium with the lattice.

The new position of the particle is calculated according to the formula

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = \mathbf{r}(t) + (\mathbf{u}_f + \mathbf{u}_r)\Delta t, \quad (6)$$

which is a formal solution of the equation (4), at that $\mathbf{r}(t)$ represents the position of the particle in the previous step, Δt — time step.

Direction of the vector $\mathbf{u}_r$ is chosen randomly according to the algorithm described below, and the length takes equal to the root-mean-square velocity of the particle of an ideal electron gas: $|\mathbf{u}_r| = \sqrt{3kT/m_h^*}$, where k_B — Boltzmann's constant, T — absolute temperature (variable parameter), m_h^* — effective mass of a hole in silicon.

The velocity vector $\mathbf{u}_f$ in the model is a deterministic value, which is determined by the electric field and is calculated according to the formula: $\mathbf{u}_f = \mu_h \mathbf{E}$, where $\mathbf{E}$ — the vector of the strength of the electric field; μ_h — hole mobility in silicon.

Although the second term in equation (4) has a simple linear dependence on time, but its contribution to the motion described by the second term of the form of $\mathbf{u}_r \Delta t$, has purely stochastic character of σdW type (σ — the root-mean-square deviation of a random variable, dW — random Wiener process), so that this equality has a direct analogy with the Ito equation [26], and the problem is close to the problem Ornstein—Uhlenbeck.

Scale invariance of an issue

In case of motion of thermalized particles, i. e. charge carriers, which are in thermal equilibrium with the lattice, so that the velocity distribution follows the Maxwell type, the equation of continuity for the particles' flux leads to the result:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \text{div}(f\mathbf{U}) = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} - \text{div}\left(f \cdot \frac{1}{\gamma} \text{grad}\phi\right) - D_h \Delta f = 0, \quad (8)$$

which is similar to the Fokker—Planck diffusion. It should be noted, that the relaxation times of electrons' impulse at room temperature in semiconductors are in the order of $10^{-12} \dots 10^{-14}$ s. The potential ϕ^{clust} can be found from the Poisson equation $\Delta\phi = -4\pi\rho$. In the case of free carrier concentration is equal to zero, ρ goes to the Laplace equation, and $\mathbf{u}_f = \mu_h \mathbf{E}$, $\mathbf{E} = \mathbf{E}^{ext} + \mathbf{E}^{clust} + \mathbf{E}^{non-elect}$, where $\mathbf{E}^{non-elect} = -\text{grad}(\phi^{non-elect})$, μ_h — the mobility of holes in silicon, Δ — Laplace operator.

The diffusion equation lays in the basis of (5): $\partial f / \partial t = D_h \Delta f$, which is invariant under scale transformations [27]: $\mathbf{r}' = \lambda^{1/2} \mathbf{r}$, $t' = \lambda t$, where λ — dimensionless scaling factor.

For a more detailed analysis of the equation (8) let us re-write it as:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = D_h \Delta f + \frac{1}{\gamma_h} \frac{\partial\phi}{\partial\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f}{\partial\mathbf{r}} + \frac{1}{\gamma_h} f \frac{\partial^2\phi}{\partial^2\mathbf{r}}, \quad (9)$$

where $1/\gamma_h = \mu_h$ — mobility of a particle (hole). Potential ϕ satisfies the Poisson equation or Laplace equation in the absence of free charges. Let us analyze in details the second term in the equation (9). Since the relation $\mathbf{E} = -\partial\phi/\partial\mathbf{r}$ is true, the scale invariance of expression (9) is defined by the transformation of potential or by the field strength in the case if the transformations $\mathbf{r}' = \lambda^{1/2} \mathbf{r}$, $t' = \lambda t$ are true for spatial variables. If, for example, the potential has the form of the Coulomb potential ($\phi = k \cdot q/r$, k — dimensional factor, moreover, in the CGS electrostatic system $k = 1$), then, if the charge is converted according to: $q' = \lambda^{1/2} q$, the expression (9) remains unchanged after the transformation:

$$\mathbf{r}' = \lambda^{1/2} \mathbf{r}, \quad t' = \lambda t, \quad q' = \lambda^{1/2} q. \quad (10)$$

In this case, the volume charge density becomes locally transformed as the inverse square S , which is proportional to the Gaussian curvature K : $\rho = q/V \rightarrow [\lambda^{1/2}/\lambda^{3/2}] = [\lambda^{-1}] \rightarrow \rightarrow 1/S \rightarrow K$, where K — Gaussian curvature of space at a given point, which is equal to the product of the two principal curvatures at the point $K = k_1 k_2$, so $[k] = [1/r]$, r — the radius of curvature [28, 29]. Last ratio $1/S \rightarrow K$ can be obtained using Gauss' theorem on the existence of the relationship between the surface area S_f , the area of its spherical image S_{sph} and Gaussian curvature K and the surface f . This relationship is expressed by Gauss theorem: the ratio of the area of the spherical image of the area on the surface to the area of this region approaches to the absolute value of the Gaussian curvature of the surface at this point of surface, when the region shrinks to this point [28]: $\lim_{\gamma \rightarrow 0} (S_{sph}/S_f) = K$, where γ — the boundary of region S_f .

This fact allows us in the analysis to replace the surface area near the selected point with the area of a unit radius (spherical image), divided by the Gaussian curvature.

It should be noted, that the electric field at the interface is transformed as the surface charge density ($E = q/r^2 \rightarrow \rightarrow [\lambda^{1/2}/\lambda] = [\lambda^{-1/2}]$), i.e., it is proportional to the average curvature of region $M = 1/2(k_1 + k_2)$, where k_1 , k_2 — the principal curvatures of the surface [29]. The relationship for strength of electric field $\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial n} = -2M = -\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$ is valid

on the curved surface of a charged conductor, moreover, r_1 , r_2 — the principal radii of a curvature [30]. Gaussian and average curvatures are related to each other by the relation $M^2 - K = 1/4(1/r_1 - 1/r_2)^2 \geq 0$. It should be noted, that in the umbilical points (when $r_1 = r_2$), where the Dupin indicatrix is circular, the relation $M^2 = K$ is true, so that you can use any of the values of M or K to describe the properties of a curved surface.

For a system of two conducting spheres connected by a conductor, we have the relations: $\phi_1 = \phi_2 = \text{const}$, i. e. the equality of potentials of the two spheres, and for the charges we have the relations: $q_1 = Qr_1/(r_1 + r_2) \sim r_1$, $q_2 = Qr_2/(r_1 + r_2) \sim r_2$, where $Q = q_1 + q_2$ — total charge of the sphere of radii r_1 и r_2 , where $q_1/q_2 = r_1/r_2$, i. e. the charges are proportional to the radii of the spheres. The following relation is true for charge densities: $q_1/4\pi r_1^2 > q_2/4\pi r_2^2$ (or $q_1 K_1 > q_2 K_2$, K_1 , K_2 — Gaussian curvatures of spheres with the radii r_1 and r_2 , respectively), if $r_1 < r_2$, then $\sigma_1 > \sigma_2$. Thus, a distribution of charge on the curved surfaces occurs in accordance with their curvature, moreover, the charge density is greater on the surface of large curvature. It should be noted, that the expression for the charge density $\rho = q/V \rightarrow [\lambda^{1/2}/\lambda^{3/2}] = [\lambda^{-1}] \rightarrow K$ uses Gaussian curvature, i.e., the product of the principal curvatures. Therefore, if the distribution of charge density on the surface of the interface in the formed separate porous cluster occurs proportionally to the Gaussian curvature, so the scale transformations (10) keep the equation (9) unchanged. The constancy of the potential along the surface of the interface "electrolyte/silicon" indicates the equipotential nature of the boundary [11].

Study of patterns for decisions and results of computer simulation

In the case where the Laplace equation is true for description of the potential, the self-similar solution of the equation (9) has the form [31]:

$$f(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{(4\pi D_h t)^{3/2}} \exp\left\{-\frac{(\mathbf{r}-\mathbf{u}_f t)^2}{4D_h t}\right\}, \quad (11)$$

where $\mathbf{u}_f = \mu_h \mathbf{E}$. The expression (11) represents a Gaussian curve and appears a self-similar solution of the equation (9) at $\Delta\phi = 0$.

When using a discrete random walk algorithms, it can be shown that the solution can be factored into a similar (11) formula. As it follows from the analysis of works by the laws of fractal growth [27, 32, 33], the tags of the fractal structures become developed most intensively. The fractal growth of a porous cluster occurs when the local charge density is higher in places of a greater curvature of a cluster. Probability of growth in these areas increases.

A software package that gives wide opportunities for visualization of cluster growth in two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) cases was developed to study the laws of fractal cluster growth. It allowed to study any horizontal or vertical cross section of the system at any time of process simulation and to take snapshots.

The results of study of the system on the basis of the developed model and its comparison with experimental data are given below. The crystallographic direction (100) was mainly studied. Fig. 6 shows the calculations of the potential distribution and two-dimensional porous structures, as well as a photograph of one of the porous structures obtained in *n*-type silicon. It is noticeable that the potential distribution is uneven, so its gradient reaches a maximum near the tags of the pores. Near the lower limit (fig. 6a), the potential is distributed fairly evenly. The configuration of the structures (fig. 6a) is in good agreement with the structures whose photos were published in [34].

Fractal dimension D_f was calculated according to the formula [27]: $D_f = \lim_{\delta \rightarrow 0} (-\ln N(\delta)/\ln \delta)$, where δ — diameter of the balls that cover the structure; $N(\delta)$ — the minimum number of balls with a diameter δ , necessary for its coverage. Calculation of fractal dimensions and 3D-modeling are shown in figs. 7 and 8.

Thus, the analysis of self-similar solutions of the equation (9) of Fokker—Planck type allows us to understand the nature of formation of the fractal porous clusters in silicon. One of the possible mechanisms of formation of the fractal porous clusters in semiconductor silicon crystals associated with delivery of the holes to the interface was shown, where they participate in the electrochemical reactions of silicon dissipation. Self-organization, leading to formation of the porous fractal clusters occurs in a range of settings $E^{clust} > E^{ext}$, i. e. when the motion of holes near the pores is governed by the influence of fields of the clusters being formed. With increase of external applied voltage, the movement of holes becomes less chaotic, and the less branching clusters become formed.

The fractal dimensions of two-dimensional clusters ($D_f \leq 1,5$) obtained on the basis of calculations are intermediate between the dielectrics' breakdown models ($D_f = 4/3 = 1,33$) and aggregation models limited by diffusion ($D_f = 5/3 \approx 1,7$) [33]. The fractal dimension in the model of viscous fingers consists for $D_f = 1,3 \pm 0,1$ for small clusters, whereas for the developed clusters in a radial geometry were obtained $D_f = 1,7 \pm 0,05$ [35] (see. fig. 7). The fractal dimension $D_f \approx 2,39$ for three-dimensional clusters (fig. 8) in the model is in good agreement with the value $D_f = 2,36...2,47$, experimentally measured by atomic force microscopy [36].

Discussion and conclusions

The essential point for interpretation of the effects is the relationship of local and global behavior of the dynamical variables [38]. The above mentioned equations (1)—(3) are true for the processes homogeneous by its surface. In the case, where the system represents a set of the local areas, where the processes occur different in the speed of electrochemical reactions, the specificity of their occurrence, etc., the system can has the various development modes of the overall process of pore formation, which are characterized by different behavior of dynamical variables. This aspect of clustering and synchronization of a dynamic system fragmented into separate regions requires further study, similar to that shown in [37]. A particularly important aspect — the presence of the dielectric layer of complex composition, which in view of the presence of the charge states, makes a significant contribution into the dynamic behavior of the system parameters.

In this paper, we considered one of the possible mechanisms of formation of the fractal clusters in silicon, associated with the self-similarity of the random walk [27, 32]. The phenomenon of oscillation of the dynamic parameters in the anodizing process under certain conditions was found in a large number of systems. The presence of additives in the electrolyte, which lead to formation of the oscillatory dynamics of silicon anodization process of in $\text{HF}/\text{H}_3\text{PO}_4$ compositions, also was emphasized in [38]. It was experimentally found, that the boundary layer similar to oxide becomes formed in the depth of pores. The voltage oscillations were observed in [39] during anodization of InP substrates with n -type conductivity of orientation (100) in aqueous solutions of HCl at high constant current densities. The oscillations under certain parameters resulted in a synchronized periodic changes in the contours of the pore channels, similar to the shown in fig. 2 of this paper. The current oscillations during anodization of aluminum in potentiostatic mode in solutions of $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ were found in [40]. The profile of pores in these modes also was periodically changed. The current's oscillations were also detected at anodizing of heat-resistant alloys of ЖС6К type (the alloys, including nickel and chrome) in the electrolytes on the basis of NaNO_3 [41]. Nickel films in aqueous and aqueous-organic solutions of sodium nitrate electrolytes show oscillatory dependencies of current versus time [41]. In all these works there is a lack of the theory, which leads to the analytical description of the oscillating behavior of a system. The present work provides a model based on the symbolic description of laws of the dynamical system, which lead to a periodic dependence of the dynamic parameters.

Thus, the analysis of self-similar solutions of the equation (9) of Fokker–Planck type allows us to understand the nature of formation of the fractal porous clusters in silicon. The self-organization, which leads to formation of the porous fractal clusters occurs in a range of values $E^{\text{clust}} > E^{\text{ext}}$, when the interface "semiconductor/dielectric" appears an equipotential surface and the charge distribution on it becomes proportional to the curvature of the surface. This becomes achieved by good conductivity of the electrolyte and absence of the surface-active additives therein. The fractal structure of the cluster becomes formed, if the field of the surface distributed charge determines the motion of a hole to the place the electrochemical reaction.

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the agreement № 14.574.21.0099 from 08.26.2014 (The unique identifier of the applied scientific research RFMEFI57414X0099).

References

1. Prigozhin I. *Ot sushhestvujushhego k voznikajushhemu*. M.: Nauka. 1985. 327 p.
2. Gaponov-Grehov A. V., Nekorkin V. I. *Nelinejnyy volny'2010*: [sbornik statej]. Nizhnij Novgorod: IPF RAN. 2011. 462 p.
3. Smith R. L., Collins S. D. Porous silicon formation mechanisms. *J. Appl. Phys.* 1992. V. 71, N. 8. P. R1–R22.
4. John G. C., Singh V. A. Porous silicon: theoretical studies. *Phys. Reports.* 1995. V. 263. P. 93–151.
5. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics. *Surf. Sci. Reports.* 2000. V. 38. P. 1–126.
6. Foell H. Properties of silicon-electrolyte junctions and their application to silicon characterization. *Appl. Phys. A.* 1991. V. 53. P. 8–19.
7. Prokaznikov A. V., Buchin E. Yu. Character of dynamics in the electrolyte- n -type silicon system during anodization in HF solutions. *Phys. Low-Dim. Struct.* 1997. V. 5/6. P. 117–122.
8. Buchin E. Yu., Prokaznikov A. V. Harakter dinamiki sistemy jelektrolit-kremnij n tipa pri anodirovanii v rastvorah plavikovo kisloty. *Pis'ma v ZhTF.* 1997. V. 23, N. 5. P. 1–7.
9. Carstensen J., Prange R., Poprikov G. S., Foell H. A model of current oscillations at the Si-HF-system based on a quantitative analysis of current transients. *Appl. Phys. A.* 1998. V. 67, N. 4. P. 459–467.
10. Carstensen J., Prange R., Poprikov G. S., Foell H. A model for current-voltage oscillations at the silicon electrode and comparison with experimental results. *J. Electrochem. Soc.* 1999. V. 146, N. 3. P. 1134–1140.
11. Kochergin V., Foell H. Porous semiconductors. Optical properties and applications. Springer, 2009. 207 p.
12. Buchin E. Yu., Churilov A. B., Prokaznikov A. V. Different morphology aspects in n -type porous silicon. *Appl. Surf. Sci.* 1996. V. 102. P. 431–435.
13. Wesolowsky M. Fractal-like model of porous silicon. *Phys. Rev. B.* 2002. V. 66. P. 205207.
14. Nychyporuk T., Lysenko V., Barbier D. Fractal nature of silicon nanocrystallites. *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71. P. 115402.
15. Lehmann V., Gosele U. Porous silicon formation: a quantum wire effect. *Appl. Phys. Lett.* 1991. V. 58, N. 8. P. 856–858.
16. Propst E. K., Kohl P. A. The electrochemical oxidation of silicon and formation of porous silicon in acetonitrile. *J. Electrochem. Soc.* 1994. V. 141, N. 4. P. 1006–1013.
17. Trucks G. W., Raghavachari K., Higashi G. S., Chabal Y. J. Mechanism of HF etching of silicon surface: a theoretical understanding of hydrogen passivation. *Phys. Rev. Lett.* 1990. V. 65, N. 4. P. 504–507.
18. Vanmaekelbergh D., Searson P. C. On the electrical impedance due to the anodic dissolution of silicon in HF solutions. *J. Electrochem. Soc.* 1994. V. 141, N. 3. P. 697–702.
19. Prokaznikov A. V., Svetovoy V. B. Fluorine penetration through the whole silicon wafer during anodization in HF solution. *Phys. Low-Dim. Struct.* 2002. V. 9/10. P. 65–69.
20. Winters F. H., Graves D. B., Humbird D., Tougaard S. Penetration of fluorine into the silicon lattice during exposure to F atoms, F_2 , and XeF_2 : Implications for spontaneous etching reactions. *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2007. V. 25. P. 96–103.
21. Bilenko D. I., Belobrovaya O. Ya., Zharkova E. A., Mysenko I. B., Khasina E. I. The effect of adsorption on the electrical properties of structures based on oxidized porous silicon. *Semiconductors.* 2002. V. 36, N. 4. P. 466–471.
22. Bilenko D. I., Belobrovaya O. Ya., Zharkova E. A., Terin D. V., Khasina E. I. The properties of structures based on oxidized porous silicon under the effect of illumination and a gas environment. *Semiconductors.* 2005. V. 39, N. 74. P. 800–804.
23. Lashin A. M. An investigation of the dynamics of first-order phase transition during the directional solidification of a pure metal into an undercooled melt on the base of phase-field model. *Preprint Inst. Appl. Math. RAS. Moscow*, 2001. 40 p.
24. Zhang X. G. Mechanism of pore formation on n -type silicon. *J. Electrochem. Soc.* 1991. V. 138. N. 12. P. 3750–3756.
25. Kljackin V. I., Gurarij D. Kogerentnye javleniya v stohasticheskikh dinamicheskikh sistemah. *UFN.* 1999. V. 169, N. 2. P. 171–207.
26. Allen E. *Modelling with Ito stochastic differential equation*. Springer. 2007. 230 p.
27. Feder E. *Fraktaly*. M.: Mir, 1991. 254 p.
28. Pogorelov A. V. *Differencial'naja geometrija*. M.: Nauka, 1974. 176 p.
29. Dubrovin B. A., Novikov S. P., Fomenko F. T. *Sovremennaja geometrija*. M.: Nauka, 1979. 759 p.

30. Dzhekson D. *Klassicheskaja jelektrodinamika*. M.: Mir, 1965. 702 p.
31. Isihara A. *Statisticheskaja fizika*. M.: Mir, 1973. 471 p.
32. P'etronero E., Tozatti L. *Fraktaly v fizike*. M.: Mir, 1988. 672 p.
33. Turkevich L. A., Scher H. Occupancy-probability scaling in diffusion-limited aggregation. *Phys. Rev. Lett.* 1985. V. 55, N. 9. P. 1026—1029.
34. Aravamudhan S., Luongo K., Poddar P., Srikanth H., Bhatsali S. Porous silicon templates for electrodeposition of nanosstructures. *Appl. Phys. A*. 2007. V. 83. P. 773—780.
35. Nitman I., Dakkor J., Stenli H. Kogda vjazkie "pal'cy" imejut fraktal'nuju razmernost'. *Fraktaly v fizike*. Ed. E. P'etronero, L. Tozatti. M.: Mir, 1988. P. 266—282.
36. Happon N., Fujiwara N., Iwamatsu M., Horii K. Atomic force microscopy study of self-affine fractal roughness of porous silicon surface. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998. V. 37. P. 3951—3953.

37. Wang W., Kiss I. Z., Hudson J. L. Experiments on arrays of globally coupled chaotic electrochemical oscillators: synchronization and clustering. *Chaos*. 2000. V. 10, N. 1. P. 248—256.
38. Parkhutik V. New effects in the kinetics of the electrochemical oxidation of silicon. *Electrochimica Acta*. 2000. V. 45. P. 3249—3254.
39. Langa S., Carstensen J., Tiginyanu I. M., Christoffersen M., Foll H. Self-induced voltage oscillations during anodic etching of n-InP and possible applications of three dimensional microstructures. *Electrochem. and Solid State Lett.* 2001. V. 4, N. 6. P. G50—G52.
40. Lee W., Kim J.-G., Gosele U. Spontaneous current oscillations during hard anodization of aluminum under potentiostatic conditions. *Advanced Functional Materials*. 2010. V. 20, N. 1. P. 21—27.
41. Nevskij O. I., Burkov V. N., Grishina E. P., Gavrilova E. L., Balmasov A. V., Noskov A. V., Doncov M. G. *Jelektrohimicheskaja razmernaja obrabotka metallov i splavov. Problemy teorii i praktiki*. Ivanovo: Ivan. gos. him. tehnol. un-t, 2006. 282 p.

УДК 621.3.049.76:621.3.088

Д. Г. Грязин, д-р техн. наук, доц., e-mail: gdg@mt.ifmo.ru, О. О. Величко, гл. метролог, нач. отд., ОАО "Концерн ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ И МОДУЛЕЙ ПРИ ИХ ГРУППОВОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ. МЕТОД И ЕГО ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Поступила в редакцию 27.10.2014

Предложен метод оценки случайной составляющей динамической погрешности микромеханических датчиков и модулей на основе воспроизведения колебаний с заданным спектром частот. Метод заключается в сравнении спектров входного воздействия со стенда и выходного сигнала с исследуемого датчика или модуля. Проведены экспериментальные исследования разработанного метода. Оценено среднее квадратичное отклонение погрешности выработки углов качки микромеханической бесплатформенной инерциальной навигационной системы, которое составило $0,8^\circ$, что соответствует типовой погрешности для приборов подобного класса. Применение указанного метода позволит сократить время оценки характеристик датчиков при их групповом изготовлении.

Ключевые слова: заданный спектр частот, случайная составляющая динамической погрешности, входное воздействие, среднее квадратичное отклонение погрешности выработки углов качки

Введение

Особенностью изготовления изделий микро-системной техники является их групповой выпуск. Как правило, эти изделия состоят из кристалла первичного преобразователя и кристалла системы управления и обработки информации. В то время как технология изготовления полупроводниковых элементов хорошо отработана на основе предыдущего значительного опыта специализированных предприятий, изготовление микродатчиков по такой технологии представляет определенную трудность. Достаточно сказать, что выход годных кристаллов микродатчиков в мире составляет не более 60 %. Не являются исключением и микромехани-

ческие инерциальные датчики (ММД) — гироскопы и акселерометры, изготавливаемые на отечественных предприятиях, выход годных которых значительно меньше. Особенностью ММД является значительный разброс их характеристик при групповом изготовлении. Например, масштабный коэффициент у микромеханических гироскопов фирмы *Analog devices* [1] типа ADXRS не нормируется, а разброс чувствительности нормируется в пределах 5—10 % от типового значения. Указанная особенность заставляет проводить индивидуальную калибровку датчиков. При этом их стоимость возрастает на порядок. Уменьшение стоимости калибровки ММД связано с применением групповых методов. При этом необходимо, чтобы технологи-

ческий процесс испытаний позволял калибровать несколько характеристик датчиков за минимальное время, и желательно, чтобы он выполнялся в автоматизированном режиме. Следует отметить, что до настоящего времени в России не принята номенклатура характеристик ММД, обязательных к нормированию изготовителями, что делает затруднительным сравнение характеристик ММД разных изготовителей. Отметим и то, что в микромеханических гироскопах (ММГ), изготавливаемых в ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" принята номенклатура характеристик, приведенная в работе [2]. Очевидно, что указанные особенности калибровки ММД относятся и к микромеханическим модулям, в состав которых входят несколько ММД. Стоимость этих модулей также должна быть минимальной. Ситуация осложняется тем, что специализированного оборудования для выполнения этих технологических операций не выпускается.

Метод оценки характеристик микромеханических датчиков и модулей

Оценка динамических характеристик датчиков, в том числе частотных, занимает значительное время, в некоторых случаях несколько рабочих смен. Это связано с необходимостью проведения испытаний на каждой частоте в отдельности с последующей обработкой значительных объемов данных.

Для сокращения времени оценки погрешностей ММД (гироскопов и акселерометров) в динамическом режиме предложен метод на основе воспроизведения колебаний в заданном спектре частот. Предлагаемый метод относится к числу методов сравнения. При этом образцовым является сигнал стенда, задающего полигармонические колебания в заданном спектре частот. С ним сравнивается сигнал микромеханического инерциального измерительного модуля или датчика, установленного на стенде. На основе полученных реализаций осуществляется расчет спектральных характеристик входного и выходного сигналов путем перехода из временной области в частотную с помощью преобразования Фурье. Сравнение полученных спектров входного и выходного сигналов позволяет оценить дисперсию погрешности датчика или модуля в заданном частотном диапазоне.

Пусть $x(t)$ — входной сигнал со стенда (эталонное входное воздействие), $y(t) = x(t) + \varepsilon(t)$ — выходной сигнал с датчика или модуля, где $\varepsilon(t)$ — погрешность датчика или модуля. Тогда

$$\varepsilon(t) = y(t) - x(t).$$

Спектральная плотность погрешности $S_\varepsilon(f)$ в соответствии с теоремой Винера—Хинчина [3] опре-

деляется как одностороннее преобразование Фурье от корреляционной функции погрешности:

$$S_\varepsilon(f) = 2 \int_0^\infty R_\varepsilon(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (1)$$

где $R_\varepsilon(\tau)$ — корреляционная функция погрешности; τ — интервал корреляции.

Поскольку сигналы на входе и выходе системы являются коррелированными, то

$$R_\varepsilon(\tau) = R_x(\tau) + R_y(\tau) - 2R_{xy}(\tau), \quad (2)$$

где $R_x(\tau)$ — автокорреляционная функция входного сигнала со стенда; $R_y(\tau)$ — автокорреляционная функция выходного сигнала с датчика или модуля; $R_{xy}(\tau)$ — взаимная корреляционная функция.

Подставляя выражение (2) в (1), получим спектральную плотность погрешности исследуемого датчика или модуля, которая характеризует дисперсию погрешности во всем частотном диапазоне. Искомая дисперсия определяется как площадь под графиком полученной спектральной плотности:

$$D = \sigma^2 = \int_0^\infty S(f) df.$$

Преимущества разработанного метода заключаются в том, что время, необходимое для определения динамических погрешностей микромеханических инерциальных датчиков и инерциальных измерительных модулей на их основе, значительно сокращается за счет исключения необходимости испытаний на каждой частоте в отдельности и составляет 10...15 мин. Кроме того, метод позволяет повысить достоверность оценки динамических погрешностей при измерениях в конкретных условиях эксплуатации, характеризующихся задаваемыми спектрами входного воздействия.

Стенды для оценки динамических характеристик датчиков и модулей

Очевидно, что специализированное оборудование для оценки динамических характеристик ММД и модулей на их основе серийно не выпускается. В связи с этим в ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" были разработаны два стенда для динамических испытаний микромеханических датчиков и модулей на их основе. Первый из них — двухосный стенд качки [4], работающий в расширенном частотном диапазоне. Он применим для испытаний модулей высокодинамичных объектов. Двухосный стенд (рис. 1) обеспечивает задание колебаний по двум перпендикулярным осям в диапазоне частот 0,1...4 Гц с фиксированными амплитудами 15 и 25° по каждой оси соответственно.

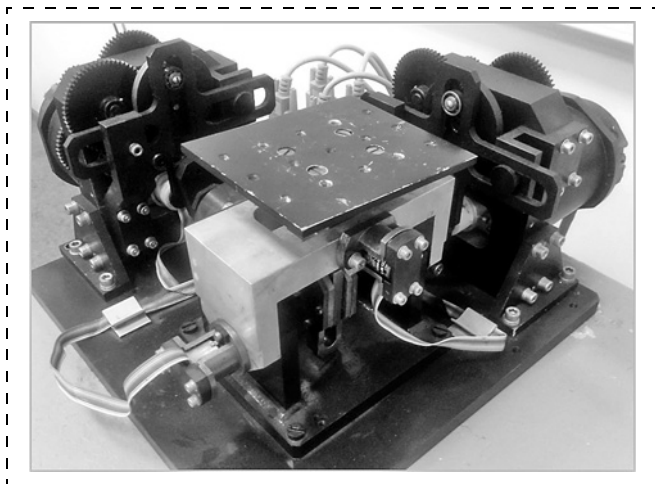


Рис. 1. Общий вид двухосного стенда качки
Fig. 1. A general view of a two-axle pitching stand

Стенд представляет собой раскачивающуюся в двух плоскостях платформу, установленную на крестообразном подвесе. Колебания платформы по гармоническому закону обеспечиваются кинематической передачей стенда, преобразующей вращательное движение валов двигателей в возвратно-поступательное движение с помощью кривошипно-кулисных механизмов. Расширение частотного диапазона работы достигается за счет установки приводных двигателей каждой оси на основании устройства и таким образом уменьшения момента инерции подвижных частей. Применение специального трехступенного подшипника качения обеспечивает устранение перекрестной связи, при кото-

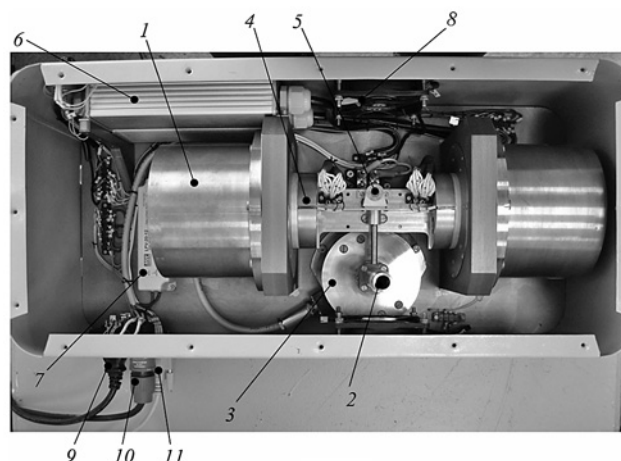
рой колебания по внутренней оси могут модулировать колебания по внешней оси. Съем данных об угловом положении платформы выполняется с помощью цифровых фотоэлектрических преобразователей углового перемещения.

Второй стенд — стенд для воспроизведения высокочастотных угловых колебаний [5] (рис. 2). Он построен по схеме на основе двух электромагнитных приводов, преобразующей осевые возвратно-поступательные движения подвижной катушки управления электромагнитного привода в угловые колебательные движения платформы через кривошип посредством двухступенного шарнира. Использование двух приводов позволяет увеличить момент на валу платформы, а также компенсировать погрешности, вызванные их конструктивными особенностями. Информация об угловом положении платформы стенда снимается с помощью датчика угла поворота платформы, размещенного на оси платформы.

Системы управления разработанных стендов позволяют задавать значения частоты и амплитуды колебаний как в ручном режиме, путем ввода соответствующих значений в блоки пользовательского интерфейса, так и в автоматическом — по заранее заданному закону. Для управления двухосным стендом качки в автоматическом режиме необходимо создать файл формата *.txt, в который заносятся данные о значении задаваемых частот колебаний по осям и времени их изменения. Отметим, что в связи с особенностями существующей системы управления изменение частот колебаний возможно лишь с шагом 0,1 Гц. Для стенда воспроиз-



a)



b)

Рис. 2. Стенд для воспроизведения высокочастотных угловых колебаний: а — общий вид стенда; б — вид без крышки; 1 — электромагнит; 2 — вал поворотной платформы; 3 — узел датчика угла; 4 — якорь с катушками управления на линейной направляющей; 5 — цилиндрический шарнир; 6 — источник питания катушек намагничивания; 7 — источник питания вентиляторов; 8 — вентилятор; 9 — разъем подключения питания; 10 — разъем подключения выхода усилителя; 11 — разъем подключения датчика угла
Fig. 2. Stand for simulation of high-frequency angular oscillations: a — general view; b — view without cover; 1 — electromagnet; 2 — shaft of the rotating platform; 3 — angle sensor unit; 4 — anchor with control coils on the linear guide; 5 — cylindrical joint; 6 — magnetizing coils' power supply; 7 — fans' power supply; 8 — fan; 9 — power connector; 10 — amplifier output connector; 11 — angle sensor connector

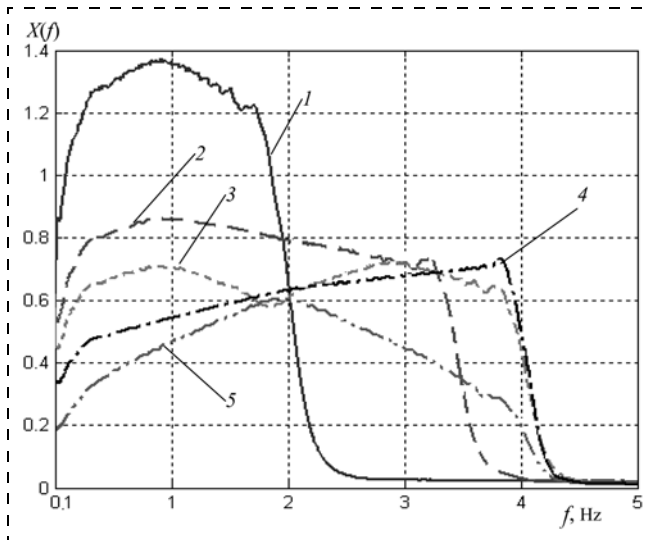


Рис. 3. Амплитудные спектры сигнала с двухосного стенда качки: $X(f)$ — амплитудный спектр сигнала; f — частота колебаний; — (кривая 1) — диапазон частот — до 2 Гц, спектральный максимум — на частоте 1 Гц; ---- (кривая 2) — диапазон частот — до 4 Гц, спектральный максимум — на частоте 1 Гц; (кривая 3) — диапазон частот — до 4 Гц, спектральные максимумы — на частотах 1 Гц и 3 Гц; -.-.- (кривая 4) — диапазон частот — до 4 Гц, спектральный максимум — на частоте 4 Гц; -.-.-.- (кривая 5) — диапазон частот — до 4 Гц, спектральный максимум — на частоте 2 Гц

Fig. 3. Amplitude spectra of the signal from the biaxial pitching stand: $X(f)$ — the amplitude spectrum of the signal; f — oscillations frequency; — (curve 1) — frequency range below 2 Hz, spectral peak — at a frequency of 1 Hz; ---- (curve 2) — frequency range below 4 Hz, the maximum at a frequency of 1 Hz; (curve 3) — frequency range below 4 Hz, the maxima at a frequency of 1 Hz and 3 Hz; -.-.- (curve 4) — a frequency range below 4 Hz, the maximum frequency at 4 Hz; -.-.-.- (curve 5) — frequency range below 4 Hz, the maximum at a frequency of 2 Hz

ведения высокочастотных угловых колебаний необходимо в модели системы управления в Simulink вместо блоков задания постоянных значений по амплитуде и частоте угловой скорости разместить блоки, реализующие необходимые законы изменения этих параметров.

Подобная автоматизация изменения параметров колебаний позволяет реализовать воспроизведение нерегулярных колебаний с заданным спектром частот.

Экспериментальные исследования стендов для динамических испытаний датчиков и модулей

Для проведения экспериментальных исследований двухосного стенда качки (см. рис. 1) были сформированы управляющие файлы для изменения частот колебаний в автоматическом режиме. По значениям углов качки, полученных с преобразователей углового перемещения платформы, была выполнена процедура получения амплитудных спектров на основе быстрого преобразования Фурье. При этом на полученных графиках наблю-

далось значительное число вторичных максимумов, обусловленное фиксированным шагом задания частоты (0,1 Гц) и постоянной времени стенда. В результате обработки реализаций получены возможные амплитудные спектры входного воздействия стенда (рис. 3, кривые 1—5). Отметим, что существует возможность получать как гладкие спектры, в том числе сложной формы с несколькими максимумами, так и линейчатые спектры.

При экспериментальных исследованиях стенда для воспроизведения высокочастотных угловых колебаний варьировались диапазон частот и форма получаемого спектра. На рис. 4 представлен амплитудный спектр одной из возможных реализаций, построенный по результатам обработки данных с датчика угла поворота платформы стенда.

Экспериментальные исследования микромеханической бесплатформенной инерциальной системы

На втором этапе работы были проведены экспериментальные исследования микромеханической бесплатформенной инерциальной системы (БИНС) производства ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор" [6] на двухосном стенде качки, работающем в диапазоне частот 0,1...4 Гц (см. рис. 1). В процессе исследований задавались различные формы спектров входного воздействия стенда, отличающиеся диапазоном воспроизводимых частот (от 1 до 4 Гц) и частотами спектральных максимумов. В ходе исследований была проведена оценка случайной составляющей погрешности выработки углов качки БИНС в динамическом режиме.

На рис. 5 представлены результаты испытаний при задании колебаний в диапазоне до 4 Гц со

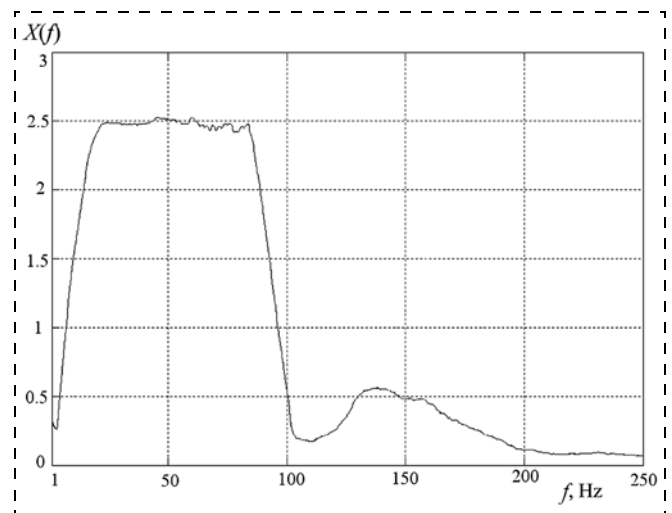


Рис. 4. Пример амплитудного спектра сигнала, полученного со стенда высокочастотных угловых колебаний: $X(f)$ — амплитудный спектр сигнала; f — частота колебаний

Fig. 4. An example of the amplitude spectrum of the signal received from the stand of high-frequency angular oscillations: $X(f)$ — the amplitude spectrum of the signal; f — frequency of the oscillations

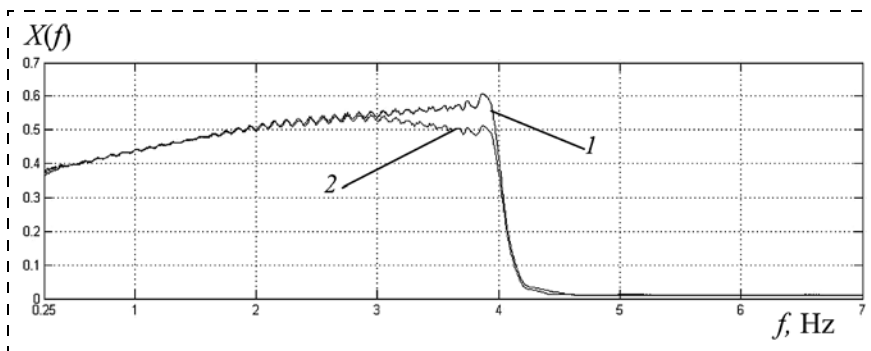


Рис. 5. Спектры входного воздействия (1) и сигнала БИНС (2)

Fig. 5. Spectra of the input action (1) and BINS signal (2)

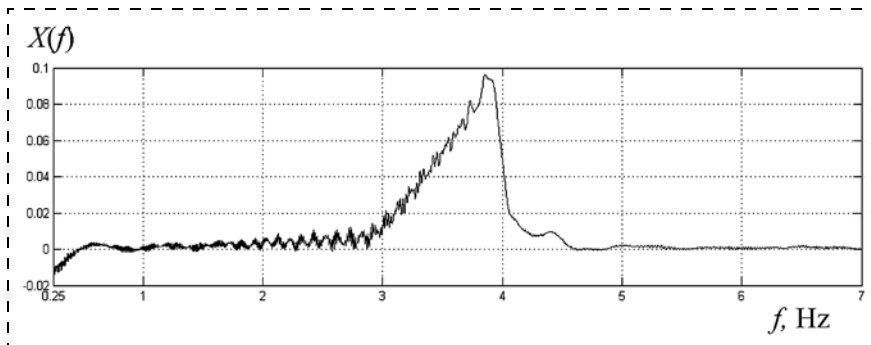


Рис. 6. Спектр погрешности БИНС

Fig. 6. Range of error of SINS

спектральным пиком на частоте 4 Гц. На рис. 6 представлена разность спектров входного воздействия (спектр стенда) и выходного (спектр БИНС). Из этого рисунка видно, что наибольшие погрешности БИНС появляются на частотах свыше 3 Гц, что обусловлено инерционными свойствами чувствительных элементов, входящих в состав модуля. Рассчитанное СКО погрешности выработки углов качки в диапазоне частот до 4 Гц составило $0,8^\circ$, что соответствует типовой погрешности микромеханической БИНС.

Заключение

Предложенный метод оценки характеристик ММД и модулей на основе воспроизведения колебаний с заданным спектром частот позволяет оценить дисперсию погрешности исследуемого датчика или модуля во всем частотном диапазоне их работы. Апробация метода проведена на стендах для динамических испытаний ММД и модулей. Проведены экспериментальные исследования микромеханической БИНС, оценено максимальное СКО погрешности выработки углов качки.

Разработанный метод можно использовать для более широкого класса стендов задания гармонических колебаний. Применение указанного метода позволит:

— сократить время оценивания характеристик одного датчика с нескольких дней до 15 мин, по-

скольку оценка погрешности будет проводиться сразу во всем частотном диапазоне работы, что важно при массовом производстве ММД;

— проводить испытания датчиков и модулей с учетом спектра входного (рабочего) воздействия, что позволит определить погрешность датчика в условиях, наиболее приближенных к реальным условиям эксплуатации, характеризующимся задаваемым спектром, это, в свою очередь, позволит повысить достоверность результатов измерений;

— уменьшить стоимость ММД при их групповом изготовлении, в связи с возможностью одновременной калибровки партии датчиков и модулей.

Кроме того, разработанный метод применим и для оценки статических характеристик датчиков, например масштабного коэффициента. Так, задавая колебания в спектре частот, мы располагаем информацией как об амплитуде и

частоте колебаний, так и об угловой скорости и ускорении, воспроизводимых при этом.

Таким образом, применение указанного метода позволит не только сократить время оценки динамических характеристик, но и одновременно выполнять калибровку сразу нескольких параметров. Это значительно сократит время на калибровку ММД и модулей на их основе и, соответственно, снизит себестоимость готового изделия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-08-00308-а.

Список литературы

1. www.analog.com/ru/
2. Грязин Д. Г., Шадрин Ю. В. Нормирование параметров микромеханических гироскопов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 1. С. 17–19.
3. Виноградов И. М. Математическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 1977.
4. Пат. 2 367 921 С2 Российская Федерация, МПК G 01 М 7/00. Двухступенный стенд для задания угловых колебаний / Грязин Д. Г., Лычев Д. И., Бердюгин А. В.; патентообладатель ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". — № 2007132944/28; 20.09.09.
5. Чекмарев А. Б. Стенд для контроля частотных характеристик микромеханических гироскопов и модулей на их основе // Материалы докладов XII конференции молодых ученых "Навигация и управление движением". СПб.: ЦНИИ "Электроприбор". 2010.
6. Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П., Грязин Д. Г. и др. Инерциальные модули на микромеханических датчиках. Разработка и результаты испытаний // Гироскопия и навигация. 2008. № 3 (62). С. 3–12.

Estimation of Characteristics of the Micromechanical Sensors and Modules in Case of their Group Manufacture. The Method and its Technical Realization

A method is offered for estimation of the random component of the dynamic error of the micromechanical sensors and modules on the basis of reproduction of oscillations with a set spectrum of frequencies. The method boils down to comparison of the spectra of the input influence from a stand and an output signal from the investigated sensor or module. Experimental research of the developed method was done. The root mean square deviation of the error of development of the rocking angles of a micromechanical strapdown inertial navigation system was evaluated, which appeared to be 0,8° and corresponded to a typical error for the devices of such class. Application of the above method will make it possible to reduce time for estimation of the sensors' characteristics in case of their group manufacture.

Keywords: set spectrum of frequencies, random component of a dynamic error, input influence, root mean square deviation of the error of development of the rocking angles

Introduction

The feature of the products of the microsystems technology is their batch production. Typically, the products consist of crystals of the primary transducer and control and data processing system. While the technology for manufacturing of the semiconductor devices is well proven based on the previous experience of specialized enterprises, manufacturing of the microsensors meets certain difficulties. Suffice it to say that the yield of microsensors' crystals in the world is not more than 60 %. The micromechanical inertial sensors (MIS) are not an exception — the gyroscopes and accelerometers manufactured by domestic enterprises, which yield is considerably less. MIS's feature — a considerable spread of their characteristics in batch production. For example, the scale factor of the micromechanical gyroscopes of Analog Devices firm [1] of ADXRS type could not be standardized, and sensitivity variation is normalized in the range of 5–10 % from the typical value. This feature causes to carry out the individual calibration of the sensors. In this case, its cost increases by an order. Reduction of MIS calibration costs is connected with the use of group methods. It is necessary, that the test process can allow you to calibrate several characteristics of the sensors in the minimal time, it is desirable that it can be carried out in an automated way. It should be noted that the MIS characteristics nomenclature, mandatory for norming by manufacturers, was not accepted in Russia, that makes it difficult to compare MIS characteristics of the different manufacturers. It should be noted that in the micromechanical gyroscopes (MMG), manufactured by JSC "Concern CSRI "Electropribor", the nomenclature of the characteristics is accepted, which given in [2]. It is obvious that these features of MIS calibration refer also to the micromechanical modules, which include several MIS. The cost of these modules should also be minimal. The situation is complicated by the fact that the specialized equipment for these technological process is not manufactured.

Method and evaluations of the characteristics of micromechanical sensors and modules

Evaluation of the dynamic characteristics of the sensors, including frequency sensors, takes in some cases several work-

ing shifts. This is caused by the necessity of tests processing at each frequency separately with subsequent processing of the large volumes of data.

The method based on reproduction of the oscillations in a given frequency range is proposed to reduce the time for error estimation of MIS (gyroscopes and accelerometers) in the dynamic mode. It relates to a number of comparison techniques. At this, the stand signal defining the polyharmonic oscillations in the defined frequency spectrum is considered as a reference signal. The signal of the micromechanical inertial measurement unit or sensor mounted on a stand becomes compared to a reference signal. The calculation of spectral characteristics of the input and output signals by the transition from the time domain into the frequency domain by means of Fourier transformation is carried out on the base of obtained implementations. Comparison of the obtained spectra of the input and output signals allows us to estimate the variance of an error of the sensor or module in the specified frequency range.

Let $x(t)$ — the input signal from the stand (reference input action), $y(t) = x(t) + \varepsilon(t)$ — the output signal from the sensor or module, where $\varepsilon(t)$ — an error of the sensor or module. Then

$$\varepsilon(t) = y(t) - x(t).$$

The spectral density of the error $S_\varepsilon(f)$ in accordance with the theorem of Wiener—Khinchin [3] is defined as the one-sided Fourier transformation from the correlation function of the error:

$$S_\varepsilon(f) = 2 \int_0^\infty R_\varepsilon(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (1)$$

where $R_\varepsilon(\tau)$ — the correlation function of the error; τ — the correlation interval.

Since the input and output signals are uncorrelated, then

$$R_\varepsilon(\tau) = R_x(\tau) + R_y(\tau) - 2R_{xy}(\tau), \quad (2)$$

where $R_x(\tau)$ — the autocorrelation function of the input signal from the stand; $R_y(\tau)$ — the autocorrelation function of the output signal from the sensor or module; $R_{xy}(\tau)$ — the cross-correlation function.

Substituting (2) into (1) we obtain the spectral density of an error of the sensor or module, which characterizes the dispersion of an error over the entire frequency range. The sought dispersion is defined as the area under the graph of the spectral density:

$$D = \sigma^2 = \int_0^{\infty} S(f) df.$$

The advantages of the proposed method lies in the fact that the definition time of dynamic errors of micromechanical inertial sensors and measurement modules based on them is greatly reduced by eliminating of testing at each frequency and counts about 10–15 min. In addition, the method can improve the accuracy of estimation of the dynamic errors in measurements in the specific environments characterized by definable ranges of input action.

Stands for evaluating of the dynamic characteristics of the sensors and modules

It is known that the specialized equipment for evaluating of the dynamic characteristics of MIS and modules based on them are not batch produced. In this regard, JSC "Concern CSRI "Electropribor" has designed two stands for dynamical testing of micromechanical sensors and modules. The first of them — two-axle pitching stand [4], working in an extended frequency range. It is applicable for testing of the modules of the highly dynamic objects. The biaxial stand (fig. 1) provides oscillation's assignment in two perpendicular axes in the frequency range of 0,1...4 Hz with the fixed amplitudes of 15 and 25° on each axis, respectively.

Stand represents a platform swinging in two planes on the cruciform suspension. Its fluctuations by the harmonic law are provided by kinematic transmission of the stand, which converts the rotary motion of the motor's shafts using a crank-rocker mechanisms into the reciprocating motion. Expanding of the frequency range is achieved by mounting of the driving motors for each axis on the base of the device and reducing of the inertia moment of the moving parts. The use of the three-stage rolling bearing allows elimination of the cross-connection, in which the fluctuations along the inner axis can modulate the fluctuations along the outer axle. Retrieval of data about the location of the platform is performed using the number of digital photovoltaic converters of angular displacement.

The second stand for simulation of high-frequency angular oscillations [5] (fig. 2) is built according to the scheme on the basis of two electromagnetic actuators, which convert the axial reciprocating motions of the moving control coil of electromagnetic actuator into the angular oscillating motions of the platform through the crank by means of two-stage hinge. Use of two drives can increase the torque on the platform's shaft, as well as to compensate the errors caused by their structural features. Information about the angular position of the stand's platform is obtained via the platform's sensor of rotation angle placed on the axis of the platform.

Stands' control systems allow to set the frequencies and amplitudes of fluctuations in the manual mode by entering of the appropriate values into the user's interface blocks, as well automatically — by the predetermined law. To automatically control the biaxial pitching stand, it is needed to create a file

of TXT format, which stores the data on the values of the oscillation frequencies by the axes and changing time. It should be noted that due to the features of the control system, changing of the oscillation frequencies is possible only with increments of 0,1 Hz. For the stand of simulation of the high-frequency angular oscillations, it is necessary to place the blocks that implement the necessary laws for changing of these parameters in the model of the management system in Simulink instead of the blocks for setting of the constant values by the amplitude and frequency of the angular velocity. Such automation of the oscillation parameters' change allows to realize the simulation of the irregular oscillations with a given frequency spectrum.

Experimental studies of the stands for dynamic testing of sensors and modules

The control files for changing of the oscillations frequencies in the automatic mode were formed for experimental studies of the biaxial pitching stand (see fig. 1). The amplitude spectra through the fast Fourier transformation were obtained by the values of pitching angles, obtained from the transducers of platform's angular displacement. At the same time, a significant number of secondary maxima was observed on the obtained graphs due to the fixed pitch of the frequency setting (0,1 Hz) and the stand's time constant. The possible amplitude spectra of the input influence of the stand (fig. 3, curves 1–5) were obtained as a result of implementations processing. It should be noted that it is possible to obtain as the smooth spectra, including of a complex shape with the several maxima, as well as the line spectra.

The frequencies range and the shape of the resulting spectrum were varied in experimental studies of the stand for simulation of the high-frequency angular oscillations. Fig. 4 shows the amplitude spectrum of one of the possible implementation, built on the results of data processing obtained from the sensor of the rotation angle of the stand's platform.

Experimental studies of the micromechanical strapdown inertial system

At the second stage of work, the micromechanical strapdown inertial system (SINS) produced by JSC "Concern CSRI "Electropribor" [6] was experimentally investigated on double-axle pitching stand operating in the frequency range of 0,1...4 Hz (see fig. 1). The various forms of spectra of the stand's input action were set in the study, which differ by the simulated frequencies range (1...4 Hz) and by the frequencies of the spectral peaks. An evaluation of a random component of the error of the SINS pitching angles generation in dynamic mode.

Fig. 5 shows the results of tests at setting up of vibrations in the range of 4 Hz with a spectral peak at a frequency of 4 Hz. Fig. 6 shows the difference of the spectra of input action (spectrum of the stand) and the spectra of output action (spectrum of SINS). It is evident that the largest errors of SINS appear at the frequencies above 3 Hz, which is caused by inertial properties of the sensing elements that compose the module. The calculated RMS of the error of pitching angles generation in the frequency range of up to 4 Hz was 0,8°, which corresponds to the standard error of the micromechanical SINS.

Conclusion

The proposed method for evaluation of performances of MIS and modules based on oscillations' simulation with a given frequency spectrum allows us to estimate the variance of the error of a sensor or module in the entire frequency range of operation. The approbation was carried out on the stands for MIS and modules dynamic tests. The experimental studies of the micromechanical SINS was carried out, the maximum RMS of the error of the pitching angles generation was estimated.

The developed method can be used for a wider class of the stands of assignment of the harmonic oscillations. Its use will allow to:

- Reduce the time of evaluation of the characteristics of the sensor with a few days to 15 min, because the error estimation will be conducted simultaneously in the entire frequency range, which is important for mass MIS production;

- Test the sensors and modules taking into the account the spectrum of the input (working) action, which will determine the error of the sensor in an environment closest to the actual operating conditions, which are characterized by the given spectrum. This, in turn, will improve the reliability of the results;

- Reduce the cost of MIS in their batch manufacturing due to possibility of the simultaneous calibration of a batch of the sensors and modules.

In addition, the method can be used to evaluate the static characteristics of the sensor, for example, the scale factor. Thus, setting the oscillation in a frequency spectrum, we can

obtain the information on the amplitude and frequency of oscillations and on the simulated angular velocity and acceleration.

Thus, the application of the method will reduce the evaluation time of the dynamic characteristics and simultaneously to calibrate multiple parameters. This will significantly reduce the time on calibration of MIS and modules their base and, consequently, reduce the cost of the finished product.

This work was supported by the grant of RF for Basic Research #14-08-00308-a.

References

1. www.analog.com/ru/
2. Grjazin D. G., Shadrin Ju. V. Normirovanie parametrov mikromekhanicheskikh giroskopov. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2007. N. 1. P. 17—19 (in Russian).
3. Vinogradov I. M. *Matematicheskaja jenciklopedija* (Encyclopedia of Math). Moscow, Sovetskaya jenciklopedija, 1977 (in Russian).
4. Grjazin D. G., Lychjov D. I., Berdjugin A. V. *Patent RU 2 367 921 C2*; 20.09.09 (in Russian).
5. Chekmarjov A. B. Stend dlya kontrolya chastotnykh kharakteristik mikromekhanicheskikh giroskopov i modulei na ikh osnove. *Materialy dokladov XII konferencii molodyh uchenyh "Navigacija i upravlenie dvizheniem"*. Saint Petersburg. CNII "Elektropribor", 2010. P. 161—168 (in Russian).
6. Peshekhonov V. G., Nesenyuk L. P., Gryazin D. G., Nekrasov Ya. A., Evstifeev M. I., Blazhnov B. A., Aksenenko D. V. Inertsial'nye moduli na mikromekhanicheskikh datchikakh. *Razrabotka i rezul'taty ispytaniy. Girokopija i navigacija*. 2008. N. 3 (62). P. 3—12 (in Russian).

УДК 621.961

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор, **С. В. Редькин**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., **А. С. Скрипниченко**, мл. науч. сотр., **Н. В. Побойкина**, мл. науч. сотр., e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва, **М. П. Духновский**, нач. отд., **А. К. Смирнова**, канд. техн. наук, нач. сектора, e-mail: istok220@mail.ru, Акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Исток" имени А. И. Шокина" (АО "НПП "Исток" им. Шокина"), г. Фрязино

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛАСТИН

Поступила в редакцию 29.12.2014

Рассмотрены способы фрагментирования поликристаллических алмазных пластин. Приведены результаты лазерной резки алмазных пластин по традиционной технологии и технологии, разработанной в ИСВЧПЭ РАН. Показано, что технология ИСВЧПЭ РАН обеспечивает отсутствие каких-либо посторонних углеродных материалов при резке пластин.

Ключевые слова: лазерная резка, поликристаллические алмазные пластины, МРА CVD-метод

Значительные успехи в области CVD-синтеза алмазов позволили разработать промышленную технологию выращивания поликристаллических алмазных слоев на кремниевых пластинах диаметром до 100 мм. Для этих целей наибольшее распростра-

нение получил метод МРА CVD [1]. Уникальные физические свойства алмаза — высокая механическая прочность, максимальная (из всех известных материалов) теплопроводность (20...24 Вт/(см · К) при комнатной температуре), привлекают разра-

ботчиков мощных СВЧ приборов и приборов, работающих в экстремальных условиях [2].

Наиболее очевидным и успешным применением поликристаллических алмазных слоев оказалось их использование в качестве эффективных теплоотводов [3, 4]. При этом одной из проблем в технологии создания прибора, которая окончательно не решена до настоящего времени, является фрагментирование поликристаллических алмазных пластин на "чипы", на которых размещают приборы.

Для решения этой проблемы используют и предварительное профилирование с помощью алмазных дисков, и травление кремниевых пластин перед МРА CVD поликристаллических алмазных слоев [5], и лазерную резку [6].

На наш взгляд, последний метод является наиболее технологичным, однако и он не лишен слабых сторон. Основным, и наиболее важным, недостатком традиционной лазерной резки является выброс материала из области реза и его осаждение на уже сформированные приборные структуры, что абсолютно недопустимо при переходе к топологии приборов с наноразмерами. На рис. 1 представлена схема традиционной лазерной резки.

При традиционной лазерной резке процесс проводится в относительно "чистых" условиях: либо в атмосфере инертных газов, либо обычного воздуха, при атмосферном давлении, иногда с дополнительным локальным обдувом места реза для удаления продуктов лазерной обработки. Все эти приемы уменьшают засорение поверхности приборов, но не решают проблемы кардинальным образом — абсолютного отсутствия на поверхности прибора разрезаемого материала или его модификаций. Именно такая задача нами и решалась в настоящей работе.

Для корректности эксперимента и сравнения методов нами проводилась лазерная резка поликристаллических алмазных пластин по традиционной технологии в воздушной среде при атмосферном давлении, а также разработанная нами лазерная плазмохимическая резка при пониженном давлении [7].

Результаты традиционной лазерной резки представлены на рис. 2 и 3.

Как видно на представленных снимках, по обе стороны реза наблюдается область "засорения" модифицированным материалом разрезаемой пластины. Это углеродные материалы — графит и фуллерены. Кроме того, сами стенки реза оказались покрытыми углеродным материалом (графитом).

Для исключения этого явления нами предложен лазерный плазмохимический метод резки. Суть его заключается в том, что процесс проводят в плазме низкого давления в атмосфере газов, которые в ионизированном состоянии активно взаимодействуют с поверхностью алмаза и переводят его в ле-

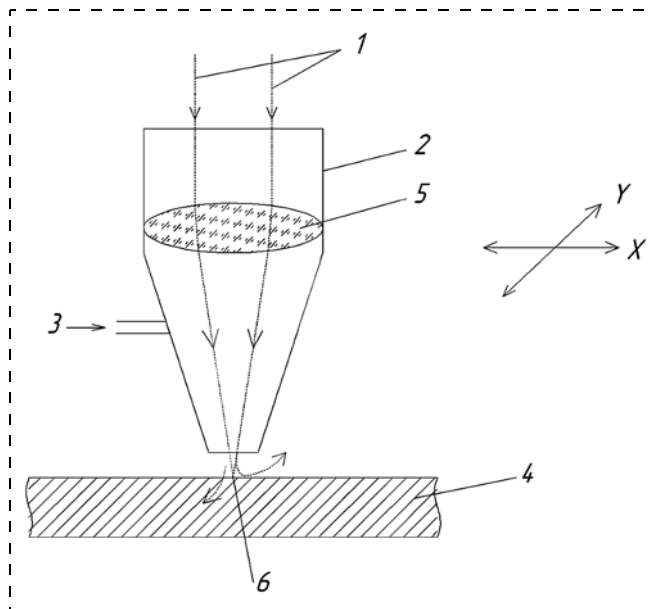


Рис. 1. Схема лазерной плазмохимической резки: 1 — лазерный луч; 2 — защитный кожух режущей головки, совмещенный с объективом; 3 — вспомогательный газ; 4 — разрезаемый объект; 5 — линза; 6 — область расплава

Fig. 1. Scheme of laser plasma chemical cutting: 1 — laser beam; 2 — protective cover of the cutting head, combined with the lens; 3 — auxiliary gas; 4 — object being cut; 5 — lens; 6 — melt area

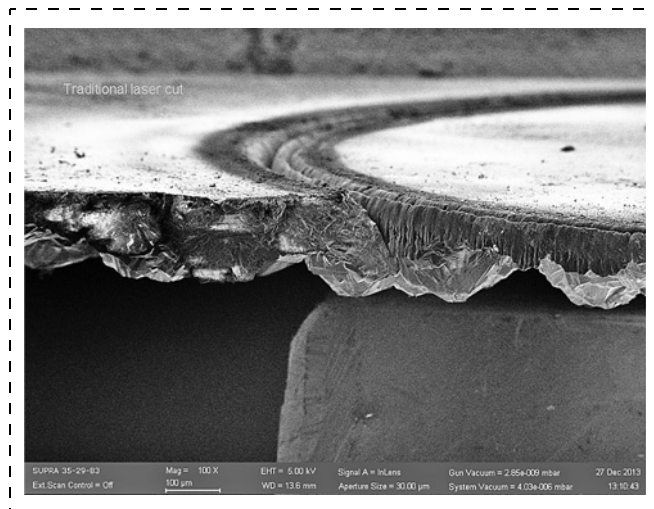
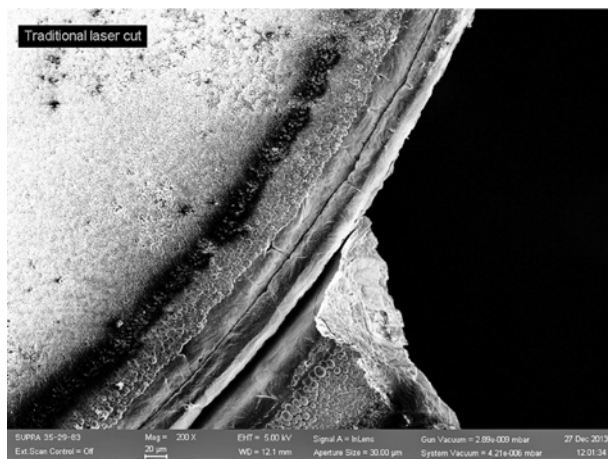


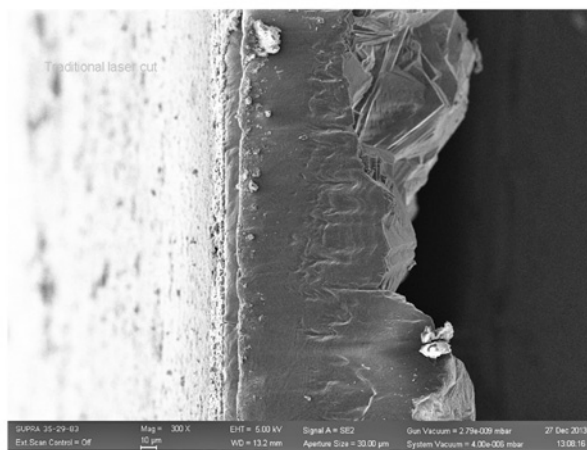
Рис. 2. Результат традиционной лазерной резки

Fig. 2. The result of a traditional laser cutting

тутие соединения, которые эвакуируются из реакционной камеры с помощью вакуумного насоса. Плазма поджигается в фокусе лазерного луча и может перемещаться в нужном направлении по обрабатываемой поверхности либо с помощью оптической системы, либо посредством механического перемещения самого образца относительно локальной плазмы в фокусе лазерного луча. В своих экспериментах (как при атмосферном давлении, так и при низком давлении) мы использовали последний метод. Схема экспериментальной лазерной плазмохимической установки представлена на рис. 4.



a)



b)

Рис. 3. Углеродные материалы на поверхности и стенках реза: а — углеродные материалы на поверхности; б — углеродный материал на стенке реза

Fig. 3. Carbon materials on the surface and walls of a cut: a — on the surface; b — on walls of a cut

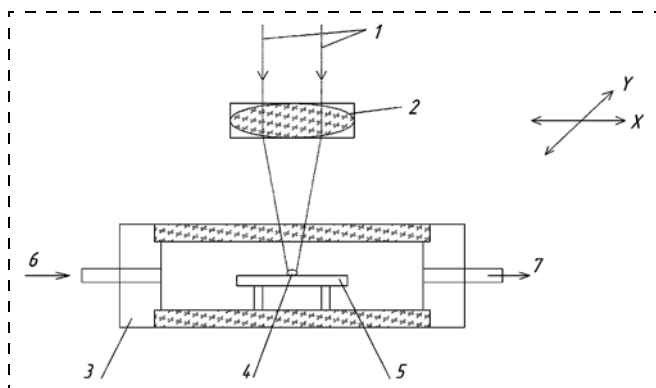


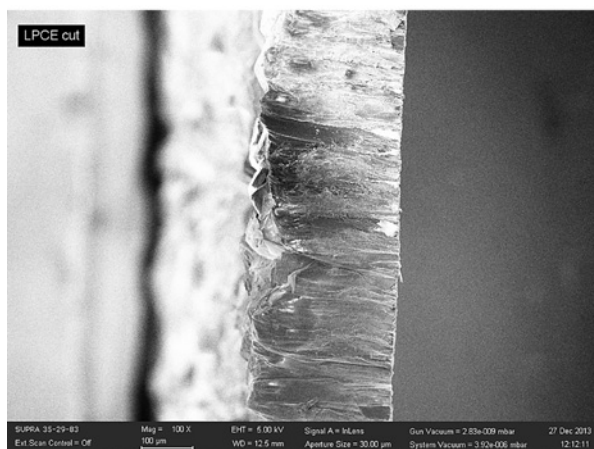
Рис. 4. Схема лазерной плазмохимической установки: 1 — лазерный луч; 2 — объектив; 3 — реактор; 4 — область плазмы; 5 — разрезаемый образец; 6 — реакционные газы; 7 — вакуумная откачка

Fig. 4. Scheme of laser plasma chemical installation: 1 — laser beam; 2 — lens; 3 — reactor; 4 — plasma area; 5 — sample being cut; 6 — reaction gases; 7 — vacuum pumping

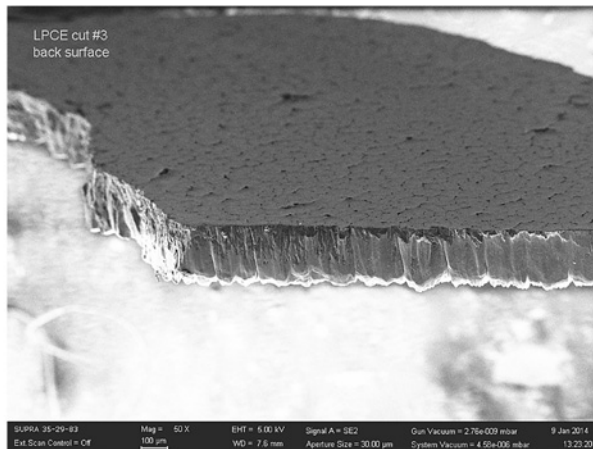
В экспериментах был использован лазер на парах меди. Основные параметры лазера представлены ниже:

Длина волны	510,6 и 578,2 нм
Частота следования импульсов	10 кГц
Длительность импульсов	20 нс
Средняя мощность излучения в пучке	10 Вт
КПД	1 %
Расходимость пучка	Близкая к дифракционной
Пиковая мощность излучения в импульсе	50 кВт
Диаметр пучка	20 мм
Пятно фокусировки	10 мкм

В качестве плазмообразующей газовой среды была использована известная в традиционной плазмохимии смесь $\text{CF}_4 + \text{O}_2$, а также смесь $\text{O}_2 + \text{Ar}$. Аргон добавляли в смесь для облегчения первоначального пробоя.



a)



b)

Рис. 5. Общий вид реза: а — вид с торца; б — рез, слом

Fig. 5. General view of the cut: a — from the face; b — cut, chip

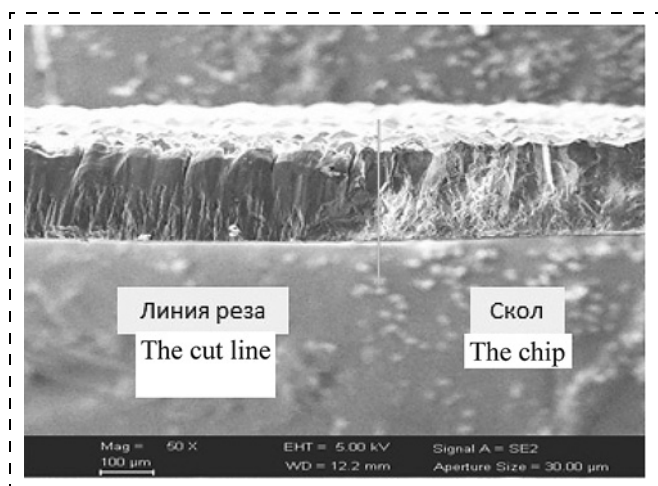


Рис. 6. Кристаллиты поликристаллической алмазной пластины после лазерной плазмохимической резки

Fig. 6. Crystallites of a polycrystalline diamond plate after laser plasma chemical cutting

На рис. 5 и 6 представлены результаты экспериментов по лазерной плазмохимической резке алмазной поликристаллической пластины.

Как видно из представленных рис. 5 и 6, резка по предложенной технологии обеспечивает отсутствие каких-либо посторонних углеродных материалов как на поверхности пластины, так и на торце самого реза. Особенно хорошо это видно на рис. 6, где левая часть образца — это результат лазерной плазмохимической резки, а правая часть — скол пластины. Как видно, они — идентичны, что является неоспоримым доказательством отсутствия модификации поликристаллического алмаза в разработанном нами технологическом процессе — лазерной плазмохимической резки пластин на "чипы".

В настоящей работе все эксперименты проводили на пластинах поликристаллического алмаза, выращенного на оборудовании АО "НПП "Исток" им. Шокина".

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

Список литературы

1. Волков Ю. Я., Стрельников В. Е., Ушаков В. А. Синтез алмаза в СВЧ плазме: оборудование, пленки, применение // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 1, № 1. С. 26—45.
2. Глинский И. А., Рубан О. А., Алешин А. Н., Зенченко Н. В., Мельников А. А. Расчет тепловых режимов НЕМТ-транзисторов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 11. С. 43—48.
3. Ланин В., Телеш Е. Алмазные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 120—124.
4. Ральченко В., Конов В. CVD-алмазы: применение в электронике // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 4. С. 58—67.
5. Патент России RU 2357001. Способ получения изделий из поликристаллического алмаза // Кудряшов О. Ю., Леонов И. А., Духновский М. П., Федоров Ю. Ю., Ратникова А. К. 2009-05-27. Бюл. № 15.
6. Migulin V. V., Ralchenko V. G., Baik Y.-J. Oxygen-assisted laser cutting and drilling of CVD diamond plates // Lasers in Synthesis, Characterization and Processing of Diamond. Proceedings of SPIE. 1998. V. 3484. P. 175—181.
7. Патент России RU 2537101. Способ прецизионной лазерно-плазмохимической резки пластин // Аристов В. В., Мальцев П. П., Редькин С. В., Скрипниченко А. С., Павлов В. Ю. 27.12.2014. Бюл. № 36.

P. P. Maltsev, D. Sc., Director, S. V. Redkin, Ph. D., Leading Researcher, A. S. Skripnichenko, Junior Researcher, N. V. Poboykina, Junior Researcher, iuhfseras2010@yandex.ru, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, M. P. Doukhovskiy, Head of Department, A. K. Smirnova, Ph. D., Head of Sector, istok220@mail.ru, Istok Research & Production Enterprise named after A. I. Shokin, Fryazino

Technology for Laser Cutting of the Polycrystalline Diamond Plates

The topic of the work is a method for fragmentation of the polycrystalline diamond plates. The work presents the results of laser cutting of the diamond plates by the traditional technology and the technology developed in IUHFSE RAS. It demonstrates that the technology of IUHFSE RAS guarantees absence of any extraneous carbonaceous materials on the cut surface.

Keywords: laser cutting, polycrystalline diamond plates, MPA CVD method

Success with CVD-synthesis of the diamonds has allowed to develop the technology of cultivation of polycrystalline diamond layers on silicon wafers with the diameter of up to 100 mm. MPA CVD method is the most widely used [1]. The unique

properties of a diamond — high mechanical strength, maximal thermal conductivity of all known materials (20—24 W/cm · K at room temperature) — attract the developers of powerful microwave appliances and devices for extreme conditions [2].

Polycrystalline diamond layers found its most obvious use as effective heat sink [3, 4]. Fragmentation of polycrystalline diamond plates on the "chips", on which the instruments are placed, — one of the challenges of construction of such device that was not finally solved. Preliminary profiling using diamond blades, etching of silicon wafers before MPA CVD of polycrystalline diamond layers [5] and laser cutting are used to solve this issue [6].

In our view, the last method is the most technological, but it also has its disadvantageous features. The most important disadvantage of the conventional laser cutting is spitting of material from the cutting place and its deposition on the shaped instrumental structures, which is absolutely unacceptable in the transition to the topology of the devices of nanoscale level. Fig. 1 shows a diagram of a conventional laser cutting.

At conventional laser cutting, the process is performed in a relatively "clean" conditions in an atmosphere of inert gas or ordinary air at atmospheric pressure, sometimes with additional local blowing of the cutting place for removal of the laser treatment products. These techniques reduce littering of surface of the instrument, but not fundamentally solve the problem — the absolute absence of the cut material or its modifications on the device's surface.

The issue was precisely being solved in this paper.

For the correctness and comparison, a laser cutting of polycrystalline diamond plates on traditional technology in air at atmospheric pressure and a laser plasma-chemical cutting under reduced pressure were performed [7]. The results of the traditional laser cutting are presented in figs. 2, 3.

On some images, the littering area by the modified material of the being cut plate was observed on the both sides of the cutting area. It was graphite and fullerenes. In addition, the cut walls themselves were covered by carbon material (graphite).

To avoid this, the laser plasma-chemical method of cutting was proposed. Its essence is in that the process is conducted in a low pressure plasma in the atmosphere of the gases, which in ionized condition actively interact with the surface of the diamond and convert it into the volatile conditions, that are removed from the reaction chamber. The plasma becomes ignited at the focus of the laser beam and can be moved in the right direction along the treated surface using an optical system or by mechanical movement of the sample relatively to a local plasma in the focus of the laser beam. In the experiments (at atmospheric pressure and low pressure) we used the latter method. The scheme of the experimental installation is shown in fig. 4. A laser on copper vapors was used in the above mentioned experiments. The main parameters of the laser are shown below.

Wavelength	510,6 nm and 578,2 nm
Pulse repetition rate	10 kHz
Pulse duration	20 ns
The average radiation power in the beam	10 W
Efficiency	1 %
The beam divergence	Close to the diffraction
Peak power of output radiation pulse	50 kW
The beam diameter.	20 mm
Focus spot.	10 μm

The well-known mixtures in conventional plasma chemistry — $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ and $\text{O}_2 + \text{Ar}$ were used as the gaseous medium. Argon was added to facilitate the initial breakdown.

Figs. 5, 6 show the results of experiments on laser plasma chemical cutting of the diamond polycrystalline plate. From the pictures you can see that the cutting by the proposed technology ensures the absence of extraneous carbon materials on the surface of the plate and at the end of the cut. This is clearly seen in fig. 6, where the left side of the sample — the result of plasma chemical laser cutting, and the right side — the chip of the plate. As can be seen — they are identical, that conclusively shows the absence of modification of the polycrystalline diamond in the developed technological process of plasma chemical laser cutting plates on the "chips".

In this paper, the experiments were conducted using polycrystalline diamond grown on the equipment of JSC "Research and production corporation "Istok" named after Shokin".

The work was done in the Institute of Super-high-frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (ISHFSE RAS) — the organization — the main executor of the research-development and engineering works under the Decree of the Government of the Russian Federation on April 9, 2010 № 218, the contract № 02.G36.31.0005 on May 23, 2013 between JSC "RPC "Istok" named after Shokin" and the Russian Ministry of Education and Science and the contract № 33/211-13 on February 22, 2013 between ISHFSE RAS and JSC "RPC "Istok" named after Shokin".

References

1. Volkov Ju. Ja., Strel'nickij V. E., Ushakov V. A. Sintez almaza v SVCh plazme: oborudovanie, plenki, primenenie. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. 2013. V. 1, N. 1. P. 26—45.
2. Glinskij I. A., Ruban O. A., Aljoshin A. N., Zenchenko N. V., Mel'nikov A. A. Raschet teplovyh rezhimov HEMT-tranzistorov na osnove geterostruktury AlGaIn/GaN. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2014. N. 11. P. 43—48.
3. Lanin V., Telesh E. Almaznye teplootvody dlja izdelij jelektroniki povyshennoj moshhnosti. *Silovaja elektronika*. 2008. N. 3. P. 120—124.
4. Ral'chenko V., Konov V. CVD-almazny primenenie v jelektronike. *Elektronika: nauka, tehnologija, biznes*. 2007. N. 4. P. 58—67.
5. Pat. Rossii RU 2357001. *Sposob poluchenija izdelij iz polikristallicheskogo almaza*. Kudrjashov O. Ju., Leont'ev I. A., Duhnovskij M. P., Fedorov Ju. Ju., Ratnikova A. K. 2009-05-27.
6. Migulin V. V., Ralchenko V. G., Baik Y.-J. Oxygen-assisted laser cutting and drilling of CVD diamond plates. *Lasers in Synthesis, Characterization and Processing of Diamond, Proceedings of SPIE*. 1998. V. 3484. P. 175—181.
7. Pat. Rossii RU 2537102. *Sposob precizionnoj lazerno-plazmohimicheskoj rezki plastin* / Aristov V. V., Mal'cev P. P., Red'kin S. V., Skripnichenko A. S., Pavlov V. Ju. Polozhitel'noe reshenie na vydachu patenta ot 08 sentjabrja 2014 g. Po zajavke № 2013137198 ot 08 avgusta 2013 g.

УДК 621.3.049.78

Н. М. Парфенов¹, канд. техн. наук, доц., **С. П. Тимошенко**², д-р техн. наук, проф.,
А. С. Тимошенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

¹ МАИ, e-mail: pnm334@mai

² МИЭТ, 124498, Москва—Зеленоград, e-mail: spt@miec.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МЭМС-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Поступила в редакцию 23.12.2014

Приведены результаты разработки и исследований параметров преобразователей механических величин. Основным материалом для формирования упругих элементов (мембраны) преобразователей давления и чувствительных элементов гироскопов и акселерометров является монокристаллический кремний ориентации (100). Разработанный акселерометр емкостного типа был изготовлен по технологии объемной микромеханики.

На основании анализа амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик преобразователя угловой скорости была оптимизирована конструкция чувствительного элемента микрогироскопа.

Ключевые слова: интегральные МЭМС-преобразователи механических величин, преобразователи давления, микрогироскопы, микроакселерометры

Введение

Интегральные кремниевые МЭМС-преобразователи механических величин — микроэлектронные датчики давления, микрогироскопы и микроакселерометры, все чаще стали применять в навигационных системах, в системах автоматического управления двигателями, в авиационной и ракетно-космической технике, работающих в достаточно жестких условиях внешней агрессивной среды, высокой температуры, вибрации, ударных нагрузок.

Для выполнения данной задачи по изготовлению сенсоров, работающих в довольно жестких условиях со стабильными, надежными параметрами, была использована современная технология микроэлектроники и микромеханики.

Формирование упругих элементов датчиков давления было осуществлено на базе структуры кремний-на-изоляторе (КНИ). В качестве диэлектрика, при срачивании двух кремниевых пластин, был применен стеклообразный полупроводник. Это позволило существенно снизить возможное появление дефектов вследствие прогиба кремниевых пластин. Чувствительные элементы микрогироскопа и микроакселерометра были изготовлены с

применением монокристаллического кремния и глубинного травления с помощью анизотропного химического травления.

Разработка интегральных преобразователей давления

Технология изготовления интегральных преобразователей давления подробно приведена в работах [1, 2]. Основными параметрами преобразователя давления являются чувствительность и нелинейность передаточной характеристики. Известно, что значение и воспроизводимость этих параметров существенно зависят от геометрических размеров упругого элемента (мембраны) и точности расположения тензорезисторов в области мембраны.

Преобразователь давления сформирован на базе структуры КНИ. Структура создана методом термокомпрессионного срачивания кремниевых пластин. В качестве диэлектрика был использован многокомпонентный стеклообразный диэлектрик, согласованный по коэффициенту термического расширения с монокристаллическим кремнием. На термически окисленную приборную

кремниевую пластину (толщина диоксида кремния составляла 0,8 мкм) и опорную кремниевую пластину с помощью магнетронного распыления был нанесен слой стекловидного диэлектрика толщиной 1,0...1,5 мкм. Сращивание пластин осуществлялось в специальном приспособлении при определенной нагрузке и температуре около 1100 °С [3].

Установлено, что при разработанной конструкции преобразователя и выходном сигнале около 40 мВ/В (при номинальном давлении) нелинейность передаточной характеристики составляла 0,3...0,5 % [4]. Значение выходного сигнала при заданной толщине мембраны составляло 20...40 мВ/В.

Не менее важным параметром преобразователей давления являются температурный дрейф и температурный гистерезис нулевого сигнала (значение выходного сигнала без воздействия давления). Значение температурного дрейфа выходного сигнала мостовой схемы определяется двумя факторами: различием температурных свойств резисторов и механическими напряжениями, обнаруженными в области мембраны [5].

В целях минимизации данных погрешностей были изготовлены три различных варианта образцов с толщиной мембраны 40 мкм. На поверхности мембраны одного из образцов была нанесена алюминиевая пленка толщиной 1,0 мкм, на втором образце толщина пленки алюминия составляла 0,3 мкм. На третьем образце сформированы дополнительные p^+ -области в целях разрыва контактов в области тензорезисторов.

Анализ показал, что третий вариант образца преобразователя давления оказался оптимальным,

что позволило температурную погрешность нулевого сигнала свести к минимуму.

На основании полученных результатов были изготовлены преобразователи с более надежными и стабильными метрологическими характеристиками в области диапазона давлений 1,0...15 МПа.

Однако попытки уменьшить диапазон давлений в целях уменьшения толщины мембраны, привели к резкому ухудшению метрологических характеристик. Проблема была успешно решена за счет изготовления мембраны с "жестким центром". По сравнению с плоской мембраной данная мембрана более надежная и защищена от разрушения, которое могло возникнуть при перегрузке.

Исследование микромеханических МЭМС-гироскопов и акселерометров

Формирование интегральных микромеханических МЭМС-преобразователей для измерения угловой скорости (гироскопы) и ускорения (акселерометры) базировалось на современной технологии микроэлектроники и микромеханики. Однако существенный вклад в получение параметров преобразователей вносит электронная схема. При формировании чувствительных элементов (ЧЭ) было использовано жидкостное анизотропное химическое травление кремния с применением двусторонней контактной фотолитографии [2].

Графические модели чувствительного элемента гироскопа представлены на рис. 1. Для проведения расчетов использовался программный метод на основе конечно-элементного комплекса ANSYS. В результате были исследованы собственные частоты различных конструктивных модификаций

чувствительных элементов и соответствующие формы колебаний. Путем анализа амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик были оптимизированы колебательные режимы микромеханической системы и проведена необходимая корректировка конструкции. Определены наиболее напряженные узлы, рассчитаны предельные нагрузочные характеристики по различным направлениям.

При моделировании были учтены экспериментальные данные зависимости модуля Юнга от кристаллографической ориентации (100) монокристаллического кремния. Конструкция чувствительного элемента преобразователя угловой скорости карданного типа показана на рис. 2.

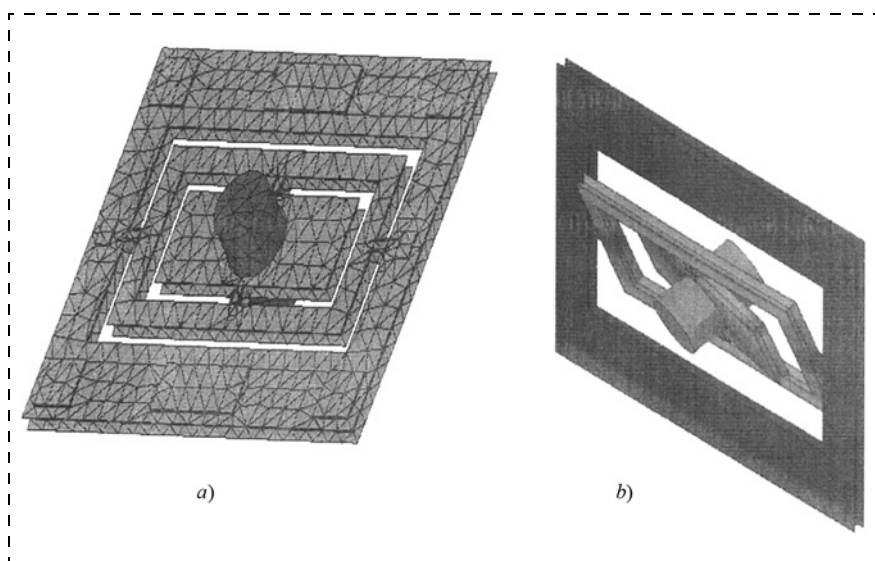


Рис. 1. Графическая модель ЧЭ датчика угловой скорости: *a* — разбивка конструкции на конечные элементы; *b* — отклонение подвижных элементов
Fig. 1. Graphic model of SE of an angular speed sensor: a — breakdown of the design into final elements; *b* — value of deviation of the mobile elements of the oscillation system

В целях оптимизации конструкции преобразователя было проведено исследование динамических характеристик ЧЭ. Равенство частот колебаний внутренней и внешней рамок достигалось с помощью выравнивания отношений жесткости торсионов к соответствующим моментам рам.

На рис. 3 приведены графики, характеризующие зависимости собственных частот p_1 и p_2 от угловой скорости основания для параметров ЧЭ преобразователя угловой скорости карданного типа с совпадающими значениями собственных частот рамок и для преобразователя с несовпадающими исходными угловыми частотами собственных колебаний.

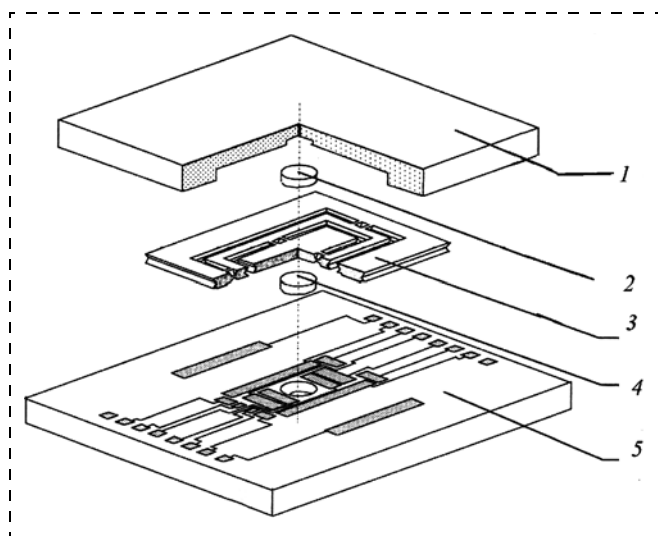


Рис. 2. ЧЭ вибрационного преобразователя угловой скорости карданного типа: 1 — крышка; 2, 4 — инерционные массы; 3 — микромеханическая плата; 5 — электронная плата

Fig. 2. SE of the vibration transducer of the angular speed of a cardan type: 1 — lid; 2, 4 — inertia mass; 3 — micromechanical board; 5 — electronic board

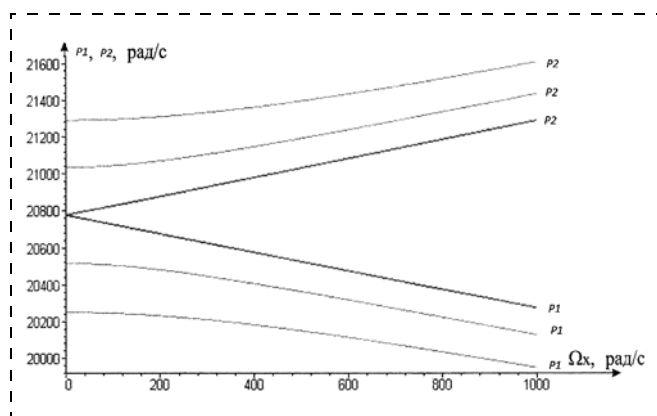


Рис. 3. Зависимость собственных частот ЧЭ гироскопа от угловой скорости: p_1 ; p_2 — собственные частоты ЧЭ гироскопа; Ω_x — угловая скорость основания

Fig. 3. Dependence of the own frequencies of SE of a gyroscope on the angular speed; p_1 , p_2 — own frequencies of SE of a gyroscope; Ω_x — angular speed of the basis

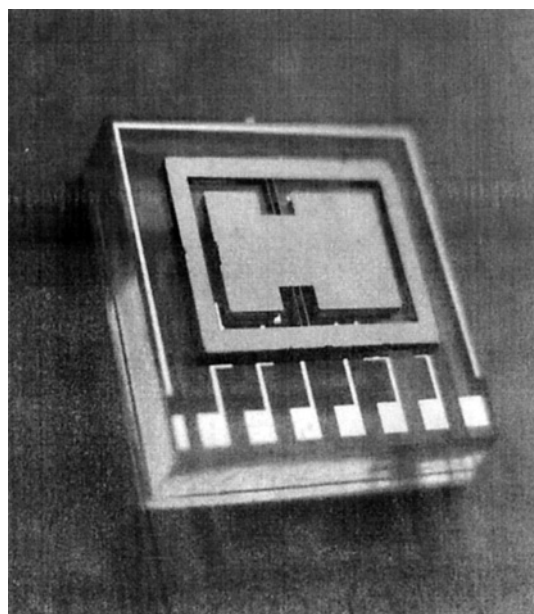


Рис. 4. Фотография чувствительного элемента микроакселерометра

Fig. 4. Photo of the sensitive element of a microaccelerometer

Анализ результатов показал, что в общем случае значение собственных угловых частот нелинейно зависит от угловой скорости основания. Однако в определенном диапазоне угловых скоростей ($0 \dots 1000$ рад/с) при исходном равенстве частот зависимость разницы частот практически линейно зависит от угловой скорости основания.

Таким образом, наибольшая чувствительность наружной рамки к угловой скорости наблюдалась при возбуждении на частоте, совпадающей с собственными угловыми частотами колебаний рамок. Для малых угловых скоростей амплитуда вынужденного движения наружной рамки практически линейно зависит от угловой скорости пропорционально произведению добротностей обеих рамок. На частоте, не совпадающей с резонансной, наблюдается падение амплитуды вынужденного движения наружной рамки. Амплитуда вынужденного движения наружной рамки будет тем меньше, чем дальше частота возбуждения от собственных угловых частот и чем больше разность собственных угловых частот.

Наряду с гироскопами широкое применение нашли микромеханические акселерометры в авиации, космических аппаратах и при создании высокоточного ракетно-артиллерийского оружия. Одним из важнейших элементов акселерометров является чувствительный элемент. Чувствительность акселерометра существенно зависит от конструкции ЧЭ.

На рис. 4 показан внешний вид микроакселерометра.

Разработанный чувствительный элемент акселерометра маятниковой конструкции состоит из основания и подвижной рамки, подвешенной на торсионах. Принцип действия ЧЭ основан на несимметричном подвесе подвижной рамки, вследствие чего при возникновении ускорения перпендикулярно плоскости ЧЭ происходит отклонение подвижной рамки. В результате изменяется емкость, образованная электродами на рамке и основании. На основании конструкции размещены четыре опорных выступа, которые определяют зазор между подвижной рамкой и статорной пластиной. По углам подвижной рамки размещены четыре упора, которые исключают возможность короткого замыкания емкостных датчиков при повороте подвижной рамки в любое крайнее положение [6].

Чувствительный элемент преобразователя ускорений с диапазоном измерений $\pm 1g$ может выдерживать нагрузку более 5000 g. ЧЭ изготовлен по технологии объемной микромеханики. Это обеспечило сенсору высокую надежность и точность характеристик.

Заключение

По результатам расчетов был изготовлен преобразователь давления со стабильными метрологическими характеристиками, работающий в диапазоне давлений 1...20 МПа.

Исследование преобразователей угловой скорости показало, что значение собственных частот

нелинейно зависит от угловой скорости основания. Наибольшая чувствительность наружной рамки гироскопа к угловой скорости наблюдается при возбуждении на частоте, совпадающей с собственной угловой частотой колебаний рамок.

Изготовлены акселерометры с хорошими точностными характеристиками, чувствительный элемент преобразователя ускорений способен выдерживать нагрузку свыше 5000 g.

Список литературы

1. Бойко А., Заводян А., Симонов Б. Моделирование элементов конструкции и изготовление // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2009. № 8. С. 100—103.
2. Зимин В. Н., Салахов Н. З., Чаплыгин Ю. А., Шелепин Н. А. Прецизионные интегральные преобразователи давления // Измерительная техника. 1995. № 11. С. 20—21.
3. Кошелев Н. И., Семенов О. Ю., Ермолаева А. И. Формирование структур кремний-на-изоляторе методом термокомпрессионного срачивания кремниевых пластин через слой стекловидного диэлектрика // Перспективные материалы. 2000. № 6. С. 21—24.
4. Тимошенко С. П., Чаплыгин Ю. А. Микро- и наномикромеханические системы // Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю. А. Чаплыгина. М.: Техносфера, 2005. С. 381—420.
5. Зимин В. Н., Данилова Н. Л., Панков В. В., Шабратов В. Н. Базовые конструкции интегральных тензопреобразователей на ряд давлений от 0,01 до 40 МПа // Датчики и системы. 1999. № 2. С. 52—55.
6. Галушков А. И., Зимин В. Н., Чаплыгин Ю. А., Шелепин Н. А. Кремниевые интегральные датчики физических величин на основе технологии микроэлектроники // Электронная промышленность. 1995. № 5. С. 95—101.

N. M. Parfenov¹, Ph. D., Associate Professor, S. P. Timoshenkov², D. Sc., Professor,
A. S. Timoshenkov², Ph. D., Senior Researcher

¹ MAI, e-mail: pnm334@mai

² MIET, Moscow, Zelenograd, e-mail: spt@mieee.ru

Research and Development of Integral MEMS-transducers of Mechanical Quantities

The work presents the results of research and development of the parameters of the transducers of mechanical quantities. The main material for formation of the elastic elements (membranes) of the pressure sensors and sensors of gyroscopes and accelerometers is monocrystalline silicon of orientation (100). The developed accelerometer of a capacitive type was manufactured in accordance with the technology of bulk micromechanics.

On the basis of the analysis of the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the angular velocity transducer the design of the sensitive element of the microgyroscope was optimized.

Keywords: integrated MEMS, transducers of the mechanical quantities, pressure sensors, microgyroscopes, microaccelerometers

Introduction

Integrated silicon MEMS transducers of the mechanical quantities — microelectronic pressure sensors, microgyroscopes, microaccelerometers, are more and more frequently used in navigation systems and automatic engine controls, in air-space technologies operating in severe conditions of an

aggressive environment, high temperatures, vibrations and shock loads.

For manufacture of the sensors working in severe constraints with stable, reliable parameters the technology of microelectronics and micromechanics was used.

Formation of the elastic elements of the pressure sensors was carried out on the basis of a silicon-on-insulator (SOI)

structure. A glassy semiconductor was applied as a dielectric for merging of two silicon plates. As a result it became possible to lower considerably the number of defects due to a deflection of the silicon plates. The sensitive elements of the microgyroscopes and microaccelerometers were made with application of monocrystal silicon and deep anisotropic chemical etching.

Development of the integrated pressure transducers

The technology for production of the integrated pressure transducers is presented in detail in [1, 2]. The key parameters of a pressure transducer are sensitivity and nonlinearity of the transfer characteristic. It is known, that the value and reproducibility of these parameters essentially depend on the sizes of an elastic element (membrane) and accuracy of arrangement of the resistive-strain sensors in the area of the membrane.

The pressure transducer was formed on the basis of SOI. Its structure was created by a thermocompression merging of the silicon plates. The dielectric was a multicomponent glassy dielectric, corresponding by its thermal dilatation coefficient to the monocrystal silicon. A layer of a glassy dielectric with thickness of 1,0...1,5 μm was deposited on thermally oxidized instrument silicon plate (thickness of the silicon dioxide was 0,8 μm) and a supporting silicon plate with the help of a magnetron dispersion. Merging of the plates was carried out in a special device at a certain load and temperature of about 1100 $^{\circ}\text{C}$ [3].

For the developed design of the transducer and with an output signal of about 40 mV/V (at a nominal pressure) the nonlinearity of the transfer characteristic was 0,3—0,5 % [4]. The output signal at the set thickness of the membrane reached 20...40 mV/V.

Other important parameters of the pressure transducers are temperature drift and hysteresis of the zero signal (the output signal without of influence of pressure). The temperature drift of the output signal of a bridge circuit is determined by the differences in the temperature properties of the resistors and mechanical stresses in the area of the membrane [5].

In order to minimize the errors three versions of samples were made with 40-micrometer thick membranes. On the surface of one of the samples an aluminum film was deposited with thickness of 1,0 μm , on the second one the thickness of the aluminum film was equal to 0,3 μm . On the third one additional p^+ -areas were formed for rupture of the contacts in the area of the resistive-strain sensors. An analysis showed that the third version of the sample was optimal and allowed to minimize the temperature error of the zero signal. On the basis of the obtained results, transducers with more reliable and stable characteristics within the pressure range of 1,0...15 MPa were manufactured.

However the attempts to reduce the range of pressures with a view to decrease the membranes' thickness resulted in their sharp deterioration. The problem was successfully solved due to manufacture of a membrane with "a rigid centre". In comparison with a flat membrane it was more reliable and protected from destruction, which could be due to an overload.

Research of the micromechanical MEMS-gyroscopes and accelerometers

Formation of the integrated micromechanical MEMS-transducers for measurement of the angular speeds (gyroscopes) and accelerations (accelerometers) was based on the technology of microelectronics and micromechanics. However an essential contribution to achievement of the transducers' parameters was due to electronic circuits. To ensure formation of the sensitive elements (SE) a liquid anisotropic chemical etching of silicon was used with application of a double-sided contact photolithography [2].

Graphic models of SE gyroscope are presented in fig. 1. In order to implement calculations the program method on the basis of ANSYS finite-element complex was used. As a result the own frequencies of various constructive modifications of SE and the corresponding forms of fluctuations were investigated. During analysis of the amplitude- and phase-frequency characteristics the oscillation regimes of the micromechanical system were optimized and the necessary correction of the design was done. The most intensive nodes were determined, and the limiting characteristics in various directions were calculated.

During modeling the experimental data of the dependence of the Young's modulus on the crystallographic orientation (100) of the monocrystal silicon were considered. The design of SE of the angular speed transducer of the cardan type is shown in fig. 2.

For optimization of the design of the transducer the dynamic characteristics of SE were investigated. The equality of the frequencies of fluctuations of the internal and the external frames was reached by means of alignment of the rigidity relations of torsions to the corresponding moments of the frames. Fig. 3 presents the diagrams characterizing the dependences of p_1 and p_2 own frequencies on the angular speed of the basis for parameters of SE of the transducer of the angular speed of a cardan type with the coinciding values of the own frequencies of frames, and for a transducer with non-coinciding initial angular frequencies of the own fluctuations.

An analysis proved that generally the own angular frequencies in a nonlinear way depend on the angular speed of the basis. However, within a certain range of the angular speeds (0...1000 rad/s) with the initial equality of the frequencies the difference in frequencies practically linearly depends on the angular speed of the basis.

Thus, the greatest sensitivity of an external frame to the angular speed was observed during excitation on the frequency coinciding with the own angular fluctuations of the frames. For small angular speeds the amplitude of the forced movement of the external frame practically linearly depends on the angular speed, proportionally to the product of the quality factors of the frames. On the frequency, not coinciding with the resonant one, lowering of the amplitude of the forced movement of the external frame was observed. This amplitude will be less, if the further is the frequency of excitation from the own angular frequencies and the bigger is the difference of the own angular frequencies.

Beside the gyroscopes, the micromechanical accelerometers found wide application in aircraft, space vehicles and in development of high-precision rocket-artillery weapons. Fig. 4 presents a microaccelerometer. One of the major elements of

the accelerometers is SE. Sensitivity of an accelerometer depends on its design.

The developed SE of accelerometer of a pendular design consists of a basis and a mobile frame suspended on torsions. The principle of operation of SE is based on an asymmetrical suspension of this frame, as a consequence of which during acceleration perpendicular to the plane of SE its deviation occurs. As a result, the capacity formed by the electrodes on the frame and the basis changes. On the basis there are 4 supporting ledges, which determine the gap between the mobile frame and the stator plate. In the frame corners there are 4 supports, which exclude a possibility of a short circuit of the capacitance sensors, when it is turned to any of its extreme positions [6].

SE of the acceleration transducer with a range of measurements of $\pm 1g$ can withstand a load over 5000 g. It is produced by the technology of bulk micromechanics. This ensures the sensor's high reliability and accuracy of characteristics.

Conclusion

By the results of calculations a pressure transducer was manufactured with stable characteristics, working within the range of pressures of 1–20 MPa.

Research of the angular speed transducers demonstrated that own frequencies in a nonlinear way depend on the angular speed of the basis. The greatest sensitivity of the external

frame of a gyroscope to the angular speed is observed during excitation on the frequency, coinciding with the own angular frequency of the frames' fluctuations.

Accelerometers with good characteristics were made. SE of the acceleration transducer can withstand a load over 5000 g.

References

1. Boiko A., Zavodjan A., Simonov B. Modelirovanie elementov konstrukzii i izgotovlenie. *Electronica: Nauka. Technologija. Biznes*. 2009. № 8. P. 100–103.
2. Zimin B. N., Chabratov D. V., Chelepin N. A., Chapligin J. A. Integralnie preobrazovateli davlenija na normalni rjad ot 0,04 do 30 MPa. *Izmeritel'naja tehnika*. 1994. № 2. P. 35.
3. Kochelev N. I., Semenov O. J., Ermolaeva A. I. Formirovanie struktur kremnij-na-izoljatore metodom termocompressionnogo srachivaniya kremievich plastin cherez sloi steklovidnogo dielectrica. *Perspektivnye materialy*. 2000. № 6. P. 21–24.
4. Timochenkov S. P., Chapligin J. A. Micro- i nanomicro-mechanicheskie sistemi. *Nanotechnologii v electronice*. Pod red. J. A. Chapligina Technosfera. Moskau. 2005. P. 381–420.
5. Zimin V. N., Danilova H. L., Pankov V. V., Chabratov V. N. Bazovye konstrukcii integralnich tenzopreobrazovatelyei na rjad davleni ot 0,01 do 40 MPa. *Datchiki i sistemi*. 1999. № 2. P. 52–55.
6. Galuchkov A. I., Zimin V. N., Chapligin Yu. A., Chelepin N. A. Kremnievie integralnie datchiki fizicheskikh velichin na ocnove tehnologii microelectronici. *Electronnaja promichlennost'*. 1995. № 5. P. 95–101.

УДК 621.3.049.77:620.178.55

А. Н. Стари́ков, канд. техн. наук, доц. каф.,

В. Ф. Коростелёв, д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ,

Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, e-mail: giess300@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Поступила в редакцию 15.10.2014

Выполнено исследование эффективности поиска вибрационной активности микроэлементов электротехнического устройства и стоячих волн композитной платы. Предложен метод графической визуализации вибрационного поля сложного технического устройства, позволяющий более эффективно и оперативно проектировать технические системы с повышенными требованиями по виброзащитенности.

Ключевые слова: микроэлектроника, электромеханический привод, плата управления, вибрация, виброзащита, визуализация, резонанс, надежность

Введение

Разработка систем управления (СУ) на основе микроконтроллеров является одной из ключевых при разработке газотурбинных двигателей (ГТД).

К основным задачам при проектировании электронного устройства относят вопросы общей компоновки, алгоритма функционирования, электро-

магнитной совместимости. При этом вопрос вибрационной устойчивости электронных компонентов и самой платы зачастую является определяющим.

Анализ работ по данной тематике показывает достаточно глубокую проработку этого вопроса. Это объясняется постоянной актуальностью и растущей потребностью в повышении надежности и

защиты от вибрационных полей в современной технике.

К основным элементам проектирования новых устройств относят натурные испытания. Наибольшую сложность представляют динамические, и в частности, вибрационные испытания.

Проблемы проведения виброиспытаний известны, к ним относятся:

- создание адекватной математической модели;
- практическая сложность отработки всех точек геометрического пространства устройства;
- создание на стенде нагрузки, адекватной реальному объекту, по частотам, по ускорениям, по направлениям;
- выбор оси воздействия (как правило, рассматриваются не более трех осей под углами 90°);
- определение параметров по запасам надежности или удаленности от критических состояний.

Последний момент имеет существенную важность для создания устройств с требуемыми запасами по устойчивости к вибровоздействиям. Результат испытаний устройства в виде ключевого ответа "выдержало/не выдержало" имеет перспективой развития численную оценку: значение запаса по виброустойчивости. Этот запас, в свою очередь, повышает общую надежность технической системы.

В своем решении все эти факторы сдерживаются научно-методологической и технической составляющими.

В настоящее время к испытательным стендам предъявляют следующие требования: большое число входных каналов измерения; встроенные схемы согласования сигналов; возможность автоматического создания протоколов испытаний; высокая производительность; возможность сохранения, постобработки, визуализации больших объемов измеренных данных и др.

Объект и содержание исследования

Пневматические и электромеханические приводы (ЭМП) занимают доминирующее положение в органах управления ГТД. В качестве объекта исследования взята СУ электромеханическим приводом, расположенная непосредственно на приводе (рис. 1, а, см. третью сторону обложки). Конструктивно это делает привод компактным, моноблочным, с возможностью оперативной установки и настройки. Короткая кинематическая цепь дает точное позиционирование выходного звена и повышенную жесткость. Последнее, в свою очередь, определяет вибрационные поля и параметры стоячих волн устройства, резонансные частоты отдельных компонентов.

СУ представляет собой многослойную электрическую плату с размещенными на ней микроэлементами. Поскольку привод стоит непосредственно на турбине, имеет место усиление вибрационных воздействий на компоненты платы.

К особенностям ведения испытаний электромеханических приводов ГТД можно отнести многофакторность, повышенные требования к достоверности результатов, точность, объективность и наглядность. Немаловажным является тот факт, что зачастую нет возможности многократно запускать турбину, доступ к ней по временным, ресурсным, технологическим и организационным причинам ограничен. Требуется с одного запуска получить максимальную результативность.

В настоящее время существенно расширились возможности по ведению натурального эксперимента. Основные позиции на рынке разработки и создания оборудования и программ для стендовых испытаний занимают фирмы *Agilent*, *Mentor Graphics*, *Tektronix*, *Texas Instruments*, *Arm*, *National Instruments* и др.

За основу было взято оборудование и технологии фирмы *National Instruments*, планируемым результатом являлась автоматизация получения данных при операциях испытания и контроля.

Для испытаний использовали плату сбора данных USB-625 фирмы *National Instruments*. В качестве программного обеспечения применены LabVIEW-2013, NIDAQmx-9.02, DIAdem-11.1. Интерфейс последней представлен ниже на рис. 7. В качестве сенсоров использовали датчики вибрации KD 35a, KD 16 (рис. 1, с).

Методика эксперимента

Цель испытаний — сбор данных на объекте исследования, их последующая обработка и визуализация. Структурная схема стенда представлена на рис. 2.

Виброустановка 1 передает вибрацию непосредственно приводу 2, на котором установлена СУ 3. Вибродатчики 4 снимают информацию и через плату сбора данных 6 передают информацию для хранения и обработки в компьютер на модуль 11. За захват данных отвечает модуль 10 — программный комплекс LabVIEW, за трехмерную визуализацию и синхронное представление данных — модуль 11 — программа DIAdem.

Алгоритм обработки информации следующий: условно создается матрица точек на плате (рис. 3); запускается вибростенд; ведется сбор данных и их сортировка, сохранение; для перехода из временной области в частотную делается преобразование Фурье; создается 3D-модель, которая накладыва-

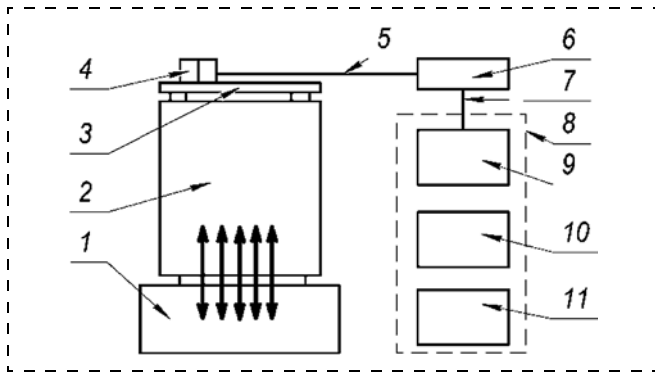


Рис. 2. Структурная схема стенда: 1 — виброустановка; 2 — привод; 3 — объект испытаний (СУ приводом); 4 — датчики вибрации (2 шт.); 5 — провода коммутации датчиков; 6 — плата сбора данных; 7 — USB-кабель; 8 — компьютер; 9 — хранилище данных; 10 — модуль обработки данных; 11 — модуль визуализации данных

Fig. 2. Test bench circuit: 1 — vibration installation; 2 — drive; 3 — object of tests (CS drive); 4 — vibration sensors (2 pieces); 5 — wires for switching of sensors; 6 — data collection board; 7 — USB cable; 8 — computer; 9 — data storage; 10 — data processing module; 11 — data visualization module

ется на офсетную модель платы; ведется анализ вибрационного поля.

На рис. 3 приведена матрица точек, по которым проводился сбор информации вибродатчиками. Особенностью является тот факт, что захват данных выполнялся непрерывно, без остановки стенда: осуществлялось касание на 1—2 с точки (т. 1), затем точки 2 и так далее до точки 40.

Для сужения области поиска и исследований необходимо определить область значений частот, на которых происходит основное воздействие на СУ. В качестве исходной информации были запрошены исходные данные по вибрационной картине на ГТД при его работе (рис. 4, см. третью сторону обложки). Они и были взяты за основу. На имитационном стенде задавались вибрации с частотами 200 и 250 Гц, ускорение 5 g.

Результатом сбора данных явилось полученное и зафиксированное поле значений для 40 точек, с двух датчиков, работающих на одну задачу, т. е. параллельно, но имеющих разную чувствительность. Результат представлен на рис. 5. Данный метод был применен в силу того, что заранее было неизвестно, какой из датчиков даст лучший результат. Кроме того, каждый отдельный запуск вибростенда это отдельное мероприятие, требующее затрат по ресурсам времени, топлива, задействова-

ния личного состава и т. п. В условиях производственного предприятия решение по данной оптимизации оказалось весь ценным. Для повышения точности результата диапазон чувствительности платы сбора данных был ограничен областью $\pm 0,2$ В. На рис. 5 видно, что результаты, полученные с датчика KD 35a (верхний график) лучше укладываются во взятый диапазон, чем с KD 16 (нижний график). Они и были взяты за основные для дальнейшего анализа.

Обработка данных проводилась территориально и по времени независимо от работ на вибростенде. Для захвата информации с датчиков, ее записи, первичной обработки использовалась программа LabVIEW-12 [2—4]. Для визуализации и использовался пакет DIAdem-11.1 [1], его особенностью является возможность работы с различными типами данных, включая видео. Есть возможность на одном экране отобразить совмещенное по времени видео, графики функций, цветовые и поверхностные диаграммы, и т. д. Также имеются инструменты по структурной и математической обработке данных.

Полученные в результате стендовых испытаний данные были отсортированы по точкам (т. 1 — т. 40, см. рис. 3) и по частотам (200 Гц, 250 Гц). Для получения частотной картины в узлах платы было применено преобразование Фурье (рис. 6, см. третью сторону обложки). Была построена 3D- и офсетная модель, с привязкой данных к конкретным точкам (рис. 7, см. четвертую сторону обложки).

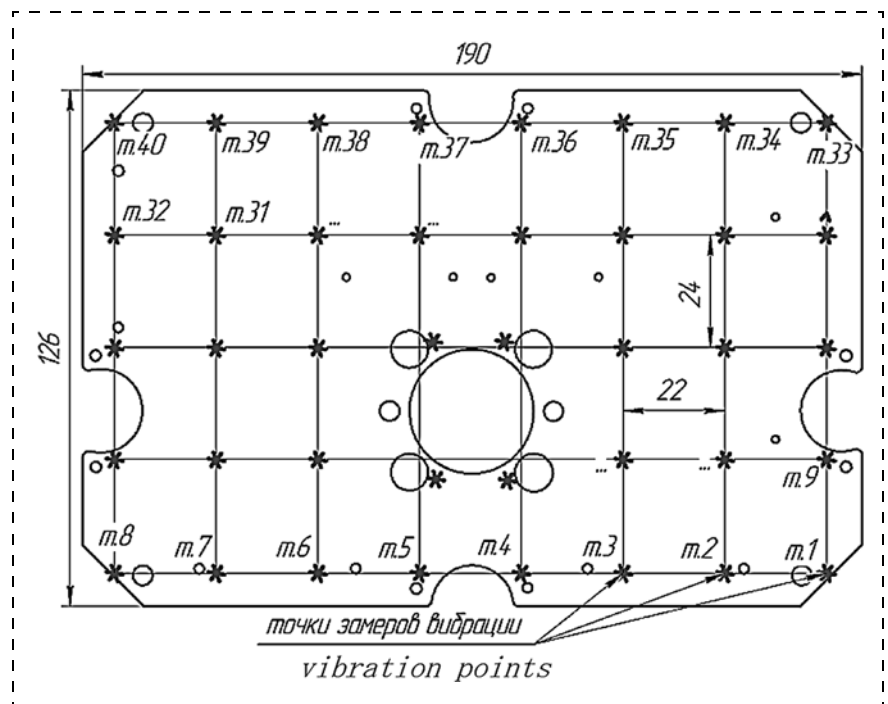


Рис. 3. Матрица точек фиксации информации вибродатчиками
Fig. 3. Matrix of the information fixing points of the vibration sensors

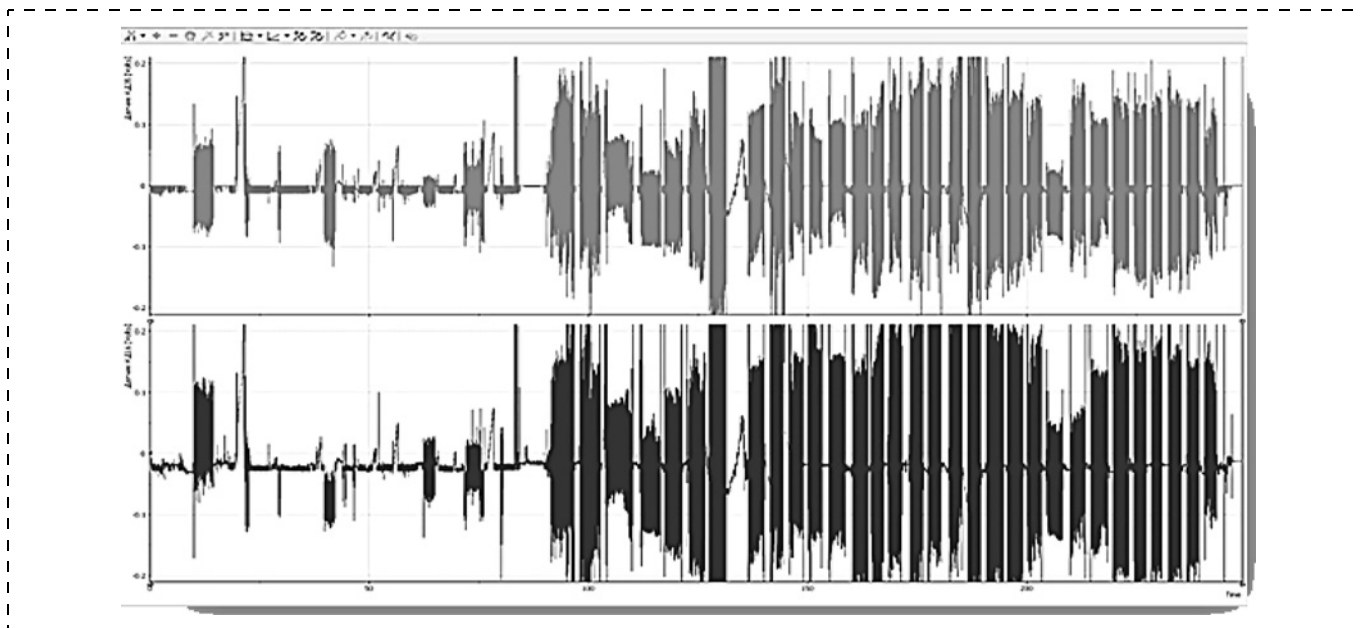


Рис. 5. Результаты, полученные с датчиков KD 35a (сверху), KD 16

Fig. 5. Results from sensors of KD 35a (above) and KD 16

Далее полученные данные помещены на модель платы СУ (рис. 8, 9, см. четвертую сторону обложки). Места наибольшей активности выделены красным и приподняты над платой. Интерполяция по поверхности сделана программно. Получена визуальная картина интенсивности вибрации поверхности платы, что повышает наглядность и дает возможность более оперативно и с большим качеством работать с параметрами устройства (размеры, отверстия, расположения компонентов, крепеж, жесткость и т. п.) для повышения ее вибрационной стойкости.

Так, например, видно, что при частоте 200 Гц плата в целом ведет себя стабильно (рис. 8, см. четвертую сторону обложки). На рис. 9 отмечено, что при частоте 250 Гц проблемным участком является конденсатор в левом углу платы. Его масса входит в резонанс при данных характеристиках вибрации. Наглядность картины дает оперативный простор в решении проблемы.

К основным результатам проведенных испытаний можно отнести следующие:

- разработана структурная, функциональная и конструктивная схемы и натурно создана испытательная установка по ведению вибрационных испытаний электротехнического устройства;
- создана автоматизированная система по ведению сбора, обработки и представления результатов испытаний приводов с применением информационно-управляющей системы измерения и анализа параметров;
- разработано математическое, информационное, алгоритмическое обеспечение проведения автоматизированного эксперимента;

— проведены испытания СУ привода; получено поле значений характеристик как функций от параметров и условий эксплуатации;

— проведен анализ полученных данных, выработаны рекомендации по компоновке платы, подбору и крепежу микроэлементов;

— определены резервы повышения эффективности проектирования и эксплуатации ЭМП за счет подхода к проведению вибрационных испытаний как комплексной процедуры, включающей одновременное снятие и фиксацию данных в автоматическом режиме с последующей их отдельной обработкой и анализом характеристик конструктивной и микроэлектронной базы;

— поставлена задача по определению значения запаса по вибрационной устойчивости сложного технического устройства;

— разработан метод визуализации результатов вибрационных испытаний микроэлектроники СУ приводов ГТД.

Данная методика может быть также расширена, скорректирована и применена для других технических систем.

Список литературы

1. Блюм П. LabVIEW: стиль программирования / Пер. с англ. под ред. П. М. Михеева. М.: ДМЛ Пресс, 2008. 400 с.
2. Измерения в LabVIEW. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2003. 148 с.
3. Трэвис Дж., Кринг Дж. Lab VIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2008. 879 с.
4. Программа DIAdem. Обработка и анализ данных, генерация отчетов. М.: NI Russia, 2008. 103 с.

Improvement of the Vibration Resistance of the Microelectronic Devices

Research was done of the effectiveness of the search for vibratory activity of the trace elements of the electric devices and standing waves of a composite board. A method of graphical visualization of the vibration field of the complex technical devices is proposed, allowing us to more efficiently design the technical systems meeting higher vibroprotection requirements.

Keywords: microelectronics, electromechanical drive, control board, vibration, vibroprotection, visualization, resonance, reliability

Introduction

Elaboration of the control systems (CS) on the basis of microcontrollers is one of the key tasks in development of the gas-turbine engines (GTE).

Among the priority goals in designing of the electronic device are the questions of general arrangement, algorithm of functioning, electromagnetic compatibility, etc. At that, the question of oscillatory stability of the electronic components and the board itself is often of crucial importance.

Analysis of the works on the given subject demonstrates a deep enough approach to this question. This is explained by a constant topicality and growing demand for higher reliability and protection against the vibratory fields in modern technologies.

Among the basic elements in designing of new devices are full-scale tests, and the most challenging are the dynamic tests, and vibration tests, in particular.

The vibration tests involve the following well-known problems:

- Development of an adequate mathematical model;
- Practical complexity of working off of all the points of the geometrical space of the device;
- Imitation at the test bench of the loading, adequate to a real object: by frequencies, accelerations and directions;
- Selection of the axis of influence (as a rule, not more than three axes are considered, at the angles of 90°);
- Determination of the parameters of the reliability margins or remoteness from the critical states.

The last factor has essential importance for development of the devices with the required margins of stability to vibrations. The result of tests of the device in the form of answer "passed/not passed" has a numerical estimation of the development prospects: value of reliability margin on the vibration resistance. This margin, in turn, raises the general reliability of a technical system.

Solution to all these problems depends on the scientific-methodological and technical factors.

Now, there are the following demands to the test benches: a big number of entrance channels of measurement, built-in circuits for coordination of signals, automatic test reports, high efficiency, possibility of storage, postprocessing and visualization of great volumes of the measured data, etc.

Object and content of the research

Pneumatic and electromechanical drives (EMD) occupy a leading position in GTE controls. As an object of research,

CS was taken with a electromechanical drive located directly on the drive (fig. 1, look at the 3-rd page of the cover). Structurally, it makes a drive compact, of a monoblock design, with a possibility of operative installation and adjustment. A short kinematic circuit ensures an accurate positioning of an outlet link and improved rigidity. The latter, in its turn, determines the vibration fields and parameters of the standing waves of the device, and the resonant frequencies of separate components.

CS is a multilayered electric board with microelements placed on it. Since the drive is installed directly on the turbine, the strengthening of the vibrating influences on the board components takes place.

Among the specific features of conducting tests of GTE electromechanical drives are numerous factors of influence, increased requirements to the reliability of the results, accuracy, objectivity and visualization. The fact that frequently there is no possibility to start a turbine, an access to it is limited, and this concerns time, resource, technological and organizational reasons. It is necessary to obtain the maximal productivity from one start.

Now, there are wide opportunities for conducting natural experiments. The basic positions in the market of R & D of the equipment and software for the bench tests are occupied by companies Agilent, MentorGraphics, Tektronix, Texas Instruments, Arm, National Instruments, etc.

The basic equipment and technologies were from National Instruments, and the expected result was automation of the data acquisition for the test and control operations.

For the tests we used USB-6251 board for data collection from National Instruments, and as the software we applied: LabVIEW-2013, NIDAQmx-9.02, and DIAdem-11.1. The interface of the latter is presented in fig. 7 (look at the figure on the 4-th page of the cover). The sensors were vibration sensors KD35a and KD16 (fig. 1, c, look at the figure on the 3-rd page of the cover).

The experiment technique

The test objective was collection of data on the object of research, their subsequent processing and visualization. The bench circuit is presented in fig. 2.

The vibration installation 1 transfers vibration directly to drive 2, on which CS 3 is fixed. Vibration sensors 4 read the information and transfer it through the board for data collection 6 for storage and processing in the computer module 11. The data is captured by module 10 — LabVIEW software

complex, and a three-dimensional visualization and synchronous presentation of the data is done by module 11 — DIAdem program.

Algorithm for the information processing is the following:

- The matrix of points is conditionally created on the board (fig. 3);
- The vibrostand is started;
- Data collection and processing is conducted;
- Storage;
- Fourier transformation from the time area into the frequency area is done;
- A 3D model is developed, which is put over the offset board model;
- Analysis of the vibration field is conducted.

Fig. 3 demonstrates a matrix of points, by which the vibration sensors collect information. A specific feature is the fact that the capture of data is carried out continuously, without stopping of the stand: first, 1—2 points are contacted, point 1 (p. 1), then point 2, and so on, up to point 40.

For narrowing of the area of search and research it is necessary to determine the area of the values of frequencies, on which CS is basically influenced. The requested initial information was the initial data on the vibration picture on GTE during its operation, fig. 4 (look at the figure on the 3-rd page of the cover). They were taken as a basis. At the imitation stand the vibrations with frequencies of 200 and 250 Hz, and acceleration of 5 g were set.

The result of the data collection was the received and fixed field of values for 40 points, from the two sensors oriented on one task, i.e. working in parallel, but having different sensitivity. The result is presented in fig. 5 was applied, because it was not known in advance, which of the sensors will yield the best result. Besides, each start of the vibrostand is a separate action demanding resources in the form of time, fuel, staff involvement, etc. In the conditions of an industrial enterprise the solution to the given optimization appeared very valuable. In order to increase the accuracy of the result the range of sensitivity of the board of data collection was limited by the area of $\pm 0,2$ V. Fig. 5 shows, that the results received from sensor KD35a (top diagram) better fit the taken range, than those from KD16 (bottom diagram). And they were taken for the further analysis.

Processing of the data was done by a territorial principle, irrespectively of the works on the vibrostand. The data was captured from the sensors, recorded and primarily processed with LabVIEW-12 program [2—4]. For its visualization DIAdem-11.1 package [1] was used, because it can operate with various types of data, including video. It allows us to present in one screen the coordinated in time videos, diagrams of functions, color and surface diagrams, etc. It also has tools for the structural and mathematical data processing.

The data obtained as a result of the bench-test were sorted out by points (p. 1 — p. 40, see fig. 3) and by frequencies (200 Hz, 250 Hz). Fourier transformation was applied for reception of a frequency picture in the board units (fig. 6, look at the figure on the 3-rd page of the cover). A 3D and an offset model were constructed, with a binding of the data to the

concrete points — (fig. 7, look at the figure on the 4-th page of the cover).

Then, the obtained data were placed on CS board model (fig. 8, 9, look at the figures on the 4-th page of the cover). The places of the greatest activity were marked with red and raised over the board. Interpolation on the surface was made with application of the software. The visual picture of the intensity of vibration of the board surface was obtained, which improved its visualization and ensured a more efficient and quality operation with the device parameters (dimensions, apertures, arrangement of the components, fixture, rigidity, etc.) for a higher vibration resistance.

Thus, for example, it is visible, that at frequency of 200 Hz the board as a whole is stable (fig. 8). In fig. 9 (look at the figure on the 4-th page of the cover) it can be noticed, that at frequency of 250 Hz a problem site is the condenser in the left corner of the board. Its weight comes into a resonance at the given characteristics of the vibration. Visualization of the picture gives ample opportunities for solving the problem.

Among the basic results of the done tests are the following:

— Structural, functional and constructive circuits were developed and a natural test facility was created for conducting of the vibration tests of the electrotechnical device;

— An automated system was created for collection, processing and presentation of the results of the drive tests with application of information-control system for measurement and analysis of the parameters;

— Mathematical, information and algorithmic support was developed for an automated conducting of the experiment;

— CS drive tests were done; a field of characteristics' values was obtained as functions of the parameters and operation conditions;

— Analysis of the obtained data was done, recommendations were developed concerning the layout, selection and fixing of the microelements;

— Reserves for an increase of the efficiency in designing and operation of the electromagnetic field were determined due to carrying out of the vibration tests as a complex procedure including simultaneous removal and fixing of data in an automatic mode with their subsequent separate processing and analysis of the characteristics of the design and microelectronic base;

— A task was set to determine the value of the reserve of the vibration stability of the complex technical device;

— A method was developed for visualization of the results of the vibration tests of CS microelectronics of GTE drives.

The given technique can be expanded, corrected and also applied to the other technical systems.

References

1. Blum P. *LabVIEW: stil programirovania*: per. s angl. Ed. Miheva P. M. — M.: DMK Press, 2008. — 400 p., il.
2. *Izmereniya v LabVIEW*. Novosibirsk. Novosibirski gosudarstvennyi tekhnicheskiy universitet, 2003. 148 p.
3. Travis Dj., Kring Dj. *LabVIEW dla vseh*. M.: DMK Press, 2008. 879 p.
4. DIAdem. National Instruments / Austin, Texas: NI USA, 2008. 103 p.

2-я Российско-Белорусская научно-техническая конференция

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ имени О. В. Лосева,

посвященная

70-летию Победы в Великой Отечественной войне,
70-летию РНТОРЭС им. А. С. Попова,
Всемирному Году Света

вторая половина ноября 2015 г., Нижний Новгород



ОРГАНИЗАТОРЫ:

- Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова
- Нижегородское региональное отделение научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова

ПРИ УЧАСТИИ:

- Академия инженерных наук им. А. М. Прохорова
- Вневедомственный экспертный совет по проблемам воздушно-космической обороны
- Нанотехнологическое общество России
- Московский физико-технический институт
- Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
- Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)
- Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
- Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины
- Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
- Воронежский государственный университет
- ОАО "НИИ электронной техники"
- Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
- Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
- Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
- Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН
- Таганрогский государственный радиотехнический университет
- Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых
- НТЦ "Белмикросистемы" ОАО "Интеграл"
- ОАО "Конструкторское бюро – 1"
- НИИ системных исследований РАН
- ЗАО "Московский научно-исследовательский телевизионный институт"
- ООО "НИИ "АСОНИКА"

Миссия конференции:

- объединение под эгидой РНТОРЭС им. А. С. Попова всех специалистов, заинтересованных в реальном развитии отечественной элементной базы отечественной радиоэлектроники;
- анализ современного уровня отечественных экспериментальных и теоретических исследований в области элементной базы радиоэлектроники;
- объединение усилий российских и белорусских ученых в развитии фундаментальных исследований и прикладных разработок в микроэлектронике, во внедрении отечественных инноваций из микроэлектронной области в отраслях отечественной экономики, основанных на достижениях микроэлектроники: в связи, навигации, телекоммуникациях, дистанционном зондировании Земли и т. д., а также в импортозамещении и поддержке отечественного товаропроизводителя в сфере микроэлектроники, в том числе в выходе на внешние рынки

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

Председатель Программного комитета: академик Гуляев Юрий Васильевич

Члены Программного комитета: академик Асеев А. Л., академик Бугаев А. С., академик Н. А. Кузнецов, академик Сигов А. С., академик Федоров И. Б., член-корр. Андронов А. А., член-корр. Аристов В. В., член-корр. Белоус А. И., член-корр. Гурский Л. И., член-корр. Двуреченский А. В., член-корр. Зубарев Ю. Б., член-корр. Каляев И. А., член-корр. Кондратьев В. В., член-корр. Никитов С. А., член-корр. Рогачев А. В., член-корр. Черепенин В. А., д. т. н. Ашурбейли И. Р., проф. Бобрешов А. М., проф. Малинецкий Г. Г., д. т. н. Оболенский С. В., д. ф.-м. н. Потапов А. А., проф. Сухарев Е. М., проф. Шалумов А. С., к. ф.-м. н. Новиков М. А.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

д. т. н. С. Г. Бобков, проф. В. К. Зольников, д. и. н. В. В. Кондрашов, д. ф.-м. н. А. И. Панас, проф. Л. Т. Сушкова, проф. В. П. Хранилов, проф. А. В. Частиков, проф. Н. П. Ямпурин, к. б. н. А. А. Гаврилова, к. т. н. В. С. Гутин, к. т. н. Ф. Н. Ковалев, к. в. н. И. В. Косяк, к. т. н. Г. А. Самсонов, к. ф.-м. н. И. В. Ракуть, к. т. н. Ю. М. Туляков, к. ф.-м. н. Д. Е. Шапошников, Н. Д. Абросимова, Л. П. Андрианова, А. Э. Рассадин, В. Л. Ягодкин

Работа конференции будет организована в форме пленарного и секционных заседаний, а также проблемно-тематических круглых столов на темы:

"Сценарии полномасштабного восстановления отечественного электронного машиностроения"

"Элементная база для отечественной робототехники"

"Сценарии создания полностью отечественной экзафлопной суперЭВМ"

Рабочий язык конференции — русский.

Доклады, включенные в Программу конференции, будут опубликованы в **Сборнике трудов конференции**.

По решению руководителей секций конференции расширенные версии лучших секционных докладов, сделанных **ОЧНЫМИ** участниками конференции, будут опубликованы в следующих журналах, включенных в перечень ВАК: "Нелинейный мир", "Нано- и микросистемная техника".

РАБОТА КОНФЕРЕНЦИИ ПЛАНИРУЕТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ:

(укажите соответствующий № направления в заявке к докладу)

1. Электрические, оптические, структурные и химические свойства полупроводниковых материалов. Физика полупроводниковых приборов. Приборы на квантовых эффектах. Моделирование на суперЭВМ методом молекулярной динамики физических процессов в материалах и компонентах электронной техники. Наноструктуры и нанотехнологии в микроэлектронике. Моделирование сложных наносистем, в том числе на суперЭВМ.

2. Радиационнотойкая микроэлектроника. Космические электронные компоненты и вопросы их сертификации. Доминирующие эффекты в полупроводниковой электронной компонентной базе при воздействии импульсных и стационарных ионизирующих излучений. Математические модели электронной компонентной базы при воздействии ионизирующих излучений. Проектирование современных радиационнотойких интегральных схем и радиационнотойкой радиоэлектронной аппаратуры. Имитационное моделирование на суперЭВМ при проектировании современных радиационнотойких интегральных схем.

3. Оптоэлектроника, в том числе оптоэлектронные приборы на гетероструктурах, гетероструктурная СВЧ-электроника, волоконная оптика, акустоэлектроника, спинтроника, фрактальные радиоэлементы, пассивная элементная база: устройства и материалы.

5. Исследование внедрения инноваций в микроэлектронике. Проблемы импортозамещения в микроэлектронике. Вопросы экономики, качества, надежности, диагностики и стандартизации в производстве элементной базы отечественной радиоэлектроники.

7. Вопросы профессионального образования в нано-, микро- и радиоэлектронике. Проблемы обеспечения качества подготовки специалистов по элементной базе по дисциплинам математического цикла.

4. Технологии получения материалов для элементной базы отечественной радиоэлектроники, а также методы их исследования: сканирующая зондовая микроскопия, рентгеноструктурный анализ и т. д. Оптическая, рентгеновская и электронная литография. Моделирование на суперЭВМ технологических процессов микроэлектроники.

6. Интегрированные интеллектуальные системы радиолокации, гидролокации, навигации, связи будущего. Параллельные вычисления и грид-технологии в перспективных радиотехнических системах: системах дистанционного зондирования Земли, ГЛОНАСС и т. д., а также в гидроакустических системах.

8. Нано-, микро- и радиоэлектроника в медицине и микробиологии. Грид-технологии в телемедицине.

СРОК ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДОКЛАДОВ В СБОРНИК ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ:

(информация о регистрации обновляется на сайте: <http://www.rntores.ru>)

до 20 сентября 2015 года включительно

ПРИЕМ ДОКЛАДОВ — НА ЭЛЕКТРОННЫЙ АДРЕС:

3 ФАЙЛА + ОПЛАТА целевого взноса.

- 1 **E-mail** Заявка для каждого соавтора (фамилия, имя, отчество, год рождения, место работы, должность, научные степени-звание, E-mail для переписки, телефон, факс, **почтовый адрес с индексом**); в этих сведениях указать название направления. Название всех файлов должны начинаться с фамилии автора.
- 2 **E-mail** **ДОКЛАД** (до 4 страниц) на русском языке (требования к оформлению в ПРИЛОЖЕНИИ).
- 3 **E-mail** **Акты экспертизы** или другие документы, разрешающие публиковать материал в открытой печати. **СКАНКОПИЯ**
- 4 **через БАНК** **Оплата (ЦЕЛЕВОЙ — регистрационный взнос)**. Требуется оплатить одновременно с присылкой. **Поступление денег мы контролируем сами**. Оплата платежным поручением или через Сбербанк. При необходимости может быть выставлен счет, оформлен договор на услуги. Запрос счета по электронной почте: nn.nto@mail.ru
В случае отклонения доклада взнос возвращается.

ЦЕЛЕВОЙ (РЕГИСТРАЦИОННЫЙ) ВЗНОС за один доклад

(один взнос включает: доклад + публикация + один Сборник трудов конференции)

Слушатели приглашаются бесплатно (без предоставления "Сборника трудов Конференции").

Реквизиты для перечисления взносов: Нижегородское НТОРЭС имени А. С. Попова, **ИНН 5260093486, КПП 526001001, БИК 042202747, Р/сч. 40703810023500000014** Нижегородский филиал ОАО АКБ "РОСБАНК", г. Нижний Новгород. **Кор/счет 30101810400000000747**

Назначение платежа: "Лосев-2015 Целевой взнос на конференцию", **НДС не облагается.**

АДРЕС ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТА:

603006 Нижний Новгород, Нижегородское НТОРЭС им. А. С. Попова, ул. Ковалихинская, д. 28

СЕКРЕТАРИАТ:

<i>Организационные вопросы</i> Рассадин Александр Эдуардович Координатор объединенных научно-образовательных программ НРО НТОРЭС им. А. С. Попова Сотовый: +7 (964) 839-78-12 E-mail: brat_ras@list.ru	<i>Прием докладов</i> ШАПОШНИКОВ Дмитрий Евгеньевич Главный ученый секретарь НРО НТОРЭС им. А. С. Попова Сотовый: +7 (910) 790-07-46 E-mail: shaposhnikov@pmk.unn.ru	<i>Взносы, финансы, оргвопросы</i> Ягодкин Вячеслав Леонидович Заместитель Председателя НРО НТОРЭС им. А. С. Попова Тел/факс: +7 (831) 462-22-66 Сотовый: +7 (910) 381-80-50 E-mail: nn.nto@mail.ru
---	--	--

Подробная информация и список принятых докладов публикуются на сайте:

<http://www.rntores.ru/>

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ДОКЛАДОВ

Тексты докладов подготавливаются только в редакторе Microsoft **Word** (любой версии) **объемом до 4 страниц** формата А4. Названия файлов должны начинаться с фамилии авторов для идентификации материалов доклада, после имени указывается, что это за файл (доклад, заявка, аннотация). Названия файлов пишутся русскими буквами. Архивирование не требуется.

Все поля страницы **2,5 см**

Поля			
Верхнее:	2,5 см	Нижнее:	2,5 см
Левое:	2,5 см	Правое:	2,5 см

Образец оформления заголовка:

НАЗВАНИЕ ДОКЛАДА (ARIAL 12pt, ПРОПИСНЫЕ, ПОЛУЖИРНЫЙ)

проф. Иванов А.Б., преп. Петров С.Д., студ. Сидоров Е.Ж. (TNR обычный, 10pt.)

Название организации (TNR обычный, 10pt.)

Сам текст доклада - Times New Roman (TNR) обычный, 10pt. Абзац выравнивается по ширине (по двум сторонам), отступ первой строки - 5 мм, межстрочный интервал **одинарный**.

Страницы *не* нумеруются.

- Название доклада** оформляется ПРОПИСНЫМ шрифтом ARIAL 12pt.
Все остальное — обычным шрифтом. Times New Roman обычный, 10pt.
- Авторы** указывают свой статус, фамилию и (после фамилии) инициалы. Если авторы из разных организаций, они нумеруют свою организацию¹ и себя¹ соответствующей цифрой в режиме верхнего индекса.
Статус авторов, звание, ученая степень перед фамилией сокращенно: профессор — **проф.**, доцент — **доц.**, ассистент — **асс.**, преподаватель или старший преподаватель — **преп.**, аспирант — **асп.**, инженер любой категории — **инж.**, студент — **студ.** Сотрудники предприятий и организаций указывают уровень квалификации (доктор, кандидат технических, физико-математических и др. наук) в общепринятом сокращении. Это же относится и к утвержденному научному званию.
- Название организации** по возможности полное, затем сокращенное в скобках.
- Текст доклада.**
- Литература** — слово "Литература" посередине. Далее перечень в виде списка.

Примечания: Формулы оформляют во встроенном редакторе формул Microsoft **Word**. Страницы не нумеруют. Графика, фото, таблицы в тексте доклада в **черно-белом** варианте (печать ч/б). Контакты с автором доклада можно указать в самом конце, после списка литературы, в произвольной форме по желанию.

Суммарно весь доклад не должен превышать 4 стр. формата А-4

Материалы, не отвечающие данным требованиям, не могут быть опубликованы!

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

МАТЕРИАЛЫ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ В РЕДАКЦИЮ

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

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА СТАТЬИ

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

АНГЛОЯЗЫЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

(СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ ЗАРУБЕЖНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ):

- инициалы и фамилии каждого автора, e-mail, полное название места работы и адрес (при совпадении места работы авторов нужно указывать его один раз для всей группы авторов);
- название статьи;
- аннотация статьи объемом не менее 200 слов, написанная качественным английским языком, отражающая основное содержание статьи с указанием цели, задачи, результатов исследования и кратких выводов;
- ключевые слова (10—12 слов);
- список литературы в романском алфавите (латинице), т. е. необходимо транслитерировать на латинский шрифт (см., например, <http://translit.ru/>) инициалы и фамилии авторов, название источника публикации и место издания, а технические сокращения (номер, том, страница и т. п.) должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — N., том — V., страницы — P. и т. п.).

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ ЖУРНАЛА

107076, Г. МОСКВА, СТРОМЫНСКИЙ ПЕР., 4, ИЗДАТЕЛЬСТВО "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА "Нано- и микросистемная техника"

Тел.: (499) 269-55-10; тел./факс: (499) 269-55-10

E-mail: nmst@novtex.ru <http://microsystems.ru>

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

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 23.03.2015. Подписано в печать 20.04.2015. Формат 60×88 1/8. Заказ МС0515. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансесд солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансесд солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru