



# ХІ МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ — ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ проводится в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 апреля 2014 г. № 541-р

# 15-17 мая 2018 г., Москва, ВДНХ, павильон 75, «Россия»



# ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Консолидация усилий власти, науки и бизнеса в развитии отечественного приборостроения для обеспечения нужд промышленности и оборонного комплекса страны, а также повышение эффективности российской системы измерений, совершенствование нормативной базы метрологии с учетом международных тенденций в целях поддержки инноваций и их продвижения.

# ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΥΜΑ



# **METROLEXPO**

Метрология и Измерения

14-я выставка средств измерений, испытательного оборудования и метрологического обеспечения.



# **CONTROL&DIAGNOSTIC**

Контроль и Диагностика

7-я выставка промышленного оборудования и приборов для технической диагностики и экспертизы.



# RESMETERING

Учёт энергоресурсов 7-я выставка технологического и коммерческого учета энергоресурсов.



# LABTEST

Лабораторное оборудование

6-я выставка аналитических приборов и лабораторного оборудования промышленного и научного назначения.

G		
E		<u>1</u>
	2	5

# PROMAUTOMATIC

Приборостроение и автоматизация

6-я выставка оборудования и программного обеспечения для технологических и производственных процессов.



WEIGHT SALON Весовой салон

2-я выставка весового оборудования.



# **ДИРЕКЦИЯ ФОРУМА**

129344, Москва, ул. Искры д. 31, корп. 1, Технопарк ВДНХ **Тел./Факс: +7 (495) 937-40-23 (многоканальный)** 

www.metrol.expoprom.ru E-mail: metrol@expoprom.ru

# TAIO- & MIKPOGIGIEMHAA

# Том 20. № 2 � 2018

# ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в международные базы данных на платформе Web of Science: Chemical Abstracts Service (CAS), которая входит в Medline, и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и включен в международную базу INSPEC

и в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям:

01.04.00 — физика, 05.27.00 — электроника, 02.00.00 — химические науки.

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук Статьи имеют DOI и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

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 Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Лабунов В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь) Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

# Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь) Андреев А., к.ф.-м.н. (Великобритания) Астахов М. В., д.х.н., проф. Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай) Басаев А. С., к.ф.-м.н. Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф. Горнев Е. С., д.т.н., проф. Карякин А. А., д.х.н., проф. Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды) Леонович Г. И., д.т.н., проф. Панин Г. Н., к.ф.-м.н., проф. (Южная Корея) Панич А. Е., д.т.н., проф. Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва) Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония) Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия) Сингх К., к.т.н. (Индия) Телец В. А., д.т.н., проф. Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н. Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф. Шубарев В. А., д.т.н., проф.

# Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва) Лысенко А. В. (отв. секретарь) Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода) Шетинкин Д. А. (сайт)

# СОДЕРЖАНИЕ

Издается с 1999 г.

# НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

<b>Торхов Н. А., Никульникова Е. В.</b> Методы АСМ для контроля ка- чества $p^+$ — <i>n</i> -переходов GaAs	67
<b>Глухова О. Е., Шмыгин Д. С.</b> Закономерности электрической прово- димости графен-нанотрубных пленок: новая универсальная методика вычисления функции пропускания	78

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Корляков А. В., Лагош А. В. Критерий оптимизации конструкции	
микромеханического ключа СВЧ диапазона	87
Шигорев Л. А. Применение шины диагностики в задаче саморемонта	

щигорев л. А. применение шины диагностики в задаче саморемонта	
блоков статической оперативной памяти	98

# ПРИМЕНЕНИЕ НМСТ

# элементы мнст

Аннотации и статьи на русском и английском языках доступны на сайте журнала (http://microsystems.ru; http://novtex.ru/nmst/) в разделе "Архив статей с 1999 г.".

## 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

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2018

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

# NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

# (Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

## **CHIEF EDITOR**

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

## **DEPUTY CHIEF EDITOR**

Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

## **DEPUTY CHIEF EDITOR**

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA)

## **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., Acad. RAS Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

## **Editorial board:**

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China) Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.) Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.) Kuznetsov V. I., Dr. Sci. (Tech.) (Netherlands) Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panin G. N., PhD, Prof. (South Korea) Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.) Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof. Santos E. J. P., PhD, Prof. (Brasil) Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Singh K., PhD (India) Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

## **Editorial staff:**

Antonov B. I. (Director Publ.) Lysenko A. V. (Executive secretary) Chugunova A. V. Grigorin-Ryabova E. V. Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.) Shchetinkin D. A. (site) The Journal is included in the international databases of the chemical sciences — Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences — INSPEC, and it is also indexed

in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform. The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages. The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

Vol. 20

No. 2

2018

# CONTENTS

#### NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

<b>Torkhov N. A., Nikulnikova E. V.</b> Methods of AFM for $p^+$ - $n$ -Junction GaAs Quality Control	74
Glukhova O. E., Shmygin D. S. Regularities of Electrical Conductivity	

of Graphene-CNT Films: :	а	Ν	ew	U	Jni	ive	rsa	al	Τe	ech	ın	iqι	ıe	fo	r	Tr	an	IST	nis	3-	
sion Function Calculating			•	•			•			•				•	•		•		•	•	84

## MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Korlyakov A. V., Lagosh A. V. Criterion for Optimization of the Micromechanical Switch for RF Band	93
Shchigorev L. A. Built-in Self-Repair Application of a Diagnostic Rus	103

## APPLICATION OF MNST

Eroshkin	Р.	A	.,	Р	'et	ru	nin	ŀ	£.	Y	.,	S	he	shi	in	E	. 1	P.	Х	-ra	ay	Т	ub	e e	fo	r	G	as	
Ionizatior	1																												109

## MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Shalimov A. S., Timoshenkov S. P., Golovinsky M. S., Dolgovykh L. I., Kalugin V. V., Chjo Me Aung. Operation and Self-calibration of MEMS Inclinometer under the External Influencing Factors . . . . 127

Our:

Web: www.microsistems.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

# Чанотехнологии и зондовая микроскопия Папотесноосору аnd scanning probe microscopy

УДК 538.91, 538.93, 538.97

DOI: 10.17587/nmst.20.67-78

**Н. А. Торхов**<sup>1,2,3</sup>, канд. физ.-мат. наук, доц. каф., вед. инж.-технолог, e-mail: trkf@mail.ru,

**Е. В. Никульникова**<sup>1</sup>, инж.-технолог, e-mail: nikulnikova\_ev@niipp.ru

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов (НИИПП), Томск

<sup>2</sup> Томский государственный университет, Томск

<sup>3</sup> Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Томск

# МЕТОДЫ АСМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА $p^+$ —n-ПЕРЕХОДОВ GaAs

Поступила в редакцию 15.07.2017

Обнаруженные ACM-методом неоднородности электростатического потенциала, представляющие собой неглубокие  $< 0,2 \ >B$  потенциальные ямы в плоскости  $p^+$ —п-перехода GaAs(100) приводят к локальному понижению высоты барьера для дырок и увеличению обратных токов. Захватывая подвижные электроны и дырки, эти потенциальные ямы приводят также к дрейфу емкости арсенид-галлиевых варикапов. Токи утечки  $p^+$ —п-переходов определяются свойствами защитных нанопленок химического оксида, которые в локальном приближении зависят от фрактальной геометрии рельефа и поверхностного потенциала исходных арсенид-галлиевых поверхностей.

**Ключевые слова:** арсенид галлия, варикап, резкий  $p^+$ —n-переход, статические параметры, дрейф емкости, атомносиловая микроскопия, фрактальная геометрия, однородность  $p^+$ —n-перехода, свойства химического оксида

## Введение

Электростатический потенциал поверхности (далее — поверхностный потенциал) является одним из основных физических объектов, позволяющих характеризовать электрофизические параметры полупроводниковых приборов. К таким контролируемым параметрам можно отнести работу выхода, неоднородности рельефа и электростатического потенциала поверхности, проводимость. Неразрушающие методы атомно-силовой микроскопии (ACM) позволяют одновременно с другими методами измерения оперативно осуществлять контроль этих параметров на рабочих полупроводниковых пластинах практически на всех промежуточных технологических операциях по изготовлению полупроводниковых приборов [1—3].

Исходя из изложенного выше, в работе методами ACM были исследованы физические механизмы появления производственного брака изготовленных на основе резких  $p^+$ —*n*-переходов арсенидгаллиевых (GaAs) варикапов.

#### Методическая часть

В работе были использованы выращенные методом газофазной эпитаксии  $p^+ - n - n^+$  GaAs(100)

структуры с резким несимметричным  $p^+$ —*n*-переходом. Эпитаксиальный *п*-слой толщиной ~11 мкм и концентрацией легирующей примеси  $N_D^+ \approx (1,8...2,5) \times 10^{15}$  см<sup>-3</sup> выращивали на высоколегированной  $n^+$ -подложке GaAs(100). Затем в реакторе непосредственно перед наращиванием р<sup>+</sup>-слоя осуществлялось газофазное подтравливание (освежение) эпитаксиального *п*-слоя с последующим наращиванием  $p^+$ -слоя толщиной >2,5 мкм и концентрацией легирующей примеси  $N_A^+ \approx 5 \times$  $\times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. После входных химических обработок поверхность  $p^+$ -слоя покрывалась защитным слоем SiO<sub>2</sub>, выполнялось утонение структуры со стороны  $n^+$ -подложки и электрохимическим методом формирование на ней омического контакта на основе AuGe с последующим отжигом в атмосфере водорода. После этого в окнах SiO<sub>2</sub> с последующим отжигом формировали омические контакты к  $p^+$ -слою на основе AuZn, удаляли пленку SiO<sub>2</sub> и по маске фоторезиста травили мезу глубиной до  $n^+$ -слоя. После этого открытую поверхность GaAs покрывали защитным слоем химически оксидированной поверхности (далее - ХОП) толщиной 100...150 нм и отжигали при температуре 300...400 °С в атмосфере азота. Применение для защитных целей таких пленок обусловлено простотой их получения и достаточной эффективностью. Нанопленки ХОП эпитаксиального слоя  $p^+$ -GaAs(100) получали "быстрым" (~20 нм/мин) способом оксидирования в кипящем растворе иодноватокислого калия [4]. В завершение технологического процесса пластину разделяли на отдельные кристаллы и осуществляли контроль их статических параметров.

Измерение статических вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) резкого несимметричного  $p^+$ —*n*-перехода GaAs(100) расположенных на пластине кристаллов происходило в ручном режиме измерителем полупроводнико-вых приборов Agilent B1500 на зондовой станции Cascade Microtech M150.

Параметры исходных и химически оксидированных поверхностей  $p^+$ -GaAs(100) исследовали методами атомно-силовой микроскопии (АСМ, микроскоп Solver-HV). Измерение рельефа h(x, y)происходило в полуконтактном режиме сканирования с резонансной частотой колебания балки кантилевера 430 кГц. Электростатический потенциал поверхности — контактную разность потенциалов (КРП)  $\Delta \phi = \phi_s - \phi_p$  измеряли методом Кельвина (где  $\phi_s$  — электростатический потенциал исследуемой поверхности, а  $\phi_n$  — электростатический потенциал острия иглы кантилевера диаметром ~30 нм), проводимость (ток растекания) — в контактном Ipr-режиме, а значение взаимодействия острия иглы кантилевера с поверхностью (кривые подвода и отвода) — в DFL-режиме [1]. Кривая подвода описывает амплитуду DFL-сигнала при приближении иглы кантилевера к поверхности, а кривая отвода при отдалении иглы от поверхности.

Механические свойства ХОП исследовали методами наноиндентирования с помощью системы "Table top nanoindentation system", производства фирмы *Instruments* (Швейцария).

Геометрию неоднородностей поверхности исследовали в глобальном (при l > L, где l — значение измерительного масштаба) и локальном ( $l \le L$ ) приближениях с привлечением математического аппарата фрактальной геометрии дробных размерностей 1  $< D_S < 2$ . Фрактальная размерность  $D_f = 1 + D_S$ . Значения размерностей подобия  $D_S$  исследуемых поверхностей определяли методом трассировки определенных неоднородностей в плоскости (x, y)  $p^+$ —n-перехода путем подсчета числа N полученных непересекающихся контуров заполнения (условие топологического смешивания) в зависимости от изменения линейного масштаба l в k раз [5]:

$$D_S = \ln(N) / \ln(k). \tag{1}$$

Для исследования однородности  $p^+$ —*n*-перехода  $p^+$ -слой стравливали до толщины <20 нм.

## Экспериментальная часть

Согласно полученным результатам прямые  $I_f(U_f)$ и обратные  $I_r(U_r)$  статические ВАХ сильно отличаются от близких к оптимальным с  $\varphi_{bm,1} = 1,11$  эВ (рис. 1, а, участок 1 прямой ВАХ). Основные отклонения образованы участками 2 и 3 на прямой ВАХ. Участок 2, по всей вероятности, обусловлен нормальным распределением неоднородностей измеренной высоты барьера  $\varphi_{bm,2} = 0,96...1,11$  эВ по площади  $p^+$ —*n*-перехода, что сопровождается увеличением токов насыщения  $J_{s1} \rightarrow J_{s2}$  и нежелательным увеличением обратных токов  $I_r(U_r)$ . Наличие участка 3 на прямой ВАХ обычно связывают с поверхностными токами утечки, возникающими в данном случае вследствие недостаточной просушки зашитной пленки химического оксида. Отжиг кристаллов при температуре 300...400 °С в атмосфере азота обычно приводил к исчезновению или значительному уменьшению токов утечки и, как будет показано далее, изменению одновременно с этим и остальных свойств ХОП.

Отклонения в поведении ВФХ характеризуются наличием дрейфа емкости  $C(U_r = -25 \text{ B})$  (рис. 1, *b*), проявляющемся в постепенном увеличении ее значений с последующим экспоненциальным выходом на насыщение. Примечательно, что независимо от  $U_r$  временные зависимости емкостей  $C(U_r, t)$  выходят на насыщение спустя практически одинаковый промежуток времени  $\Delta t = 60$  с с момента приложения  $U_r$ . При этом коэффициент K (%) относительного увеличения значений  $C(U_r)$  тем больше, чем больше значение обратного смещения  $U_r$ :  $K(U_r = 0) = (C(U_r, t = 60 \text{ c}) - C(U_r, t = 0))/C(U_r, t = 0)100 \% = 0,001 \%, <math>K(U_r = -5 \text{ B}) = 0,24 \%, K(U_r = -15 \text{ B}) = 0,6 \%, K(U_r = -70 \text{ B}) = 1,28 \%.$ 

Для выявления физических причин наблюдаемого отклонения участка 2 прямой ВАХ (рис. 1, а) с предварительно отколотой части пластины был стравлен эпитаксиальный *p*<sup>+</sup>-слой GaAs до толщины, не превышающей 20 нм. Результаты АСМ-измерений рельефа полученной таким образом поверхности (рис. 2, а, см. третью сторону обложки) показали наличие заметных (до 0,2 эВ) и протяженностью *l* локальных неоднородностей  $\Delta KP\Pi$ электростатического потенциала поверхности, как меньше (рис. 2, b, черный контур и стрелка, см. третью сторону обложки), так и больше (рис. 2, b, белый контур и стрелка) средних значений (КРП) поверхности. Теоретические исследования показали, что подобного рода неоднородности могут быть вызваны неравномерным легированием эпитаксиального  $p^+$ -слоя. Действительно, для  $N_A^+ < 5 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup> протяженность области пространственного заряда (ОПЗ) не превышает 10 нм, что соизмеримо с остаточной толщиной  $p^+$ -слоя.



Рис. 1. Обратная ( $I_f(U_f)$ ) и прямая  $\ln(I_f(U_f))$  статические ВАХ изготовленных кристаллов  $p^{++}$ —*n*-GaAs варикапов (*a*). Участок 1 прямой ВАХ:  $\varphi_{bm,1} = 1,11$  эВ,  $n_1 = 1,38$ ,  $\varphi_{b,1} = 1,53$  эВ; участок 2:  $\varphi_{bm,2} = 0,96$  эВ,  $n_2 = 1,85$ ,  $\varphi_{b,2} = 1,78$  эВ. При этом  $\varphi_b \approx n \cdot \varphi_{bm}$  [6]; участок 3— утечка. Временная зависимость емкости (*b*) при обратносмещенном  $p^+$ —*n*-переходе,  $C(U_r = -25 \text{ B}) = C(t)$ 

Fig. 1. Reverse  $(I_r(U_p))$  and straight line  $ln(I_f(U_f))$  static VAC of crystals of  $p^+$ -n-GaAs varicaps (a). Section 1 of the straight line of VAC:  $\varphi_{bm,1} = 1.11 \text{ eV}, n_1 = 1.38, \varphi_{b,1} = 1.53 \text{ eV};$  section 2:  $\varphi_{bm,2} = 0.96 \text{ eV}, n_2 = 1.85, \varphi_{b,2} = 1.78 \text{ eV}.$  At that,  $\varphi_b \approx n \cdot \varphi_{bm}$  [6]; section 3 – leakage. Time dependence of the capacity (b) at the reverse displacement of  $p^+$ -n,  $C(U_r = -25 \text{ V}) = C(t)$ 

В этом случае существует вероятность того, что подобного рода неоднородности электростатического потенциала ОПЗ будут выходить на поверхность, формируя там локальные неоднородности, которые мы и наблюдаем при измерениях (рис. 2, *b*).

Согласно изображенной на рис. 3, а энергетической диаграмме большие значения КРП латеральных неоднородностей соответствуют более глубокому залеганию уровня  $\Phi$ ерми в  $p^+$ -области  $qV_{p,2} > qV_{p,1}$  (см. рис. 2, *b*). Это приводит к тому, что эффективные (измеряемые  $\varphi_{bm} \sim \varphi_{bp}$  [6]) высоты барьеров для дырок будут меньше  $\varphi_{bm,2} < \varphi_{bm,1}$ , в то время как истинные, определяемые уровнем Ферми для электронов  $\varphi_b \approx \varphi_{bn}$  на участке *1* прямой ВАХ, будут больше  $\varphi_{b,2} > \varphi_{b,1}$  (см. рис. 1, *a*). В связи с этим на участке 1 прямой ВАХ будет преобладать электронный компонент тока, а на участке 2дырочный. Понижение эффективной высоты барьера в этом случае будет определяться положением уровня Ферми  $E_{Fp}$  для дырок (рис. 3, *a*). На это указывает и то, что разность истинных высот барьеров участков 1 и 2 прямых ВАХ практически соответствует неоднородностям  $\Delta KP\Pi \approx 0.2 \Im B$ (см. рис. 2, *b* на третьей стороне обложки). Преобладание дырочной компоненты тока на участке 2 приводит к увеличению токов рекомбинации (см. рис. 1, а) и, соответственно, к увеличению токов насыщения  $J_{S2} > J_{S1}$ . Близкое к 2 на участке 2 прямых ВАХ значение показателя идеальности  $n_2 = 1,85 \approx 2$  также указывает на большой вклад дырочной (рекомбинационной) составляющей тока.

Таким образом, мы видим, что повышение однородности легирования  $p^+$ -слоя будет способствовать уменьшению количества, размеров и значения КРП латеральных неоднородностей электростатического потенциала в области  $p^+$ —*n*-перехода и повышению его однородности. Это, в свою очередь, приведет к снижению токов насыщения в ряду  $J_{S2} \rightarrow J_{S1}$  и общему снижению обратных токов (см. рис. 1, пунктирные кривые, точки  $A \rightarrow B \rightarrow C$ ).

Кроме локальных изменений высот барьера  $p^+$ —*п*-перехода, наблюдаемые латеральные неоднородности  $\Delta KP\Pi$  могут являться как для электронов (см. рис. 2, b, черные контур и стрелка), так и для дырок (см. рис. 2, b, белые контур и стрелка) неглубокими  $\Delta \phi_s \leq 0,2$  эВ потенциальными ямами со средними линейными размерами l = 200...700 нм. В результате при приложении обратного смещения электроны с донорных уровней  $DL_D$ , попадая в зону проводимости (а дырки с акцепторных уровней  $DL_A$  — в валентную зону), не сразу покидают ОПЗ, что привело бы к быстрому увеличению ее электрического заряда и емкости  $p^+$ —*n*-перехода, а задерживаются на некоторое время в этих неглубоких потенциальных ямах (рис. 3, b,  $\Delta \phi_s$ ). Дополнительное исследование электростатического потенциала на сколе  $p^+$ —*n*-перехода подтвердило наличие потенциальных ям в плоскости  $p^+$ —*n*-перехода для электронов (см. рис. 2, *c*, черные стрелки на третьей стороне обложки) и дырок (см. рис. 2, *c*, белые стрелки). Таким образом, можно предположить, что именно задержка электронов и дырок в расположенных на границе  $p^+$ —*n*-перехода неглубоких потенциальных ямах  $\Delta \varphi_s < 0.2$  эВ является причиной наблюдаемого дрейфа емкости в течение  $\Delta t \approx 60$  с. Ввиду преобладания дырочного компонента тока, основную роль в дрейфе емкости будут играть дырки.

Измерения Ipr-методом токов растекания химически окисленной поверхности  $p^+$ -GaAs позволили определить физические причины наблюдаемого отклонения участка З на прямой ВАХ (см. рис. 1, а). Согласно полученным результатам пленки ХОП имеют довольно рыхлую структуру, удерживающую некоторое количество окислительного раствора не только внутри пленки, но и на ее поверхности в виде тонкого нанометрового адсорбционного слоя. На наличие такого слоя указывают прямые измерения кривых подвода 1 (рис. 4, b, DFL-1, см. третью сторону обложки) и отвода 2 (рис. 4, b, DFL-2) кантилевера к поверхности ХОП непосредственно после ее формирования. Хорошо видно, что при приложении внешней силы для отвода кантилевера, его острие не сразу изменяет свои координаты (залипает), в результате чего на

кривой отвода 2 появляется "зубец"  $\Delta I$ , обусловленный Ван-дер-Ваальсовскими силами притяжения между острием иглы кантилевера и тонким адсорбционным слоем. В этом случае можно говорить о гидрофильных свойствах поверхности ХОП. В общем случае по значению  $\Delta I$  можно измерять основные количественные характеристики адсорбционных слоев: толщину, вязкость и силу взаимодействия. Таким образом, DFL-метод ACM можно использовать для количественного определения основных свойств адсорбционных слоев и степени гидрофильности полупроводниковых поверхностей.

Измерения *Ipr*-методом токов растекания показали наличие нелинейных BAX между нанометровым острием иглы кантилевера и недосушенной поверхностью ХОП (рис. 4, c, кривые 1 и 2, см. третью сторону обложки). На рис. 4, a (см. третью сторону обложки) показаны точки, в которых снимали представленные на рис. 4, c 1 и 2 BAX кантилевера. Хорошо видно, что нанопоры 1 обладают большей проводимостью, чем отдельные зерна 2 (рис. 4, a и рис. 4, c, кривые 1 и 2 соответственно, см. третью сторону обложки).

Отжиг пластины приводит к испарению остатков окислительного раствора, в результате чего исчезает и тонкий адсорбционный слой с поверхнос-



Рис. 3. Энергетические диаграммы  $p^+$ —*n*-перехода, соответствующие участкам 1 и 2 прямой ВАХ (*a*), и энергетическая диаграмма  $p^+$ —*n*-перехода, соответствующая участку 2 прямой ВАХ при наличии обратного смещения  $U_r$  и латеральных неоднородностей электростатического потенциала  $p^+$ —*n*-перехода (*b*)

Fig. 3. Energy diagrams of  $p^+$ -n junction, corresponding to sections 1 and 2 of the straight line of VAC (a) and the energy diagram of  $p^+$ -n junction corresponding to section 2 of the straight line of VAC in case of the reverse displacement  $U_r$  and lateral heterogeneities of the electrostatic potential of  $p^+$ -n junction (b)





Fig. 5. Histograms of the roughnesses of relief h of the COS surfaces with thickness of d = 130 nm taken: in a global approximation at l > 2L (a) and in a local approximation at  $l \le L$  (b)

ти ХОП. На это, в частности, указывает отсутствие "зубца" на кривых подвода *3* и отвода *4* (рис. 4, *b*, DFL-2). Измерение ВАХ *Ірг*-методом на поверхности ХОП в этом случае показало практически полное отсутствие токов растекания (рис. 4, *c*, кривая *3*). Далее будет показано, что отжиг при температуре 350...400 °С приводит к изменению и других свойств ХОП.

Несмотря на давнюю историю использования пленок ХОП, многие их свойства до сих пор недостаточно хорошо изучены. К таким малоизученным свойствам ХОП можно отнести энергию активации образования  $E_a$ , морфологию (рельеф поверхности h(x, y)), электрофизические (проводимость, поверхностный потенциал  $\varphi_s$ ) и механические свойства (твердость H, упругость E и текучесть C) [7].

Временные зависимости толщины химического оксида хорошо аппроксимируются экспоненциальными зависимостями и практически выходят на насыщение после 6 мин оксидирования поверхности  $p^+$ -GaAs(100). Оценка энергии активации образования химического оксида на поверхности  $p^+$ -GaAs(100) с использованием закона Аррениуса дало значение  $E_a \approx 0,3$  эВ.

Измерение рельефа поверхности пленок ХОП в глобальном приближении при l > L показало, что средние значения гистограмм распределения неровностей рельефа h подчиняются известным классическим закономерностям (рис. 5, a). Из рис. 5, a видно, что уменьшение l приводит к уменьшению дисперсии и повышению точности измерения. При этом средние значения h остаются постоянными и не зависят от способа измерения (рис. 5, a, указано стрелкой).

В локальном приближении при  $l \le L$ , как указывалось в работах [5, 7], средние значения hбудут зависеть как от размеров измерительного масштаба *l*, так и от способа измерения, т.е. от того, каким образом было получено значение *l*. Если уменьшение значений l = a/N осуществлялось уменьшением размеров  $a \times b$  (a = b,  $a_1 = 100$  мкм,  $a_2 = 50$  мкм,  $a_3 = 30$  мкм,  $a_4 = 10$  мкм и  $a_5 = 3$  мкм) окна сканирования при постоянном числе точек сканирования N = const (N = 256), то наблюдалось уменьшение средних значений h (рис. 5, b, указано стрелками). Если же уменьшение значений l = a/N осуществлялось увеличением числа точек сканирования N = 64, 128, 256, 512 и 1024 при постоянных линейных размерах окна a = b = const, то наблюдалось увеличение средних значений h (данные не приведены). Согласно [5], это является еще одним признаком хаотических систем. Исследования показали, что пленки ХОП удовлетворяют также и остальным признакам хаотических систем: сильной зависимости состояния системы от начальных условий и свойствам топологического смешивания. В работе [8] было показано, что для однозначного описания таких объектов полупроводниковой электроники в локальном приближении необходимо использовать математический аппарат фрактальной геометрии дробных размерностей.

> Таблица 1 *Table 1*

Значения размерности подобия  $D_S$ для 10 × 10 мкм участков поверхностей Values of the dimension of similarity of  $D_S$ for 10 × 10 µm sections of the surfaces

Объект поверхности	Рельеф	КРП Δφ	ХОП
$p^+$ -GaAs{100}	(рис. 1, <i>a</i> )	(рис. 1, <i>b</i> )	(рис. 1, <i>c</i> )
Surface object	<i>Relief</i>	<i>CPD</i> Δφ	<i>COS</i>
$p^+$ -GaAs{100}	(fig. 1, <i>a</i> )	(fig. 1, b)	(fig. 1, c)
Размерность $D_S$ Dimension $D_S$	1,40 ± 0,05	1,65 ± 0,05	1,65 ± 0,05



Рис. 6. АСМ-изображения  $10 \times 10$  мкм участков поверхности  $p^+$ -GaAs{100} (*a*); его КРП  $\Delta \varphi(x, y)$  (*b*) и рельефа поверхности химического окисла толщиной 120 нм (*c*)

Fig. 6. AFM images of  $10 \times 10$  micrometer sections of the surface of  $p^+$ -GaAs{100} (a); its CPD  $\Delta \varphi(x, y)$  (b) and the relief of the surface of the chemical oxide with thickness of 120 nm (c)



Рис. 7. АСМ-изображения 10 × 10 мкм участков рельефа ХОП толщиной 150 нм отожженного в атмосфере азота при температурах: a - 350 °C; b - 360 °C; c - 370 °C Fig. 7. AFM images of 10 × 10 µm sections of the relief of COS with thickness of 150 nm annealed in the nitrogen atmosphere at: a - 350 °C;

Fig. 7. AFM images of 10 × 10  $\mu$ m sections of the relief of COS with thickness of 150 nm annealed in the nitrogen atmosphere at: a = 350 °C; b = 360 °C; c = 370 °C

Таблица 2

 Table 2

 Значения геометрических  $D_S$  и механических (H, E и C)

 параметров химического окисла толщиной 150 нм

 в зависимости от температуры отжига в азоте

 Values of the geometrical  $D_S$  and mechanical (H, E and C)

parameters of the chemical oxide with thickness of 150 nm depending on the temperature of annealing in nitrogen

Параметры	Температура отжига $T$ , °C <i>Temperature of annealing T</i> , °C									
Parameters	350 (рис. 2, <i>a</i> ) <i>350 (fig. 2, a)</i>	360 (рис. 2, <i>b</i> ) <i>360 (fig. 2, b)</i>	370 (рис. 2, <i>c</i> ) <i>370 (fig. 2, c)</i>							
Размерность подобия $D_S$ Dimension of similarity $D_S$	1,64 ± 0,05	1,47 ± 0,05	1,65 ± 0,05							
Твердость <i>H</i> , МПа Hardness H, MPa	7977	12106	9506							
Упругость <i>E</i> , ГПа Elasticity E, GPa	122	118	115							
Текучесть <i>С</i> , % <i>Fluidity C</i> , %	1,42	0.45	1,25							

Сравнительный анализ показал, что относительные отличия морфологии, электрофизических и механических свойств ХОП во многом определяются средним значением и геометрией латеральных неоднородностей электростатического потенциала исходной поверхности  $p^+$ -GaAs(100) (рис. 6, *b*), на что указывает корреляция значений их размерностей подобия  $D_S$  (табл. 1). При этом и определенные наноиндентированием механические свойства оксидных пленок (твердость *H*, упругость *E* и текучесть *C*) также во многом связаны с геометрией дробной размерности исходных неоксидированных поверхностей, на что указывают эксперименты по отжигу ХОП и корреляция значений  $D_S$  в этих случаях (рис. 7 и табл. 2).

Таким образом, можно предположить, что исходное состояние поверхности  $p^+$ -GaAs(100), определяемое фрактальной геометрией исходной неоксидированной поверхности во многом определяет механизмы роста нанопленок ХОП и, как следствие, его морфологию, электрофизические и механические свойства. Из этого следует, что для воспроизводимого проведения процессов химического оксидирования необходимо контролировать состояние (электрофизические параметры) исходных неоксидированных поверхностей  $p^+$ -GaAs.

#### Заключение

Результаты АСМ исследования физических механизмов увеличения обратных токов, показателя идеальности и дрейфа емкости варикапов, изготовленных на основе резких  $p^+$ —*n*-переходов GaAs, связаны с неоднородным легированием эпитаксиального  $p^+$ -слоя. Это приводит к возникновению латеральных l = 300...700 нм неоднородностей электростатического потенциала представляющих собой мелкие <0,2 эВ потенциальные ямы в плоскости  $p^+$ —*n*-перехода. Подобного рода неоднородности могут понижать потенциальный барьер для дырок, что приводит к преобладанию дырочной составляющей плотности тока, увеличению токов насыщения и, соответственно, нежелательному увеличению обратных токов.

Кроме этого, расположенные в плоскости  $p^+$ —*n*-перехода мелкие потенциальные ямы могут захватывать и удерживать некоторое время подвижные электроны и дырки. В результате при приложении обратного смещения электроны, попадая в зону проводимости, а дырки в валентную зону, не сразу покидают область пространственного заряда (обратное привело бы к быстрому — десятки наносекунд — увеличению электрического заряда и емкости  $p^+$ —*n*-перехода), а задерживаются на некоторое время в этих неглубоких потенциальных ямах, что и приводит к дрейфу емкости — постепенному ее увеличению в течение  $\Delta t \approx 60$  с.

Физические механизмы появления токов утечки связаны с остаточной проводимостью пленки химического оксида, которая практически полностью исчезает после отжига в атмосфере азота при температуре 300...400 °С. Оптимальная температура отжига определяется толщиной и структурой пленок ХОП. Согласно проведенным исследованиям основные свойства пленок ХОП определяются геометрией дробной (фрактальной) размерности исходных неоксидированных поверхностей GaAs. Поэтому для выбора оптимальных режимов отжига ХОП в целях исключения поверхностных токов утечки необходимо контролировать фрактальную геометрию формы их рельефа, средние значения и геометрию неоднородностей электростатического потенциала. Исходя из вышеизложенного, можно предложить два пути повышения воспроизводимости процессов формирования защитных пленок ХОП: либо подбирать материал с одинаковой геометрией и остальными свойствами исходной поверхности, либо после каждого ростового процесса проводить контроль геометрии и других физических параметров исходных поверхностей и лишь затем, опираясь на результаты контроля, осуществлять коррекцию режимов отжига (температуры и длительности).

Также было получено, что в локальном приближении нанопленки химического оксида поверхности  $p^+$ -GaAs(100) имеют все признаки хаотических систем: свойство топологического смешивания, сильная зависимость свойств от начальных условий и зависимость меры от способа задания и линейных размеров измерительного масштаба. Сравнительный анализ показал, что морфология, электростатический потенциал и механические свойства (твердость, упругость и текучесть) нанопленок химического оксида  $p^+$ -GaAs(100) во многом определяются геометрией дробной размерности исходных неоксидированных поверхностей  $p^+$ -GaAs(100), на что указывает корреляция значений размерностей подобия  $D_S$  в этих случаях. Определенная из аррениусовских зависимостей энергия активации *E<sub>a</sub>* образования ХОП составила ~0,3 эВ.

Авторы выражают благодарность с. н. с. Новикову В. А. за активную помощь в проведении зондовых измерений.

#### Список литературы

1. **Миронов В. Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н. Новгород: Ин-т физики микроструктур, 2004. 114 с.

2. Torkhov N. A., Bozhkov V. G., Ivonin I. V., Novikov V. A. Atomic force microscopy study of the potential distribution over a locally metallized n-GaAs surface // Journal of Surface Investigation. 2009. N. 3 (6). P. 888–896.

3. Торхов Н. А., Никульникова Е. В., Ивонин И. В. Методы атомно-силовой микроскопии для контроля качества  $p^{++}$ -n-GaAs переходов // Мокеровские чтения. 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктур СВЧ-электроники. Москва, МИФИ, 24 мая 2017. С. 128—129.

4. Возмилова Л. Н., Буц Э. В. Способ получения окисного покрытия на полупроводниковых материалах типа A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>. Авт. свидетельство 980565, СССР. 1983.

5. Федер Е. Фракталы / Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.

6. Божков В. Г., Зайцев С. Е. Модель тесного контакта металл—полупроводник с барьером Шоттки // Изв. вузов. Физика. 2005. № 10. С. 77—85.

7. Торхов Н. А., Никульникова Е. В., Филимонова И. Д., Новиков В. А. Наноразмерные свойства химического окисла  $p^+$ -GaAs{100} // Мокеровские чтения. 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктур СВЧ-электроники. Москва, МИФИ, 24 мая 2017. С. 116—117.

8. **Торхов Н. А.** Фрактальность как новое нанотехнологическое направление полупроводникового материаловедения // 24-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Материалы конференции. 8—13 сентября 2014, г. Севастополь, Крым, Россия. С. 663—664. N. A. Torkhov<sup>1,2,3</sup>, Ph. D., Associate Professor, Leading Engineer-Technologist, E-mail: trkf@mail.ru,

E. V. Nikulnikova<sup>1</sup>, Leading Engineer-Technologist, E-mail: nikulnikova\_ev@niipp.ru

<sup>1</sup> Scientific- Research Institute of Semiconductors, Tomsk

<sup>2</sup> Tomsk State University, Russia, Tomsk

<sup>3</sup> Tomsk State University of Control System and Radioelecrtronics, Tomsk 634050, Russian Federation

## Corresponding author:

**Torkhov Nikolay A.,** Ph. D., Associate Professor, Tomsk State University of Control System and Radioelectronics, Tomsk 634050, Russian Federation. E-mail: trkf@mail.ru

# Methods of Afm for $p^+$ —*n*-Junction GaAs Quality Control

Received on July 15, 2017 Accepted on August 28, 2017

The electrostatic potential inhomogeneity, detected due to AFM method and represented by shallow (<0.2 eV) potential wells in GaAs(100) p<sup>+</sup>-n junction plane, lead to a local reduction of the barrier height for the wells and increase of the reverse currents. These potential wells trap the mobile electrons and wells causing a varicap capacitance drift in GaAs. The p<sup>+</sup>-n junction loss currents are defined by the properties of the protective chemical oxide nanofilms, which in a local approximation depend on the relief fractal geometry and the surface potential of the original GaAs surfaces.

Keywords: Gallium arsenide, varicap, sharp  $p^+$ -n-junction, static parameters, capacitance drift, atomic force microscopy, fractal geometry,  $p^+$ -n -junction homogeneity, chemical oxide properties

For citation:

**Torkhov N. A., Nikulnikova E. V.** Methods of AFM for  $p^+$ —*n*-Junction GaAs Quality Control, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 67—78.

DOI: 10.17587/nmst.20.67-78

## Introduction

The electrostatic potential of the surface (surface potential) is one of the basic physical objects allowing us to characterize the electrophysical parameters of the semiconductor devices. Among such controlled parameters are the work function, heterogeneity of the relief and electrostatic potential of the surface, and conductivity. The nondestructive methods of the atomic-force microscopy (AFM) allow us to carry out an effective control of all these parameters on the working semiconductor plates during practically all the intermediate technological operations for manufacturing of the semi-conductor devices [1-3].

Proceeding from the above, in this work with the use of AFM methods the physical mechanisms were investigated of occurrence of the production refuse of the arsenide-gallium (GaAs) varicaps made on the basis of sharp  $p^+$ -n junctions.

# Methodical part

In this work the  $p^+$ -n- $n^+$  GaAs(100) structures were used with a sharp asymmetrical  $p^+$ -n junction and grown by the method of the gas-cycle (gasphase) epitaxy. An epitaxial n layer with thickness of ~11 µm and concentration of the alloying impurity of  $N_D^+ \approx (1,8...2,5) \times 10^{15}$  cm<sup>-3</sup> was grown on a highalloy  $n^+$  substrate of GaAs(100). Then, before growing of  $p^+$  layer a gas-phase etch of the n layer was carried out with the subsequent growing of  $p^+$  layer with thickness of >2.5 µm and concentration of the alloying impurity of  $N_A^+ \approx 5 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>. After the input chemical processing the surface of  $p^+$  layer was covered by a protective layer of SiO<sub>2</sub>, the structure was thinned from the side of the  $n^+$  substrate and an ohmic contact was formed on it by the electrochemical method on the basis of AuGe with the subsequent annealing in the hydrogen atmosphere. After that in SiO<sub>2</sub> windows the ohmic contacts to  $p^+$  layer on the basis of AuZn were formed with the subsequent annealing, SiO<sub>2</sub> film was removed and by a photoresist mask mesa was etched with the depth down to  $n^+$  layer. After that, the open surface of GaAs was covered with a protective layer of the chemically oxidized surface (further - COS) with thickness of 100...150 nm, and it was annealed at 300...400 °C in the nitrogen atmosphere. Application of such films for the protective purposes is explained by the simplicity of their reception and their sufficient efficiency. COS nanofilms of the epitaxial layer of  $p^+$ -GaAs(100) were received by a "fast" (~20 nm/min) method of oxidizing in a boiling solution of iodine-acid potassium [4]. In the end of the technological process a plate was divided into separate crystals and control was carried out of their static parameters.

Measurement of the static volt-ampere characteristics (VAC) and of the capacity-voltage characteristics (CVC) of a sharp asymmetrical  $p^+$ —*n*-GaAs(100) junction of the crystals located on a plate occurred in a manual mode by Agilent B1500 measuring instrument of semi-conductor devices in Cascade Microtech M150 probe station.

The parameters of the initial and chemically oxidized surfaces of  $p^+$ -GaAs(100) were investigated by Solver-HV atomic-force microscope (AFM). The measurement of the relief h(x, y) was done in a semicontact mode of scanning with the resonant frequency of oscillation of a cantilever beam of 430 kHz; the electrostatic potential of the surface - a contact potential difference (CPD)  $-\Delta \phi = \phi_s - \phi_p$  was measured by Calvin method (where  $\phi_s$  – electrostatic potential of the surface, and  $\varphi_p$  – electrostatic potential of the needle point of the cantilever with diameter of  $\sim 30$  nm), the conductivity (flow current) was measured in contact Ipr mode, while the value of interaction of the needle point of the cantilever with the surface (advance/retract curves) — in DFL mode [1]. The advance curve describes the amplitude of DFL signal at the approach of the needle point of the cantilever to the surface, and the retract curve — when the needle point is moved away from the surface.

The mechanical properties of COS were investigated by the methods of nano-identification by means of Tabletop nanoindentation system, manufactured by Instruments Co (Switzerland).

The geometry of the heterogeneities of the surfaces was investigated in the global (at l > L, where l — value of the measuring scale) and local ( $l \le L$ ) approximations with attraction of the fractal geometry of the fractional dimensions  $1 < D_S < 2$ . The fractal dimension was  $D_f = 1 + D_S$ . The values of the dimensions of similarity  $D_S$  of the investigated surfaces were determined by the method of tracing of the defined heterogeneities in the plane of  $(x, y) p^+$ -n junction by calculation of the number of N of the received non-intersecting contours of filling (a condition of topological mixing) depending on variation of the linear scale l in k times [5].

$$D_S = \ln(N) / \ln(k). \tag{1}$$

For research of the uniformity of  $p^+$ -*n* junction  $p^+$  layer was etched down to the thickness of <20 nm.

# **Experimental part**

According to the results, the direct  $I_f(U_f)$  and the reverse  $I_r(U_r)$  static VAC differ from those close to the optimal ones with  $\varphi_{bm,1} = 1.11$  eV (fig.1, *a*, section *I* of the straight line of VAC). The basic deviations are formed by sections 2 and 3 on the straight line of VAC. Section 2 is, most likely, determined by a normal distribution of the heterogeneities of the measured height of the barrier  $\varphi_{bm,2} = 0.96...1.11$  eV on the area of  $p^+$  junction, which is accompanied by an undesirable increase of the reverse currents  $I_r(U_r)$ . Presence of section 3 on straight line of VAC is usually connected with the

surface leakage currents arising in this case due to insufficient drying of the protective film of the chemical oxide. Annealing of crystals at 300...400 °C in nitrogen atmosphere usually led to disappearance or reduction of the leakage currents, and, as we will demonstrate further, to a simultaneous variation of the other properties of COS.

Deviations in behavior of CVC are characterized by the presence of a drift of the capacity  $C(U_r = -25 \text{ V})$ (fig. 1, b) shown in a gradual increase of its values with the subsequent exponential outcome of saturation. Interesting, that irrespective of  $U_r$  the time dependences of capacities  $C(U_r, t)$  come to saturation after practically identical time interval  $\Delta t = 60$  s from the moment of application of  $U_r$ . At that, the more is the reverse displacement of  $U_r$ , the bigger is coefficient K(%) in relation to the increase of  $C(U_r)$ :  $K(U_r = 0) = (C(U_r, t = 60 \text{ s}) - C(U_r, t = 0))/C(U_r, t = 0)*100\% = 0.001\%,$  $K(U_r = -5 \text{ V}) = 0.24\%, K(U_r = -15 \text{ V}) = 0.6\%,$  $K(U_r = -25 \text{ V}) = 0.83, K(U_r = -50 \text{ V}) = 1.16\%,$  $K(U_r = -70 \text{ V}) = 1.28\%.$ 

In order to reveal the physical reasons for the observable deviation of section 2 of the straight line of VAC (fig. 1, *a*) from a preliminary broken off part of the plate, the  $p^+$  epitaxial layer of GaAs was etched down to the thickness which did not exceed 20 nm. The results of AFM measurements of the relief of the received surface (fig. 2, *a*, see the 3-rd side of the cover) demonstrated presence of appreciable (up to 0.2 eV) and with length of *l* local heterogeneities of  $\triangle CPD$ electrostatic potential of the surface, which were smaller (fig. 2, b, black contour and arrow), and bigger (fig. 2, b, white contour and arrow) than the average values of the  $\langle CPD \rangle$  surface. Theoretical researches demonstrated, that similar heterogeneities can be caused by a non-uniform doping of the epitaxial  $p^+$  layer. Indeed, for  $N_A^+ < 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  the extent of the area of spatial charge (ASC) does not exceed 10 nm which is commensurable with the residual thickness of the  $p^+$  layer. In this case there is a probability, that such heterogeneities of the electrostatic potential of ASC will come out to the surface, forming local heterogeneities there, which we observe during the measurements (fig. 2, b, see the 3-rd side of the cover).

According to fig. 3, *a*, of the energy diagram, great values of CPD of the lateral heterogeneities correspond to a deeper position of Fermi level in  $p^+$  area of  $qV_{p,2} > qV_{p,1}$  (fig. 2, *b*). This leads to the fact that the effective (measured  $\varphi_{bm} \sim \varphi_{bp}$  [6]) heights of the barriers for the holes are smaller than  $\varphi_{bm,2} < \varphi_{bm,1}$ , while the true ones defined by Fermis level for the electrons  $\varphi_b \approx \varphi_{bn}$  in section 1 of the straight line of VAC, are bigger  $\varphi_{b,2} > \varphi_{b,1}$  (see fig. 1, *a*). In this connection in section *I* of the current will prevail, and in section 2 — the hole one. In this case a lower effective height of the barrier will be determined by the position of the level of

Fermi  $E_{Fp}$  for the holes (fig. 3, *a*). This is also confirmed by the fact that the difference of the true heights of the barriers of sections of *1* and *2* straight lines of VAC practically corresponds to the heterogeneities of  $\Delta$ CPD  $\approx 0.2$  eV (fig. 2, *b*). Prevalence of the hole component of the current in section *2* leads to an increase of the currents of recombination (see fig. 1, *a*) and correspondingly, to an increase of the saturation currents  $J_{S2} > J_{S1}$ . The value of the ideal index close to 2 in section 2 of the straight lines of VAC of  $n_2 = 1.85 \approx 2$  also points to a big contribution of the hole (recombinated) component of the current.

Thus, we see that the increase of the uniformity of doping of  $p^+$  layer will promote reduction of the quantity, dimensions and CPD of the lateral heterogeneities of the electrostatic potential in the area of  $p^+$ -n junction and increase of its uniformity. This, in turn, will lead to reduction of the saturation currents in the row of  $J_{S2} \rightarrow J_{S1}$  and general reduction of the reverse currents (see fig. 1, dotted curved lines, points  $A \rightarrow B \rightarrow C$ ).

Besides the local variations of the barrier heights of  $p^+$ -*n* junction, the observed lateral heterogeneities of  $\Delta$ CPD, both for the electrons (see fig. 2, b, black contour and arrow) and for the holes (see fig. 2, b, white *contour and arrow*) can be shallow  $\Delta \phi_s < 0.2$  eV potential wells with the average linear sizes of  $\langle l \rangle = 200...700$  nm. As a result, when the reverse displacement is applied, the electrons from the donor levels of  $DL_D$ , getting into the conductivity zone (and the holes from the acceptor levels of  $DL_A$  — into the valency zone) do not leave ASC at once, which would lead to a fast increase of its electric charge and capacity of the  $p^+$ -n junction, but stay for some time in these potential wells (fig. 3, b,  $\Delta \varphi_{\rm s}$ ). An additional research of the electrostatic potential on the chip of the  $p^+$ -*n* junction confirmed the presence of the potential wells in the plane of the  $p^+$ -*n* junction for the electrons (see fig. 2, c, black arrows) and for the holes (see fig. 2, c, white arrows). Thus it is possible to assume that it is exactly the delay of the electrons and holes in the situated on the border of the  $p^+$ -*n* junction shallow potential wells of  $\Delta \phi_s \le 0.2 \text{ eV}$  is the reason for the observed drift of the capacity during  $\Delta t \approx 60$  s. Because of the prevalence of the hole component in the current, the major role in the drift will be played by the holes.

The measurements done by *Ipr* method of the spreading currents of the oxidized surface of  $p^+$ -GaAs allowed us to determine the physical values of the observed deviation in section 3 of the straight line of VAC (see fig. 1, *a*). According to the results, the COS films have a friable structure preserving a certain quantity of the oxidizing solution not only inside the film, but also on its surface in the form of a nanometer adsorption layer. The presence of such a layer is confirmed by the direct measurements of the curves of advance 1 (fig. 4, *b*, DFL-1, see the 3-rd side of the cover) and retract 2 (fig. 4, *b*, DFL-2) of the cantilever to COS surface di-

rectly after its formation. It is well visible, that in case of application of an external force for the retract of the cantilever, its edge does not change its co-ordinates at once (sticks), therefore, on the curve of retract 2 a "tooth" of  $\Delta I$  appears, caused by Van der Waals forces of attraction between the needle point of the cantilever and the thin adsorption layer. In this case it is possible to talk about the hydrophilic properties of the COS surface. Generally by  $\Delta I$  it is possible to measure the basic quantitative characteristics of the adsorption layers: thickness, viscosity and force of interaction. Thus, DFL method of AFM can be used for a quantitative determination of the basic properties of the adsorption layers and the degree of hydrophilicity of the semi-conductor surfaces.

The measurements done by Ipr method of the spreading currents demonstrated the presence of nonlinear VAC between the nanometer needle point of the cantilever and the not dried enough COS surface (fig. 4, c, curves 1 and 2, see the 3-rd side of the cover). Fig. 4, a presents the points presented in fig. 4, b 1 and 2, in which VAC of the cantilever were taken. It is well visible, that the nanopores 1 have better conductivity, than separate grains 2 (fig. 4, a and fig. 4, c, curves 1 and 2, accordingly).

Annealing of the plate leads to evaporation of the remains of the oxidizing solution, therefore, the thin adsorption layer also disappears from the COS surface. This, in particular, is proved by the absence of the "tooth" on curves of advance 3 and retract 4 (fig. 4, b, DFL-2). Measurement of VAC by *Ipr* method on the COS surface demonstrated practically a complete absence of the spreading currents (fig. 4, c curve 3). Then it is proved that annealing at 350...400 °C leads to a change of the other properties of COS.

Despite the old history of the use of the COS films, many of their properties have not been studied enough. Among such insufficiently studied COS properties are energy of activation for formation of  $E_a$ , morphology (surface relief h(x, y)), the electrophysical (conductivity, surface potential  $\varphi_s$ ) and mechanical properties (hardness *H*, elasticity *E* and fluidity *C*) [7].

The time dependences of the thickness of the chemical oxide are well approximated by the exponential dependences and practically come to saturation after 6 minutes of oxidation of the surface of  $p^+$ -GaAs(100). An estimation of the energy of activation for formation of the chemical oxide on the surface of  $p^+$ -GaAs(100) with the use of Arrhenius equation gave the value of  $E_a \approx 0.3$  eV.

Measurement of the relief of the surface of the COS films in the global approximation at l > L demonstrated, that the average values of the histograms of distribution of roughnesses of the relief  $\langle h \rangle$  submit to the known classical laws. From fig. 5, *a* it is visible, that the reduction of *l* leads to a reduction of the dispersion and increase of the accuracy of measurement. At that,

the average values of  $\langle h \rangle$  remain constant and do not depend on the method of measurement (fig. 5, *a*, *marked by the arrow*).

In the local approximation at  $l \leq L$ , as it was specified in [5, 7], the average  $\langle h \rangle$  will depend both on the sizes of the measuring scale of *l*, and on the method of measurement, i.e. on how l was received. If the reduction of l = a/N was achieved by the reduction of the dimensions of  $a \times b$  (a = b,  $a_1 = 100 \mu m$ ,  $a_2 = 50 \mu m$ ,  $a_3 = 30 \ \mu\text{m}, a_4 = 10 \ \mu\text{m} \text{ and } a_5 = 3 \ \mu\text{m}) \text{ of the scanning}$ window at the constant number of the points of scanning was N = const (N = 256), then a reduction of the average  $\langle h \rangle$  was observed (fig. 5, b, marked by arrows). If the reduction of l = a/N was achieved due to an increase of the points of scanning N = 64, 128, 256, 512and 1024 at the constant linear dimensions of the window a = b = const, then an increase of the average  $\langle h \rangle$ was observed (data not available). According to [5], this is one more sign of the chaotic systems. Research demonstrated that COS films satisfy also to the other signs of the chaotic systems: strong dependence of the state of a system on the initial conditions and properties of the topological mixing. In [8] it is shown, that for an unequivocal description of the objects of the semiconductor electronics in a local approximation it is necessary to use the mathematical apparatus of the fractal geometry of the fractional dimensions.

A comparative analysis demonstrates, that the relative differences of the morphology, electrophysical and mechanical properties of COS are determined by the average value and geometry of the lateral heterogeneities of the electrostatic potential of the initial surface  $p^+$ -GaAs(100) (fig. 6, *b*), to which the correlation of their dimensions of similarity  $D_S$  (table 1) points. At that, the mechanical properties of the oxide films (hardness *H*, elasticity *E* and fluidity *C*) determined by nano-identification are also in many respects connected with the geometry of the fractional dimension of the initial non-oxidized surfaces, to which the experiments on annealing of COS and the correlation of values of  $D_S$  in these cases (fig. 7 and table 2) point.

Thus it is possible to assume, that the initial state of  $p^+$ -GaAs(100) surface determined by the fractal geometry of the initial non-oxidized surface in many respects defines the growth mechanisms of the COS nanofilms and, as a consequence, the morphology, the electrophysical and mechanical properties. From this it follows, that the reproducible processes of the chemical oxidation require control of the state (the electrophysical parameters) of the initial unoxidized surfaces of  $p^+$ -GaAs.

# Conclusion

The results of the AFM research of the physical mechanisms of the increase of the reverse currents, in-

dicator of ideality and drift of the capacity of the varicaps, made on the basis of sharp  $p^+-n$  junctions of GaAs, are connected with the non-uniform doping of the epitaxial  $p^+$  layer. This leads to occurrence of the lateral l = 300...700 nm heterogeneities of the electrostatic potential representing small <0.2 eV potential wells in the plane of  $p^+-n$  junction. Such heterogeneities can lower the potential barrier for the holes, which leads to prevalence of the hole component in the density of the current, increase of the currents of saturation and, accordingly, an undesirable increase of the reverse currents.

Besides, the small potential holes located in the plane of  $p^+$ —n junction can grasp and hold for some time the mobile electrons and holes. As a result, when a reverse displacement is applied, the electrons, which come to the zone of conductivity, and the holes, which come to the valency zone, do not leave the area of the spatial charge at once (otherwise it would lead to a fast, tens of nanoseconds, increase of the electric charge and capacity of  $p^+$ —n junction), but stay for some time in the potential wells, which leads to the capacity drift, to its gradual increase during  $\Delta t \approx 60$  s.

The physical mechanisms of occurrence of the leakage currents are connected with the residual conductivity of the chemical oxide film, which disappears practically completely after annealing in the nitrogen atmosphere at 300...400 °C. The optimal temperature of annealing is determined by the thickness and structure of the COS films. According to the undertaken research, the basic properties of the COS films are determined by the geometry of the fractional dimensions of the initial unoxidized surfaces of GaAs. Therefore, for selection of the optimal modes for annealing of COS with a view to eliminate the surface leakage currents, it is necessary to control the fractal geometry of their relief, the average values and the geometry of the heterogeneities of the electrostatic potential. Proceeding from the above, it is possible to suggest two ways for increasing of the reproducibility of formation of the COS protective films: either select a material with the identical geometry and other properties of the initial surface, or after every the growth process implement control of the geometry and other physical parameters of the initial surfaces and then, on the basis of the results of the control, correct the modes of annealing (the temperature and duration).

It was also revealed, that in the local approximation the nanofilms of the chemical oxide of  $p^+$ -GaAs(100) surface have all the signs of the chaotic systems: the property of topological mixing, strong dependence of the properties on the initial conditions and dependence of a measure on the method of setting the task and the linear sizes of the measuring scale. The analysis demonstrated, that the morphology, the electrostatic potential and the mechanical properties (hardness, elasticity and fluidity) of the nanofilms of  $p^+$ -GaAs(100) oxide were in many respects determined by the geometry of the fractional dimension of the initial unoxidized surfaces of  $p^+$ -GaAs(100), to which correlation of the dimensions of similarity of  $D_S$  pointed in these cases. The energy of activation of  $E_a$  for formation of COS determined from the arrhenius dependences was equal to ~0.3 eV.

The authors express their gratitude to Novikov V. A for his active assistance in making of the probe measurements.

#### References

1. **Mironov V. L.** Osnovy skaniruyushhej zondovoj mikroskopii. N. Novgorod, In-t fiziki mikrostruktur, 2004 (in Russian).

2. Torkhov N. A., Bozhkov V. G., Ivonin I. V., Novikov V. A. Atomic force microscopy study of the potential distribution over a locally metallized *n*-GaAs surface, *Journal of Surface Investigation*, 2009, v. 6, no. 3, pp. 888–896.

3. Torkhov N. A., Nikul'nikova E. V., Ivonin I. V. Metody atomno-silovoj mikroskopii dlya kontrolya kachestva  $p^{++}$ —*n*-GaAs

perexodov, Mokerovskie chteniya, 8-th Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya po fizike i tekhnologii nanogeterostruktur SVCh-e'lektroniki, Moskva, MIFI, 24 maya, 2017, pp. 128–129.

4. Vozmilova L. N., Buc E. V. Sposob polucheniya okisnogo pokrytiya na poluprovodnikovykh materialakh tipa  $A_3B_5$ . Avtorskoe svidetel'stvo 980565, SSSR, 1983 (in Russian).

5. Feder E. Fraktaly. Moscow, Mir, 1991 (in Russian).

6. **Bozhkov V. G., Zajcev S. E.** Model' tesnogo kontakta metall-poluprovodnik s bar'erom Shottki, *Izv. vuzov. Fizika*, 2005, no. 10, pp. 77–85 (in Russian).

7. Torkhov N. A., Nikul'nikova E. V., Filimonova I. D., Novikov A. V. Nanorazmernye svojstva khimicheskogo okisla p<sup>+</sup>-GaAs{100}. *Mokerovskie chteniya, 8-th* Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya po fizike i tekhnologii nanogeterostruktur SVCh-e'lektroniki, Moscow, MIFI, 24 maya, 2017, pp. 116–117 (in Russian).

8. Torkhov N. A. Fraktal'nost' kak novoe nanotexnologicheskoe napravlenie poluprovodnikovogo materialovedeniya, 24-th Mezhdunarodnaya Krymskaya konferenciya "SVCh-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii". Materialy konferencii, 8–13 sentyabrya 2014 g. Sevastopol', Krym, Russia, pp. 663–664 (in Russian).

УДК:53.043:53.086:53.09:538.9

DOI: 10.17587/nmst.20.78-86

**О. Е. Глухова**, д-р физ.-мат. наук, проф., **Д. С. Шмыгин**, аспирант, e-mail: shmygin.dmitriy@gmail.com, ФГБОУ ВО "Саратовский национальный исследовательский государственный у

ФГБОУ ВО "Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского"

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ГРАФЕН-НАНОТРУБНЫХ ПЛЕНОК: НОВАЯ УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРОПУСКАНИЯ

Поступила в редакцию 07.07.2017

Представляется новая универсальная методика расчета функции пропускания и электропроводности 2D-материалов, суперячейка которых насчитывает сотни и тысячи атомов. С помощью этой методики исследованы проводящие свойства композитной пленки, представляющей собой подобие колонного графена — два слоя графена и бесшовно соединенные с ними вертикально ориентированные углеродные нанотрубки.

**Ключевые слова:** 2D-материалы, углеродные композиты, функция пропускания, электронные свойства, метод неравновесных функций Грина, квантовый транспорт, когерентный транспорт

# Введение

Развитие технологий синтеза графеновых наноматериалов привело к расширению сферы их применения. Одним из графеновых композитов, активно исследуемых в последние несколько лет, является колонный графен [1]. Он представляет собой графеновые слои, соединенные бесшовно углеродными одностенными нанотрубками. Одним из достоинств этого материала является его высокая прочность и устойчивость к механическим нагрузкам. В сочетании с высокой электрической емкостью и эффективным электронным переносом между графеновыми листами этот наноматериал уже признан перспективным в качестве электрода аккумуляторных батарей и суперкондесаторов [2—4]. При этом остается много вопросов о проводящих свойствах колонного графена, зависимости их от длины и диаметра нанотрубок. На данный момент экспериментальных данных о проводимости колонного графена нет, поэтому теоретическое прогнозирование закономерностей электрической проводимости является крайне актуальным. Однако расчет электропроводности колонного графена квантово-механическими методами затрудняется в связи с многоатомностью его суперячейки.

## Метод моделирования

Для расчета электропроводности нами применялся аппарат функций Грина — Келдыша и формализм Ландауэра — Буттикера [5]. Расчет энергии и зонной структуры проводился методом функционала плотности в приближении сильной связи [5] с самосогласованным вычислением зарядовой плотности (SCC-DFTB) [7, 8] в рамках программного пакета Kvazar [9]; использовалась параметризация pbc-0-3 [10, 11]. Электрическая проводимость описывается выражением

$$G = \frac{I}{V} = \frac{e^2}{h} \int_{-\infty}^{\infty} T(E) F_T(E - \mu) dE, \qquad (1)$$

где T(E) — функция пропускания, характеризующая квантово-механическую прозрачность проводящего канала в зависимости от энергии движущегося по нему электрона;  $\mu$  — энергия Ферми материала электродов, к которым подсоединен исследуемый объект; e — заряд электрона; h постоянная Планка. Функция теплового уширения  $F_T(E)$  рассчитывается по формуле

$$F_T(E) = \frac{1}{4k_b T} \operatorname{sech}^2 \frac{E}{2k_b T},$$
(2)

где  $k_b$  — постоянная Больцмана; T — температура. Функция пропускания определяется выражением

$$T(E) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \operatorname{Tr}(\Gamma_{S}(E) G_{C}^{A}(E) \Gamma_{D}(E) G_{C}^{R}(E)), \quad (3)$$

где  $G_C^A(E)$ ,  $G_C^R(E)$  — опережающая и запаздывающая матрицы Грина (описывающие контакт с

электродами);  $\Gamma_{S}(E)$ ,  $\Gamma_{D}(E)$  — матрицы уширения уровней для истока и стока. Функция Т(Е) отыскивается суммированием по всей зоне Бриллюэна (ЗБ); *N* — число точек в обратном пространстве. Точность расчета T(E) определяется разбиением обратного пространства. Оно будет эффективным, когда с уменьшением шага изменения волнового числа k функция T(E) не меняется. Например, для 3Б в виде конечного отрезка (a, b) функция T(E)сходится к своему истинному виду при  $N \ge 10^3$ . Для материалов, у которых ячейка содержит порядка нескольких сотен атомов и тысячи атомов, расчет в одной точке, т. е. функции T(E) для фиксированного k, занимает достаточно большое время, таким образом, проведение 10<sup>3</sup> вычислений становится невозможным. Например, для ячейки 2D-кристалла с 472 атомами расчет функции пропускания, усредненной по 288 точкам обратного пространства, занимает почти четверо суток на при параллельном расчете в 24 процесса на процессорах. Если ЗБ является не отрезком, а двумерной/трехмерной фигурой, число *N* возрастает на порядки.

Продемонстрируем разработанную методику расчета T(E) при малом N на примере монослоя графена. На рис. 1, *а* показана расчетная область, т. е. элементарная ячейка, подсоединенная к электродам. Поскольку рассчитывается проводимость данного материала (графена), то в качестве электродов выступают такие же ячейки. Ячейки, являющиеся электродами, транслируются на бесконечность вдоль направления Y, а вдоль X являются полубесконечными. Центральная ячейка также транслируется на бесконечность по Y. Таким образом, волновое число  $k_y$  меняется в пределах ( $-\pi/a_y$ ;  $\pi/a_y$ ), где  $a_y$  — размер элементарной ячейки вдоль направления Y (как показано на рис. 1, *a*). Рассчитанные функции T(E) по формулам (1)—(3) с раз-



**Fuc. 1. 1 рафен:** a -схематичное изооражение яченки графена и электродов; b -функция пропускания графена (ступенчатая – для шага dk = 0,0015 1/Å) *Fig. 1. Graphene:* a -*schematic image of a graphene cell and the electrodes;* b -*transmission function of graphene (step – for the step of* dk = 0.1 1/Å, the continuous curve – for the step of dk = 0.0015 1/Å)



**Рис. 2. Функция пропускания:** a — графики T(E) для разных  $k_y$ ; b — распределение точек функции пропускания для разных энергий и величин  $k_y$  при фиксированном значении T(E) = 2

Fig. 2. Transmission function: a - diagrams T(E) for different  $k_y$ ;  $b - distribution of the points of the transmission function for different energies and values of <math>k_y$  at the fixed value of T(E) = 2

личным числом точек N приведены на рис. 1, b. Для малого шага разбиения dk = 0,1 1/Å (N = 15) функция имеет ступенчатый вид, при уменьшении шага до 0,0015 1/Å (N = 984) кривая принимает правильный вид, хорошо известный для монослоя графена. Функция пропускания представлена в квантах проводимости  $e^2/h$ .

Для устранения ступенчатого вида нами проводится интерполяция функции T(E) между двумя соседними точками обратного пространства. На рис. 2, а показаны ступенчатые графики Т(Е) для трех разных чисел  $k_v$ . В целом, независимо от  $k_v$ для осуществления интерполяции у каждой точки ломаной линии определяются ближайшие по энергии точки, имеющие то же самое значение функции T(E) и принадлежащие соседним ломаным. Картина распределения точек при этом имеет вид, показанный на рис. 2, b, когда зафиксировано одно значение T(E) = 2. Таким образом находятся сначала все точки соседних ломаных, имеющие одинаковое значение T(E), а потом по разности энергий выбираются ближние. Если у ломаной линии есть две соседних, то у каждой точки этой ломаной может быть не более одной ближней точки на каждую из них. Аналогично в случае единственной соседней ломаной будет не более одной ближней точки для каждой точки на рассматриваемой ломаной. Если функция пропускания испытывает не единичный скачок, то добавляются дополнительные точки. Например, если для некоторого значения  $k_v$  функция пропускания испытывает скачок при переходе от точки с энергией  $E_i$  к точке с энергией  $E_{i+1}$ , причем  $T_{i+1} - T_i = 2$ , то на эту ломаную будет добавлена дополнительная точка. Эта точка характеризуются значением энергии  $0,5(E_{i+1} + E_i)$  и функция пропускания в этой точке равна T<sub>i</sub> + 1. Это необходимо для того, чтобы

можно было найти ближайшую точку со значением функции пропускания  $T_i + 1$ .

Далее найденные ближайшие точки используются для добавления между ними дополнительных точек, лежащих на отрезке, соединяющим эти точки. Все дополнительные точки имеют то же самое значение T(E), что и ближайшие точки. Число добавленных точек зависит от длины отрезка, соединяющего ближайшие точки на разных ломаных. Чем больше длина отрезка, тем больше дополнительных точек добавляется. Исходные точки и добавленные используются для построения интерполирующей функции. Интерполирующая двумерная функция  $T_1(E, k_v)$  позволяет реализовать частое разбиение по k, обеспечивая сглаживание первоначальных ступенек. На рис. 3, а представлены карты функции пропускания T(E): сверху до проведения процедуры интерполирования; внизу — после применения построенной интерполирующей функции  $T_1(E, k_v)$ . Ступенчатый характер поведения функции T(E) исчез повсюду, кроме области вблизи уровня 0 эВ — уровня Ферми. Действительно, могут существовать "особые области", для которых изначальное разбиение по k<sub>v</sub> было слишком грубым. Для них дополнительно проводятся расчеты с более частным разбиением, но уже в узком диапазоне величин: для  $k_v$  — от 0 до 0,2 1/Å; для E — от -0,3 до 0,3 эВ. Следующим шагом строится новая интерполирующая функция  $T_2(E, k_v)$ . На рис. 3, b можно видеть карту функции пропускания после применения  $T_2(E, k_v)$ , а на рис. 3, c усредненную по всем  $k_v$  функцию T(E). Сплошная кривая показывает расчет при разбиении 0,0015 1/Å, пунктирная — результат применения разработанной методики. Погрешность составляет 0,52 %. Надо также отметить, что время, затраченное на получение усредненных функций про-



**Рис. 3.** Эволюция функции пропускания графена: a – карта функции пропускания для первоначального разбиения по  $k_y$  (сверху) и после применения интерполирующей функции  $T_1(E, k_y)$ ; b – карта функции пропускания после применения интерполирующей функции  $T_2(E, k_y)$ ; c – функция пропускания при усреднении по всем  $k_y$ 

Fig. 3. Evolution of the transmission function of graphene: a - map of the transmission function for the initial partitioning by  $k_y$  (above) and after application of the interpolation function  $T_1(E, k_y)$ ; b - map of the transmission function after application of the interpolation function  $T_2(E, k_y)$ ; c - transmission function in case of averaging by all  $k_y$ 

пускания, различается: 75 мин на точный расчет и 15 мин на получение конечных значений интерполированного графика. Отметим, что в целом время, затраченное на добавление точек, зависит от объема входных данных, а не от числа атомов рассматриваемой структуры. То есть ускорение может быть любым — чем больше структура, тем большая разница по времени может быть достигнута.

# Результаты

С помощью разработанной методики расчета функции пропускания были исследованы функции пропускания и электрическая проводимость 2D-композитов графен/УНТ. Исследуемая пленка моделировалась двумя слоями графена, соединяемыми однослойными трубками типа armchair (9,9) диаметром 1,23 нм (трубки диаметра 1...1,5 нм типичны для подобных композитных материалов). Расстояние между трубками составляло 2,1 нм, длина трубок (т. е. расстояние между слоями графена) варьировалась от 1,1 до 2,4 нм. На рис. 4, *а* представлена атомная структура пленки колонного графена при расстоянии между трубками 2,1 нм. Трубки соединяются с графеном бесшовно — УНТ плавно переходит в графеновый лист, а место соединения содержит не только гексагоны, но и дефекты в виде 5-, 7- и 8-угольников. Для расчета электрической проводимости в направлении X и Y, как и в случае графенового монослоя, выделяется центральная суперячейка и суперячейки электродов (рис. 4, b). Схема расчета проводимости на рисунке слева соответствует электронному транспорту вдоль X (вдоль края zigzag), на рисунке справа вдоль Y (вдоль края armchair). Суперячейка в этом случае насчитывает 580 атомов при расстоянии между графеновым слоями 2,4 нм. Из-за большого числа атомов проводимость была рассчитана с применением разработанной методики. Зависимости от энергии функций T(E), усредненных по всем k, в случае электронного транспорта в направлении *X* и *Y*, представлены на рис. 4, *c*.

Аналогично были рассчитаны функции пропускания T(E) для всех моделей суперячеек композита на базе (9,9) при одном и том же расстоянии между трубками 2,1 нм. На основе рассчитанных T(E)вычислены проводимость и сопротивление пленки колонного графена. В таблице приведены соответствующие данные: длина трубки, число атомов в транслируемой ячейке, рассчитанный уровень Ферми, проводимость и сопротивление. Уровень Ферми, как видно из таблицы, находится в интервале (-4,88; -4,73), т. е. он сдвигается вниз по



**Рис. 4. 2D-композит колонного графена на базе УНТ (9,9) длиной 2,4 нм:** *а* – атомная структура; *b* – схематичное изображение ячейки композита и электродов при электронном транспорте вдоль *X* (слева) и вдоль *Y* (справа); *с* – функции проводимости вдоль направления вдоль *X* (слева) и вдоль *X* (слева) и вдоль *Y* (справа)

Fig. 4. 2D composite of the pillared graphene on the basis of CNT (9.9) with the length of 2.4 nm: a - atom structure; b - schematic image of a cell of the composite and the electrodes at the electron transport lengthways of X (left) and lengthways of Y (right); c - functions of conductivity along the direction of X (left) and along Y (right)

Данные об исследуемых композитных пленках и результаты моделирования

Data concerning the investigated composite films and the results of modeling

Длина трубки, нм <i>Length of</i> <i>a tube,</i> <i>nm</i>	Число атомов в супер- ячейке композита Number of atoms in a composite supercell	Направ- ление транс- ляции Direction of trans- lation	Энер- гия Ферми, эВ Fermi energy, eV	Прово- димость, мкСм <i>Conduc-</i> <i>tivity,</i> <i>µS</i>	Сопро- тивле- ние, кОм <i>Resis-</i> <i>tance</i> , <i>k</i> Ω
0,60	400	X Y	-4,74	135,93 11,03	7,35 90,65
0,85	436	X Y	-4,88	32,48 8,32	30,79 120,12
1,10	472	X Y	-4,85	92,21 24,89	10,85 40,18
1,34	508	X Y	-4,73	142,96 10,41	6,99 96,05
1,59	544	X Y	-4,85	72,26 13,19	13,65 75,78
1,84	1,84 580		-4,81	122,08 19,8	8,19 50,5

сравнению с идеальными УНТ того же диаметра (-4,66 эВ). Проводимость и сопротивление ведут себя немонотонно. Можно сказать, что в направлении *Y* сопротивление колеблется около 12 кОм, а в направлении *X* — около 90 кОм, только с большей амплитудой.

## Заключение

Создана новая универсальная методика расчета функции пропускания электронов и электрической проводимости при квантовом транспорте в композитных наноматериалах, которая позволяет исследовать электрофизические свойства для атомных структур с сотнями и тысячами атомов в транслируемой суперячейке. Апробация новой методики на примере монослоя графена показала, что погрешность составляет 0,52 % и позволяет значительно уменьшить время расчета функции пропускания.

Рассчитанные электрическая проводимость и сопротивление пленки колонного графена в направления агтсhair и zigzag графенового листа показывают, что протекания тока вдоль zigzag-края (рис. 4, b) более предпочтительно. В этом направлении сопротивление меняется незначительно и можно сказать, не зависит от расстояния между графеновыми слоями (т. е. от длины трубки). Среднее значение сопротивления составляет 12 кОм,

что близко к значению сопротивления идеальной нанотрубки. Это можно объяснить высокой электропроводностью графеновых нанолент с краем zigzag, проводимость которых не зависит от ширины ленты и слабо зависит от ее топологии.

В направлении armchair-края графенового листа электропроводность заметно зависит от топологии пленки. Как видно из таблицы, сопротивление сильно меняется с увеличением длины УНТ. Применяя аналогию с графеновыми нанолентами, можно заметить, что закономерности электронного транспорта вдоль края armchair определяются шириной ленты и ее морфологией.

В целом можно прийти к важному выводу, что пленки колонного графена с нанотрубками диаметром 1,23 нм характеризуются сравнительно высокой электрической проводимостью. В связи с высокой прочностью и проводимостью они могут с успехом применяться в электронных устройствах и в качестве электродов аккумуляторных батарей, обладая развитой поверхностью и порами для наполнения необходимыми соединениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-офи\_м № 15-29-01025.

#### Список литературы

1. **Sasaki R., Shintani K.** Hardness of Pillared-Graphene Nanostructures via Indentation Simulation // MRS Advances 2017. Vol. 2, N. 1. P. 45–50.

2. Jiang L., Sheng L., Long C., et al. Functional Pillared Graphene Frameworks for Ultrahigh Volumetric Performance Supercapacitors // Advanced Energy Materials. 2015. Vol. 5, N. 15. 1500771. P. 1–9.

3. Lin J., Zhong J., Bao D., Reiber-Kyle J., et al. Supercapacitors based on pillared graphene nanostructures // J. Nanosci. Nanotechnol. 2012. Vol. 12, N. 3. P. 1770–1775.

4. **Wang Q., Dong Z., Qu L.,** et al. Densely stacked bubblepillared graphene blocks for high volumetric performance supercapacitors // Energy Storage Materials. 2015. Vol. 1. P. 42–50.

5. Глухова О. Е., Жничков Р. Ю., Слепченков М. М. Программный комплекс для наноэлектроники // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 1. С. 5—11.

6. **Datta S.** Quantum Transport: Atom to Transistor. Cambridge University Press. Cambridge, 2005.

7. Elstner M., Porezag D., Jungnickel G., et al. Self-consistent-charge density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties // Phys Rev B. 1998. Vol. 58. P. 7260–7268.

8. **Pecchia A., Penazzi G., Salvucci L., Di Carlo A.** Nonequilibrium Greens functions in density functional tight binding: method and applications // New Journal of Physics. 2008. Vol. 10, N. 065022. P. 1–17.

9. **Open** multiprocessor software complex of molecular modeling "KVAZAR". URL: http://nanokvazar.ru/

10. Koehler C., Seifert G., Frauenheim Th. Density functional based caculations for Fe\_n ( $n \le 32$ ) // Chem. Phys. 2005. Vol. 309. P. 23-31.

11. **Aradi B., Hourahine, B., Frauenheim T.** DFTB+, a sparse matrix-based implementation of the DFTB method // The Journal of Phys. Chem. A. 2007. Vol. 111. P. 5678–5684.

**O. E. Glukhova**, Dr. Sci., Professor, **D. S. Shmygin**, Graduate Student, shmygin.dmitriy@gmail.com, Saratov State University, 410012, Saratov, Russian Federation,

*Corresponding author:* **Shmygin Dmitriy S.,** Graduate Student, Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation, e-mail: shmygin.dmitriy@gmail.com

# Regularities of Electrical Conductivity of Graphene-CNT Films: a New Universal Technique for Transmission Function Calculating

Received on July 07, 2017 Accepted on August 09, 2017

This paper presents a new universal technique for calculation of the transmission function and electric conductivity of 2D materials, the supercells of which contain hundreds and thousands of atoms. The technique was used to study the conducting properties of the composite film, a kind of a pillared graphene, — two layers of graphene and vertically oriented carbon nanotubes, seamlessly connected with them.

**Keywords:** 2D-materials, carbon composites, transmission function, electronic properties, non-equilibrium Green's function method, quantum transport, coherent transport

For citation:

**Glukhova O. E.**, **Shmygin D. S.** Regularities of Electrical Conductivity of Graphene-CNT Films: a New Universal Technique for Transmission Function Calculating, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 78–86.

DOI: 10.17587/nmst.20.78-86

## Introduction

Development of the technologies of synthesis of the graphene nanomaterials led to expansion of the sphere of their application. One of the recently investigated graphene composites is the pillared graphene [1]. It represents graphene layers seamlessly connected by one-wall carbon nanotubes. One of the advantages of the material is its high durability and resistance to mechanical loads. In combination with a high electric capacity and effective electron transfer between the graphene sheets this nanomaterial is already recognized as promising for the electrodes of the storage batteries and supercapacitors [2-4]. At that, there are many questions concerning its conducting properties, their dependence on the length and diameter of the nanotubes. The experimental data about the conductivity of the pillared graphene are not available, therefore, theoretical forecasting of the regularities of the electric conductivity is the extremely topical. However, calculation of the electric conductivity of the pillared graphene by the quantum-mechanical methods is problematic because of its large supercells.

# Modeling method

For calculation of the electric conductivity, the Green-Keldysh function method and Landauer-Buttiker formalism were applied [5]. Calculation of the energy and the zone structures was done by the density functional method in tight-binding approximation [5] with a self-consistent calculation of the charge density (SCC-DFTB) [7, 8] within the framework of Kvazar software package [9]; pbc-0-3 parametrization was used [10, 11]. The electric conductivity is described by the following expression:

$$G = \frac{I}{V} = \frac{e^2}{h} \int_{-\infty}^{\infty} T(E) F_T(E - \mu) dE, \qquad (1)$$

where T(E) — transmission function, characterizing the quantum-mechanical transparency of the conducting channel, depending on the electron energy moving via it;  $\mu$  — Fermi energy of the material of the electrodes, to which the investigated object is connected; e — charge of an electron, h — Planck constant. The function of the thermal broadening  $F_T(E)$  is calculated according to the following formula:

$$F_T(E) = \frac{1}{4k_b T} \operatorname{sech}^2 \frac{E}{2k_b T},$$
(2)

where  $k_b$  – Boltzmann constant; T – temperature. The transmission function is defined by the following expression:

$$T(E) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \text{Tr}(\Gamma_{S}(E) G_{C}^{A}(E) \Gamma_{D}(E) G_{C}^{R}(E)), \quad (3)$$

where  $G_C^A(E)$ ,  $G_C^R(E)$  — Green's advancing and retarded matrixes (describing a contact with the electrodes);  $\Gamma_S(E)$ ,  $\Gamma_D(E)$  — matrixes of broadening of the levels for a source and a drain. Function of T(E) is found by summation in all the Brillouin zone (BZ) and N — number of points in the reciprocal space. The accuracy of calculation of T(E) is defined by partitioning of the reciprocal space. It will be effective, when with a reduction of a step of the change of the wave number of k the function of T(E) does not vary. For example, for BZ in the form of a final segment (a, b) the function of T(E) converges to the true form at  $N \ge 10^3$ . For the materials, a cell of which contains about several hundreds and thousands of atoms, the calculation in one point — i.e. the function of T(E) for the fixed k, takes a rather long time, thus, carrying out of  $10^3$  calculations becomes impossible. For example, for a cell of a 2D crystal with 472 atoms the calculation of the transmission function, averaged by 288 points of the reciprocal space, takes almost 4 days, but in case of a parallel calculation in 24 processes on the processors. If BZ is not a segment, but a two-dimensional/three-dimensional figure, the number of N increases tenfold and over.

Let us demonstrate the developed method for calculation of T(E) at a small N on the example of a graphene monolayer. Fig. 1, a presents a calculated area, i.e. the unit cell connected to the electrodes. Since the conductivity of the given material (graphene) is calculated, the role of the electrodes is played by the same cells. The cells, which are electrodes, are translated to infinity along the direction of Y, while lengthways of Xthey are semi-infinite. The central cell is also translated to infinity via Y. Thus, the wave number  $k_y$  varies within the limits of  $(-\pi/a_y; \pi/a_y)$ , where  $a_y$  — size of an ele-mentary cell along the direction of Y. The functions of T(E) calculated under formulas (1)–(3) with various quantities of points N are presented in fig. 1, b. For a small subinterval of partitioning dk = 0.1 1/Å (N = 15)the function has a step appearance, in case of a reduction of the step down to 0.0015 1/Å (N = 984) the curve assumes the correct appearance, well-known for the monolayer of graphene. The transmission function is presented in the conductivity quanta of  $e^2/h$ .

In order to eliminate the step form we used an interpolation of the function of T(E) between two neighboring points of the reciprocal space. Fig. 2, *a* presents the step diagrams of T(E) for three different numbers of  $k_{v}$ . In general, irrespective of  $k_{v}$  for realization of interpolation at each point of the broken line the points are determined, which are most close to them by energy and have the same values of T(E) function and belonging to the neighboring broken lines. The picture of distribution of the points looks like it is shown in fig. 2, b, where one value is fixed T(E) = 2. Thus, at first, all the points of the neighboring broken lines are found with the identical values of T(E), and then the closest ones are selected by the difference of energies. If a broken line has two neighboring ones, then each point of this broken line can have not more than one close point on each of them. Similarly, in case of a single neighboring broken line there will be not more than one close point for each point on the considered broken line. If the transmission function has not a single jump, the additional points are added. For example, if for a certain value of  $k_v$  the transmission function has a jump during transition from a point with energy of  $E_i$  to a point with energy of  $E_{i+1}$ , at that,  $T_{i+1} - T_i = 2$ , then an additional point will be added to this broken line. This point is characterized by the value of energy  $0.5(E_{i+1} + E_i)$  and the transition function in this point is equal to  $T_i + 1$ . This is necessary in order to make it possible to find the nearest point with the value of the transition function of  $T_i + 1$ .

Then, the found nearest points are used for adding between them of the additional points laying on the segment connecting these points. All the additional points have the same value of T(E), as the nearest points. The number of the added points depends on the length of the segment connecting the nearest points on different broken lines. The longer is the length of a segment, the more additional points are added. The initial points and the added ones are used for construction of an interpolation function. The interpolation two-dimensional function of  $T_1(E, k_v)$  allows us to realize a frequent partitioning by k, which ensures smoothing of the initial steps. Fig. 3, a presents maps of the transmission function T(E): top — before the procedure of interpolation; bottom - after application of the constructed interpolation function  $T_1(E, k_v)$ . The step character of behavior of function T(E) disappeared everywhere, except the area near the level of 0 eV – Fermi level. Indeed, there can be "special areas", for which the primary partitioning by  $k_v$  is too rough. For them calculations with more quotient partitioning are carried out in addition, but already in a narrow range of values: for  $k_v$  – from 0 up to 0.2 1/Å; for E – from –0.3 up to 0.3 eV. The next step is construction of a new interpolation function  $T_2(E, k_v)$ . Fig. 3, b presents a map of the transmission function after application of  $T_2(E, k_v)$ , and fig. 3, c — the function of T(E) averaged by all  $\vec{k}_{y}$ . The continuous curve shows calculation at partitioning of 0.0015 1/Å, the dotted line shows the result of application of the developed technique. The error equals to 0.52 %. We should also point out that the time spent for reception of the averaged transmission functions differs: 75 min for an exact calculation and 15 min for reception of the final values of the interpolated schedule. We should point out that in general, the time spent on adding of the points depends on the volume of the input data, and not on the number of the atoms in the considered structure. That is, an acceleration can be any - the bigger is the structure, the more is the difference in time, which can be achieved.

## Results

By means of the developed method for calculation of the transmission function and the electric conductivity of 2D graphene/CNT composites were investigated. The investigated film was modeled by two layers of graphene, connected by single-layer tubes of the armchair type (9.9) with diameter of 1.23 nm (the tubes of diameter of 1...1.5 nm are typical for such composite materials). The distance between the tubes was 2.1 nm, the length of the tubes (i.e. the distance between the graphene layers) varied from 1.1 up to 2.4 nm. Fig. 4, a presents the atom structure of a film of a pillared graphene at the distance between the tubes of 2.1 nm. The tubes are connected with the graphene seamlessly -CNT transforms smoothly into a graphene sheet, while the junction contains not only hexagons, but also defects in the form of 5, 7 and 8 angle forms. For calculation of the electric conductivity in the direction of X and Y, just like in case of the graphene monolayer, the central supercell and the supercells of the electrodes are taken (fig. 4, b). The scheme of the calculation of the conductivity in fig. at the left corresponds to the electron transport along X (along the zigzag edge), in fig. on the right - along Y (along the armchair edge). In this case the supercell contains 580 atoms at the distance between the graphene layers of 2.4 nm. Because of a big number of atoms the conductivity was calculated with application of the developed technique. The dependences on the energy of functions T(E), averaged by all k, in case of the electron transport in the direction of X and Y, are presented in fig. 4, c.

The transmission functions T(E) for all the models of the composite supercells on the basis of (9.9) were calculated similarly at the same distance between the tubes of 2.1 nm. On the basis of the calculated T(E) the conductivity and the resistance of the film of the pillared graphene were calculated. The table presents the corresponding data: lengths of the tubes, number of atoms in the translated cells, calculated Fermi level, conductivity and resistance. Fermi level, as is evident from the table, is within the interval of (-4.88; -4.73), i.e. it moves downwards in comparison with the ideal CNT of the same diameter (-4.66 eV). Conductivity and resistance behave non-monotonously. It is possible to say, that in the direction of Y the resistance fluctuates around the value of 12 k $\Omega$ , and in the direction of X. around 90 k $\Omega$ , only with a bigger amplitude.

# Conclusion

A new universal method was created for calculation of the function of transmission of the electrons and electric conductivity at a quantum transport in the composite nanomaterials, which allows us investigate the electrophysical properties for the atomic structures with hundreds and thousands of atoms in a translated supercell. Approbation of the new technique on an example of a graphene monolayer demonstrated, that the error was 0.52 % and this made it possible to reduce considerably the time for calculation of the of transmission function.

The calculated electric conductivity and resistance of a film of the pillared graphene in the armchair and zigzag directions of a graphene sheet show, that the courses of a current along the zigzag edge (fig. 4, b) are more preferable. In this direction the resistances varies insignificantly, and, one can say, it does not depend on the distance between the graphene layers (that is, the length of the tube). An average value of the resistance is 12 k $\Omega$ , which is close to the value of the resistance of an ideal nanotube. This can be explained by a high electric conductivity of the graphene nanoribbons with a zigzag edge, the conductivity of which does not depend on the width of a ribbon and depends little on its topology.

In the armchair edge direction the electric conductivity of the graphene sheet depends noticeably on the film topology. As one can see in the table, the resistance varies greatly with an increase of the length of CNT. By applying an analogy with the graphene nanoribbons, it is possible to notice, that the regularities of the electron transport along the armchair edge are determined by the width of the ribbon and its morphology.

In general, it is possible to draw an important conclusion, that the films of the pillared graphene with nanotubes of 1.23 nm in diameter are characterized by a rather high electric conductivity. Due to their high durability and conductivity, they can be applied successfully in the electronic devices and as electrodes of the storage batteries, because they possess a ramified surface and pores for filling by the necessary compounds.

The work was done with the financial support of the RFFI-ofi\_m N 15-29-01025.

#### References

1. Sasaki R., Shintani K. Hardness of Pillared-Graphene Nanostructures via Indentation Simulation, *MRS Advances*, 2017, vol. 2, no. 1, pp. 45–50.

2. Jiang L., Sheng L., Long C. et al. Functional Pillared Graphene Frameworks for Ultrahigh Volumetric Performance Supercapacitors, *Advanced Energy Materials*, 2015, vol. 5, no. 15. 1500771, pp. 1–9.

3. Lin J., Zhong J., Bao D., Reiber-Kyle J. et al. Supercapacitors based on pillared graphene nanostructures, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2012, vol. 12, no. 3, pp. 1770–1775.

4. **Wang Q., Dong Z., Qu L.** et al. Densely stacked bubblepillared graphene blocks for high volumetric performance supercapacitors, *Energy Storage Materials*, 2015, vol. 1, pp. 42–50.

5. Glukhova O. E., Zhnichkov R. Y., Slepchenkov M. M. Programmy kompleks dlya nanoelektroniki, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2012, no. 1, pp. 5–11 (in Russian).

6. Datta S. *Quantum Transport: Atom to Transistor*. Cambridge University Press. Cambridge. 2005.

7. Elstner M., Porezag D., Jungnickel G. et al. Self-consistent-charge density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties, *Phys. Rev. B.*, 1998, vol. 58, pp. 7260–7268.

8. **Pecchia A., Penazzi G., Salvucci L., Di Carlo A.** Nonequilibrium Greens functions in density functional tight binding: method and applications, *New Journal of Physics*, 2008, vol. 10, no. 065022, pp. 1–17.

9. **Open** *multiprocessor software complex of molecular modeling "KVAZAR"*. URL: http://nanokvazar.ru/

10. Koehler C., Seifert G., Frauenheim Th. Density functional based caculations for Fe\_n ( $n \le 32$ ), *Chem. Phys.*, 2005, vol. 309, pp. 23-31.

11. Aradi B., Hourahine, B., Frauenheim T. DFTB+, a sparse matrix-based implementation of the DFTB method, *The Journal of Phys. Chem. A.*, 2007, vol. 111, pp. 5678–5684.

# Моделирование и конструирование MHCT Modelling and designing of MNST

УДК 621.37.037:621.3.029.64

DOI: 10.17587/nmst.20.87-97

А. В. Корляков, д-р техн. наук, проф., директор НОЦ НТ, akorl@yandex.ru, А. В. Лагош, ассистент, anton.lagosh@gmail.com, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)"

# КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО КЛЮЧА СВЧ ДИАПАЗОНА

Поступила в редакцию 14.08.2017

Разработан обобщенный критерий оптимизации ВЧ МЭМС-ключа, позволяющий реализовать конструкцию подвижного элемента с наиболее выигрышным соотношением электромеханических параметров для заданного технологического процесса. С использованием данного критерия была спроектирована конструкция ключа с подвижным элементом на основе пленки карбида кремния с двумя устойчивыми состояниями и "внутренним" закреплением торсионных подвесов. Разработана оригинальная технология изготовления ВЧ МЭМС-ключа на основе пленки карбида кремния. Проанализировано влияние состава атмосферного фона в процессе роста пленки карбида кремния методом магнетронного распыления на кривизну подвижного элемента.

Ключевые слова: ВЧ МЭМС-ключ, конструкция, критерий оптимизации, карбид кремния, технология

## Введение

Ключи являются классическими МЭМС-устройствами для ВЧ приложений. В этих устройствах механическое движение используется для замыкания или размыкания ВЧ линии передач (для заданной полосы частот). Другими словами, полное входное сопротивление ВЧ линии передачи управляется механическими движениями подвижного элемента МЭМС-ключа. Первые МЭМС-ключи изготавливались на кремнии и поликремнии и использовались в низкочастотных приложениях [1, 2]. Но для ВЧ схем с низким уровнем потерь кремний и поликремний в качестве материалов контактов неприменимы ввиду своего достаточно большого удельного сопротивления. Это послужило толчком к развитию МЭМС-устройств на основе металлов с высокой удельной проводимостью: алюминия, золота, меди, никеля и платины [3-5].

МЭМС-ключи подходят для использования в ВЧ системах с низким уровнем потерь, которые не

требуют высокой скорости переключения [6], пос-кольку обладают следующими достоинствами:

- низкое энергопотребление;
- низкие вносимые потери во включенном состоянии;
- хорошая изоляция в выключенном состоянии;
- высокая коммутируемая мощность;
- линейность (низкие интермодуляционные ис-кажения).

К недостаткам ВЧ МЭМС-ключей относятся:

- низкая скорость переключения (15...200 мкс);
- высокое напряжение переключения (20...100 В);
- надежность ( $<10^9$  циклов переключения) [7].

В настоящее время проводится ряд исследований в целях снижения напряжения и времени переключения [8, 9]. Для проектирования оптимальной конструкции необходим критерий, который позволил бы определить наилучшее соотношение электромеханических параметров.

Таким образом, целью данной работы являлись: анализ конструкции МЭМС-ключа для ВЧ диапа-



**Рис. 1. Типовой вариант классической конструкции ВЧ МЭМС-ключа** Fig. 1. Typical version of the classical design of the RF MEMS switch

зона, разработка обобщенного критерия ее оптимизации и технологическая реализация микроприбора на основе карбида кремния с учетом предполагаемых экстремальных режимов эксплуатации.

# Критерий оптимизации для классической конструкции

Одним из типовых вариантов классической конструкции контактного МЭМС-ключа является структура (рис. 1), которая состоит из подвижного элемента — тонкой пластины, зафиксированной на одном конце и свободно нависающей над металлической линией передач на расстоянии ~1 мкм. Между линией передач и фиксированным концом консоли находится металлический электрод, выполняющий роль тянущего вниз механизма.



Рис. 2. Статическая зависимость прогиба подвижной обкладки от подаваемого на нее управляющего напряжения

Fig. 2. Static dependence of bending of the movable plate on the control voltage applied to it

В такой конструкции используется актюатор электростатического типа, характеризующийся малым временем переключения по сравнению с аналогами и практически нулевым энергопотреблением. Управляющее напряжение заставляет пластину опускаться вниз для замыкания линии передач. К достоинствам данной конструкции можно отнести высокую коммутируемую мощность и широкий диапазон рабочих частот.

Напряжение включения оценивается по зависимости прогиба подвижной упругой обкладки от подаваемого на нее управляющего напряжения (рис. 2). Данная зависимость определяется из статического равновесия силы упругого подвеса и электростатической силы притяжения обкладок:

$$k(y_0 - y) = \frac{\varepsilon_0 S U^2}{2y^2},$$

где k — коэффициент жесткости подвижного элемента;  $y_0$  — начальный зазор между управляющими электродами; y — текущая координата подвижной обкладки;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная; S — площадь подвижной обкладки.

Анализ нелинейной зависимости (рис. 2) позволяет определить критическое напряжение включения  $U_{\rm K}$ , характеризующееся необратимым падением подвижной обкладки на подложку (режим *Pull-In*). Критическое значение остаточного зазора определяется соотношением  $y_{\rm K} = 2/3 \cdot y_0$ , а критическое напряжение включения  $U_{\rm K}$  можно представить в следующем виде:

$$U_{\rm K} = \sqrt{\frac{8ky_0^3}{27\varepsilon_0 S}}.$$
 (1)

Из формулы (1) видно, что для уменьшения напряжения включения необходимо обеспечить минимальный начальный зазор  $y_0$  между управляющими электродами, максимальную площадь подвижной обкладки *S* и минимальный коэффициент жесткости подвижного элемента *k* (последний параметр определяется типом конструкции и выбранным материалом). В общем случае коэффициент жесткости прямо пропорционален модулю упругости материала.

Время включения может быть оценено из соотношения [10]

$$t_{\rm BKJ} = \frac{1}{2f_0} \frac{U_{\rm K}}{U_{\rm BKJ}},$$

где  $f_0$  — резонансная частота колебаний подвижной обкладки;  $U_{\rm BKЛ}$  — используемое рабочее напряжение включения, которое обычно превышает  $U_{\rm K}$  в 1,2...1,5 раза. Время выключения (размыкания), как правило, больше времени включения и определятся частью периода свободных колебаний подвижной обкладки [10]:

$$t_{\rm BMKJ} = \frac{1}{2f_0}$$

Таким образом, время переключения при  $U_{\rm BKR} = U_{\rm K}$  характеризуется выражением

$$t_{\text{перекл}} = t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}} = \frac{1}{f_0}.$$

Резонансная частота подвижного элемента  $f_0$ , в свою очередь, определяется отношением жесткости конструкции к его массе:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\rho Sh}},\tag{2}$$

где р — плотность материала подвижного элемента; *h* — толщина подвижного элемента.

Анализируя выражения (1) и (2), можно сделать вывод, что при проектировании конструкции ВЧ МЭМС-ключа возникает противоречие: с одной стороны, для понижения управляющего напряжения коэффициент жесткости подвижного элемента следует снизить, с другой — при снижении жесткости уменьшается резонансная частота и, как следствие, увеличивается время переключения. Таким образом, необходимо ввести обобщенный критерий оптимизации, исключающий жесткость конструкции. Таким критерием является отношение резонансной частоты подвижного элемента к критическому напряжению включения. В дальнейшем для удобства анализа и сравнения будем рассматривать квадрат данного отношения. Для классической конструкции (см. рис. 1) критерий оптимизации принимает следующий вид:

$$\frac{f_0^2}{U_{\rm K}^2} = C_{\rm K} \frac{\varepsilon_0}{y_0^3 \rho h},\tag{3}$$

где  $C_{\rm K}$  — параметр, характеризующий тип конструкции подвижного элемента.

Согласно расчетам, параметр  $C_{\rm K}$  для классической конструкции равен константе  $27/(32\pi^2)$ . Следовательно, чтобы максимизировать критерий (3), необходимо уменьшить зазор и толщину подвижного элемента или выбрать материал с более низкой плотностью.

Толщина пленки влияет на жесткость подвеса, виброустойчивость и прочность конструкции. Жесткость подвеса пропорциональна кубу толщины конструкции, поэтому при чрезмерном уменьшении толщины можно оказаться за пределами требуемого диапазона значений времени переключения. Более того, при малой жесткости конструкции повышается вероятность самопроизвольного замыкания ключа при коммутации мощного ВЧ сигнала. Жесткость конструкции при малых толщинах можно увеличить, используя материал с высоким значением модуля упругости.

Размер воздушного зазора  $y_0$  между управляющими электродами наиболее сильно влияет на критерий оптимизации (3), его наименьшее значение определяется, в первую очередь, желаемым значением изоляции в выключенном состоянии, а также технологическими ограничениями, связанными с вытравливанием жертвенного слоя из-под подвижного механического элемента. Рекомендуемый диапазон значений толщин подвижного элемента и жертвенного слоя составляет 1...2 мкм.

Среди материалов с низкой плотностью и высоким значением модуля упругости можно выделить карбид кремния (рис. 3), который обладает следующими достоинствами:

- высокое значение модуля упругости и, как следствие, повышенная жесткость конструкции;
- низкая плотность (по сравнению с металлами), что обеспечивает высокую резонансную частоту конструкции и, как следствие, высокое быстродействие;
- высокие значения теплопроводности и температуры Дебая, что позволяет значительно расширить диапазон рабочих температур.

Однако если изготавливать устройства в рамках заданной технологии, то размер зазора, толщина подвижного элемента и плотность являются фиксированными величинами. И если в этом случае мы используем различные конструкции элемента классического типа, подобные подвижной обклад-



**Рис. 3.** Сравнение основных свойств карбида кремния, золота и кремния как базовых материалов подвижного элемента МЭМС-ключей *Fig. 3.* Comparison of the basic properties of the silicon carbide, gold and silicon as the base materials for a movable element of the MEMS switches

ке на упругом подвесе (см. рис. 1), в которых меняется только жесткость, то изменение топологии конструкции не приводит к улучшению по критерию оптимизации.

# Критерий оптимизации для конструкции с двумя устойчивыми состояниями

Существуют варианты конструкций, отличающиеся от классической, особенно интересна конструкция на основе торсионных подвесов с двумя устойчивыми состояниями [11] (рис. 4). В данной конструкции подвижный элемент вращается вокруг оси, проходящей через центральную точку закрепления, и есть два устойчивых положения, потому ВЧ МЭМС-ключ на ее основе способен коммутировать две линии передачи.

Первое "холодное" включение будет характеризоваться критическим напряжением включения



Рис. 4. Схематичное изображение подвижного элемента на основе торсионов в разрезе

Fig. 4. Layout view of the movable element on the basis of torsions in section

при достижении вращающимся элементом угла поворота критического значения ак (рис. 5). При снятии напряжения U<sub>к</sub> конструкция переключается во второе положение, проходя по инерции положение равновесия, при этом достаточно подать на вторую пару обкладок напряжение удержания U<sub>ул</sub>. При переключении из второго положения в первое также достаточно снять управляющее напряжение со второй пары обкладок и подать напряжение  $U_{\rm vr}$ на первую пару обкладок. Таким образом, переход ключа из первого положения во второе (и наоборот) будет определяться напряжением удержания  $U_{\rm yg}$ , а не критическим напряжением включения  $U_{\kappa}$ . При этом соответствующий максимальный угол поворота будет определяться выражением  $\alpha_{\max} = y_0 / l_3.$ 

Выражение для расчета напряжения удержания в этом случае выглядит следующим образом:

$$U_{\rm yg} = \sqrt{\frac{2k_{\alpha}y_0^3}{\varepsilon_0 B l_3^3}} \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{l_2}{l_3}\right)} - \frac{1}{1 - \left(\frac{l_1}{l_3}\right)} + \ln\left(\frac{1 - \left(\frac{l_2}{l_3}\right)}{1 - \left(\frac{l_1}{l_3}\right)}\right)\right)^{-1}, (4)$$

где  $k_{\alpha}$  — коэффициент жесткости на кручение; B — ширина подвижного элемента;  $l_1$  — расстояние между осью вращения и ближайшей границей управляющего электрода;  $l_2$  — расстояние между осью вращения и дальней границей управляющего электрода;  $l_3$  — длина подвижного элемента.



Рис. 5. Зависимость угла вращения подвижного элемента ВЧ МЭМС-ключа от прикладываемого напряжения Fig. 5. Dependence of the angle of rotation of the movable element of the RF MEMS switch on the applied voltage

Резонансная частота будет определяться отношением жесткости конструкции к моменту инерции относительно оси вращения:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2} \frac{k_{\alpha}}{\rho Bh l_3^3}}.$$
 (5)

С учетом формул (4) и (5) получим выражение для критерия оптимизации ВЧ МЭМС-ключа с подвижным элементом на основе торсионов:

$$\frac{f_0^2}{U_{\rm VII}^2} = C_\alpha \frac{\varepsilon_0}{y_0^3 \rho h},\tag{6}$$

где  $C_{\alpha}$  — параметр, характеризующий тип конструкции подвижного элемента (см. рис. 4).

Выражение (6) идентично выражению (3) с точностью до коэффициента. Однако в случае использования бистабильной конструкции подвижного элемента на основе торсионных подвесов параметр  $C_{\alpha}$  уже не константа (в отличие от  $C_{\rm K}$ ), а зависит от геометрии и размеров конструкции (рис. 6):



Для повышения коэффициента  $C_{\alpha}$  необходимо увеличивать  $l_2$  и уменьшать  $l_1$ , т. е. максимизировать длину управляющего электрода. Можно также снижать  $l_3$ , но минимальное значение будет ограничено значением *l*<sub>2</sub> и длиной замыкающего контакта. Кроме того, минимальное отношение размеров ограничено технологическими возможностями литографии.

Варьируя размеры рассматриваемой конструкции, можно получить выигрыш по критерию оптимизации (область на рис. 6 выше штриховой линии) по сравнению с рассмотренной ранее типовой классической конструкцией (см. рис. 1). Этот выигрыш достигается за счет замены в критерии оптимизации критического напряжения включения  $U_{\rm K}$  на напряжение удержания  $U_{\rm yg}$ . Можно утверждать, что даже в рамках одной технологии использование подвижного элемента с двумя устойчивыми состояниями на основе торсионных подвесов предпочтительнее.

Использование пленки SiC в качестве материала подвижного элемента накладывает дополнительные ограничения на конструкцию. Известно, что композиция "карбид кремния на изоляторе" обладает отрицательными (сжимающими) механическими напряжениями при формировании ее методом магнетронного осаждения [12]. Для компенсации отрицательных напряжений в бистабильной конструкции (см. рис. 4) было разработано конструктивно-технологическое решение с "внутренним" закреплением торсионных подвесов (рис. 7, см. четвертую сторону обложки).

Критерий оптимизации такой конструкции выглядит следующим образом:

$$\frac{f_0^2}{U_{y_{\pi}}^2} = C_{\alpha} \frac{\varepsilon_0}{y_0^3 \rho h} \cdot \frac{1}{1 - (l_1/l_3)^3}$$



Рис. 6. Зависимость параметра  $C_{\alpha}$  от конструктивно-геометрических параметров подвижного элемента



Таким образом, перемещение области закрепления "внутрь" подвижного элемента позволяет получить дополнительный выигрыш порядка нескольких процентов за счет слагаемого  $[1 - (l_1/l_3)^3]^{-1}$ .

Согласно расчетам, замена классической конструкции с подвижным элементом типа "подвижная обкладка на упругом подвесе" на конструкцию с подвижным элементом с двумя устойчивыми состояниями и "внутренним" закреплением торсионных подвесов (рис. 7, см. четвертую сторону обложки) позволяет получить значительный (пятикратный) выигрыш по критерию оптимизации.

# Изготовление ВЧ МЭМС-ключа на основе пленки карбида кремния

Оптимизация конструкции ВЧ МЭМС-ключа всегда имеет определенные технологические ограничения. Так, минимальное значение зазора между управляющими электродами ограничено методом вытравливания жертвенного слоя. В нашем случае при использовании жидкостного травления требовался зазор более 2...2,5 мкм, тогда как газовое травление позволяло снизить этот порог более чем в 5 раз. При разработке ключа с контактом "металл-металл" замыкающий полосок следует изготавливать из материала с высокой удельной проводимостью, и его поверхность должна быть стойкой к окислению. Кроме того, для минимизации контактного сопротивления и, как следствие, минимизации вносимых потерь во включенном состоянии следует использовать материал с низкой твердостью. Исходя из этих требований можно считать, что оптимальным материалом для контактной области является золото.

Для реализации спроектированной конструкции (рис. 7, см. четвертую сторону обложки) с учетом изложенных требований была разработана технология изготовления ВЧ МЭМС-ключа на основе пленки карбида кремния (рис. 8, см. четвертую сторону обложки). Ее основными особенностями являются:

- изолирующая подложка с двусторонней полировкой;
- четыре операции фотолитографии;
- один двухуровневый жертвенный слой;
- подвижный элемент на основе слоя карбида кремния;
- газовое травление жертвенного слоя;
- контакт "Аи—Аи";
- вакуумная герметизация.

В ходе реализации разработанной технологии было установлено, что механические напряжения в карбиде кремния неравномерно распределены по толщине пленки. В результате происходит нежелательный изгиб конструкции (рис. 9), что приводит



Рис. 9. Практическая реализация ВЧ МЭМС-ключа на основе пленки карбида кремния



к повышению управляющего напряжения, снижению быстродействия и надежности.

Одним из основных механизмов формирования механических напряжений может являться плазмостимулированное окисление растущей пленки. Эксперименты показали, что изменение атмосферного фона в камере магнетронной установки в процессе роста приводит к неравномерному распределению механических напряжений по толщине пленки. При анализе экспериментальных результатов было установлено, что кривизна поверхности подвижного элемента снижается при уменьшении разности давлений остаточной атмосферы до начала и после окончания осаждения пленки карбида кремния.

Анализ электромеханических параметров экспериментальных образцов ключа с подвижным элементом, с двумя устойчивыми состояниями и с "внутренним" закреплением торсионных подвесов показывает двукратное преимущество по критерию оптимизации (в сравнении с подвижным элементом классического типа). Имеющее место незначительное отличие экспериментальных и расчетных данных можно объяснить наличием кривизны поверхности подвижного элемента.

# Заключение

Предложенный обобщенный критерий оптимизации конструкции ВЧ МЭМС-ключа позволяет реализовать конструкцию с наиболее выигрышным соотношением электромеханических параметров в рамках конкретного технологического процесса. Согласно расчетам, такой конструкцией является подвижный элемент на основе пленки карбида кремния с двумя устойчивыми состояниями и "внутренним" закреплением торсионных подвесов.

Разработана технология изготовления ВЧ МЭМС-ключей с подвижным элементом на основе пленки карбида кремния. Установлено, что нежелательный изгиб конструкции, возникающий из-за неравномерно распределенных механических напряжений по толщине пленки подвижного элемента, можно снизить путем уменьшения разности давлений остаточной атмосферы до и после осаждения.

Практическая реализация конструкции ключа с подвижным элементом с двумя устойчивыми состояниями и с "внутренним" закреплением торсионных подвесов позволила экспериментально показать ее преимущество в сравнении с типовым вариантом классической конструкции.

#### Список литературы

1. **Petersen K. E.** Micromechanical Switches on Silicon // IBM Journal of Research and Development. July 1971. Vol. 23, N. 4. P. 376–385.

2. **French P. J.** Polysilicon: A Versatile Material for Microsystems // Sensors and Actuators A Physical. April 2002. Vol. A 99, N. 1–2. P. 3–12.

3. Wang L., Cui Z., Hong J.-S., McErlean E. P., Greed R. B., Voyce D. C. Fabrication of high power RF MEMS switches // J. Microelectronic Engineering. February 2006. Vol. 83, P. 1418–1420.

4. Song Y.-T., Lee H.-Y., and Esashi M. Low Actuation Voltage Capacitive Shunt RFMEMS Switch Having a Corrugated Bridge // IEICE Trans. Electron. December 2006. Vol. E89–C, N. 12. P. 1880–1887.

5. Ekkels P., Rottenberg X., Puers R. and Tilmans H. A. C. Evaluation of platinum as a structural thin film material for RF-MEMS devices // J. Micromech. Microeng. May 2009. Vol. 19. P. 1-8.

6. Бохов О. С., Духновский М. П., Козырев А. Б., Корляков А. В., Королев А. Н., Лагош А. В., Лучинин В. В., Топталов С. И. Низкопотребляющие малогабаритные радиотехнические модули на основе микроэлектромеханических ключей // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 12 (149). С. 60-71.

7. **Лагош А. В., Корляков А. В.** Механизмы деградации ВЧ МЭМС-ключей // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 5. С. 316—331.

8. **Chu C.-H., Shih W.-P., Chung S. Y. et al**. A low actuation voltage electrostatic actuator for RF MEMS switch applications // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2007. Vol. 17. P. 1649–1656.

9. Корляков А. В., Лагош А. В., Лучинин В. В. Микроэлектромеханический ключ для СВЧ применения на основе пленок карбида кремния // Электронная техника, серия 1 "СВЧ техника". 2013. № 3 (518). С. 80–85.

10. **Rebeiz G. M.** RF MEMS theory, design, and technology. Hoboken: John Wiley & Sons. 2003.

11. Sukomal D., Shiban K. K. Design and development of a surface micro-machined push—pull-type true-time-delay phase shifter on an alumina substrate for Ka-band T/R module application // J. Micromech. Microeng. October 2012. Vol. 22, P. 1–20.

12. Astashenkova O. N., Korlyakov A. V., Luchinin V. V. Micromechanics based on silicon carbide // 15-я научная молодежная школа "Физика и технология микро- и наносистем. Карбид кремния и родственные материалы". 2012. С. 38—39.

**A. V. Korlyakov**, D. Sc., Professor, Director of HOTs NT, akorl@yandex.ru, **A. V. Lagosh**, Assistant, anton.lagosh@gmail.com,

St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"

Corresponding author:

Lagosh Anton V., Assistant, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg 197376, e-mail: anton.lagosh@gmail.com,

# Criterion for Optimization of the Micromechanical Switch for RF Band

Received on August 14, 2017 Accepted on September 26, 2017

A universal criterion for optimization of the electromechanical parameters of RF MEMS switch was developed, allowing us to realize a design of a movable element with the optimal correlation of the electrotechnical parameters for a set technological process. The given criterion was used to design a switch with a movable element on the basis of the silicon carbide film with two stable states and "inside" fixation of the torsion suspensions. An original technology was developed for manufacturing of RF MEMS switch based on the silicon carbide film. The influence of the composition of the atmospheric background in the process of growth of the silicon carbide film by the method of magnetron deposition on bending of the movable element was analyzed.

Keywords: RF MEMS switch, design, optimization criterion, silicon carbide, technology

For citation:

Korlyakov A. V., Lagosh A. V. Criterion for Optimization of the Micromechanical Switch for rf Band, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 87–97.

DOI: 10.17587/nmst.20.87-97

# Introduction

Switches are classical MEMS devices for RF applications. In these devices a mechanical movement is used for closing or opening of a RF transmission line (for a set band of frequencies). In other words, total input resistance of a RF transmission line is controlled by the mechanical movements of a movable element of a MEMS switch. The first MEMS switches were made on silicon and polysilicon, and were used in low-frequency applications [1, 2]. But silicon and polysilicon as the contact materials are inapplicable for RF circuits with a low level of losses, because of their rather high specific resistance. This gave an impetus to development of MEMS devices on the basis of metals with a high specific conductivity: aluminum, gold, copper, nickel and platinum [3–5].

MEMS switches are good for the use in RF systems with a low level of losses, which do not demand a high speed of switching [6], because of their following advantages:

- low energy consumption;
- low insertion loss in the turned-on mode;
- good insulation in the turned-off mode;
- high switching power;
- linearity (low intermodulation distortions). Among the drawbacks of the switches are the following:
- low speed of switching (15...200 μs);
- high voltage of switching (20...100 V);
- reliability ( $< 10^9$  cycles of switching) [7].

A number of research works were done to reduce the voltage and time of switching [8, 9]. A criterion is necessary for development of the optimal design, which would allow us to define the best correlation of the electromechanical parameters.

Thus, the aims of the work were: analysis of a design of the RF MEMS switch, elaboration of a generalized criterion for optimization and technological realization of a microdevice on the basis of silicon carbide, taking into account the extreme modes of its operation.

# Criterion for optimization of the classical design

One of the typical versions of the design of a contact MEMS switch is the structure (fig. 1), which consists of a movable element of a thin plate fixed on one end and freely hanging over a metal transmission line at the distance of 1  $\mu$ m. Between the transmission line and the fixed end of the console there is a metal electrode, which plays the role of the mechanism pulling it downwards.

The design employs an actuator of an electrostatic type, characterized by a brief switching time, compared with its analogs, and a zero energy consumption. The control voltage forces the plate to move downwards and close the transmission line. Among the advantages of the given design it is possible to mention a high switching power and a wide range of the working frequencies.

The turn-on voltage is estimated by the dependence of bending of the movable elastic plate on the submitted control voltage (fig. 2). The given dependence is defined from the static balance of force of the elastic suspension and the electrostatic attractive force of the plates:

$$k(y_0 - y) = \frac{\varepsilon_0 S U^2}{2y^2}$$

where k — coefficient of rigidity of the movable element;  $y_0$  — initial gap between the control electrodes; y — current coordinate of the movable plate;  $\varepsilon_0$  — electric constant; S — area of the movable plate.

An analysis of the nonlinear dependence (fig. 2) allows us to define the critical turn-on voltage  $U_{\rm K}$  characterized by irreversible falling of the movable plate on the substrate (*Pull-In* mode). The critical value of the residual gap is defined by correlation  $y_{\rm K} = 2/3y_0$ , while the critical turn-on voltage  $U_{\rm K}$  can be presented as the following:

$$U_{\rm K} = \sqrt{\frac{8ky_0^3}{27\varepsilon_0 S}}.$$
 (1)

From the formula (1) it is visible, that for a reduction of the control voltage it is necessary to ensure the minimal initial gap  $y_0$  between the control electrodes, the maximal area of the movable plate *S* and the minimal coefficient of stiffness of the movable element *k* (the last parameter is defined by the type of the design and the selected material). In a general case the coefficient of stiffness is in direct proportion to the modulus of elasticity of the material.

The turn-on time can be estimated from the following correlation [10]:

$$t_{\rm BKT} = \frac{1}{2f_0} \frac{U_{\rm K}}{U_{\rm BKT}},$$

where  $f_0$  — resonant frequency of fluctuations of the movable plate;  $U_{\rm BKJ}$  — employed working control voltage, which usually 1.2...1.5 times exceeds  $U_{\rm K}$ . The time of turn-off (disconnection), as a rule, is more than the turn-on time and is defined by a part of the period of the free fluctuations of the movable plate [10]:

$$t_{\rm B b i K \pi} = \frac{1}{2f_0}$$

Thus, at  $U_{\rm BKJ} = U_{\rm K}$  the switching time is characterized by the following expression:

$$t_{\text{перекл}} = t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}} = \frac{1}{f_0}.$$

The resonant frequency of the movable element  $f_0$  is defined by the relation of the rigidity of a design to its weight:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\rho Sh}},\tag{2}$$

where  $\rho$  – density of the material of the movable element; h – thickness of the movable element.

Analyzing the expressions (1) and (2), it is possible to draw a conclusion that during designing of RF MEMS switch a contradiction appears: on the one hand, for a smaller control voltage the stiffness coefficient of the movable element should be lowered, on the another hand — a decrease of rigidity lowers the resonant frequency and, as a consequence, the switching time increases. Thus, it is necessary to introduce a generalized criterion for optimization excluding the rigidity of a design. Such a criterion is the relation of the resonant frequency of the movable element to the critical turn-on voltage. Hereinafter, for convenience of the analysis, we will consider a square of the given relation.

For a classical design (see fig. 1) the criterion for optimization acquires the following form:

$$\frac{f_0^2}{U_{\kappa}^2} = C_{\kappa} \frac{\varepsilon_0}{y_0^3 \rho h}, \qquad (3)$$

where  $C_{\rm K}$  — parameter characterizing the type of the movable element.

According to calculations, parameter  $C_{\rm K}$  for a classical design is equal to the constant of  $27/32\pi^2$ . Hence, in order to maximize the criterion (3), it is necessary to reduce the gap and the thickness of the movable element or select a material with a smaller density.

The thickness of a film influences the rigidity of the suspension, vibration resistance and durability of a design. The rigidity of the suspension is proportional to the cube of the thickness of a design, therefore, in case of an excessive reduction of the thickness it is possible to appear beyond the limits of the demanded range of the time of switching. Moreover, in case of a small rigidity of the design the probability of a spontaneous closing of the switch increases during switching of a powerful RF signal. The rigidity of the design with a small thickness can be increased, using a material with a high value of the module of elasticity.

The size of the air gap  $y_0$  between the control electrodes influences most strongly the criterion of optimization (3), the lowest value of it is defined, first of all,

by the desirable value of isolation in the switched-off mode, and also by the technological restrictions connected with etching of the sacrificial layer from under the movable mechanical element. The recommended range of the values of thickness of the movable element and the sacrificial layer is 1...2 µm.

Among the materials with a low density and high value of the module of elasticity it is possible to single out the silicon carbide (fig. 3), which has the following advantages:

- high module of elasticity and, as a consequence, heightened rigidity of the design;
- low density (compared with metals), which ensures a high resonant frequency of the design and, as a consequence, high operation speed;
- high heat conductivity and Debye temperature, which make it possible to expand considerably the range of the working temperatures.

However, if we manufacture the devices within the framework of the set technology, the size of the gap, thickness of the movable element and density remain fixed. And if in this case we use different designs of the element of the classical type similar to the movable plate on the elastic suspension (see fig. 1), in which only rigidity varies, then a change in the topology of the design wll not lead to improvement of the criterion for optimization.

# Criterion for optimization of the design with two stable states

There are versions of the designs, different from the classical one. The design on the basis of the torsion suspensions with two steady states is of special interest [11] (fig. 4). In the given design the movable element rotates around the axis, which passes through the central point of fastening, and there are two steady positions, therefore, the RF MEMS switch can switch two transmission lines.

The first "cold" turn-on will be characterized by a critical turn-on voltage during achievement by the rotating element of the turn angle of a critical value  $\alpha_{\kappa}$ (fig. 5). When voltage  $U_{\kappa}$  is removed, the design switches into the second position, passing through the position of equilibrium due to its own inertia, at that, it is enough to supply the holding voltage  $U_{\rm VII}$  to the second pair of plates. During switching from the second position to the first one it is also enough to remove the control voltage from the second pair of plates and to submit voltage  $U_{y\pi}$  to the first pair of plates. Thus, the transition of the switch from the first position into the second one (and vice-versa) will be determined by the holding voltage  $U_{\rm VI}$ , instead of the critical turn-on voltage  $U_{\rm K}$ . At that, the corresponding maximal turn angle will be determined by expression  $\alpha_{\text{max}} = y_0/l_3$ .

The expression for calculation of the holding voltage acquires the following form:

$$U_{y\pi} = \sqrt{\frac{2k_{\alpha}y_{0}^{3}}{\varepsilon_{0}Bl_{3}^{3}}} \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{l_{2}}{l_{3}}\right)} - \frac{1}{1 - \left(\frac{l_{1}}{l_{3}}\right)} + \ln\left(\frac{1 - \left(\frac{l_{2}}{l_{3}}\right)}{1 - \left(\frac{l_{1}}{l_{3}}\right)}\right)\right)^{-1}, (4)$$

where  $k_{\alpha}$  — coefficient of stiffness for torsion; B — width of the movable element;  $l_1$  — distance between the axis of rotation and the nearest border of the control electrode;  $l_2$  — distance between the axis of rotation and the distant border of the control electrode;  $l_3$  — length of the movable element.

The resonant frequency will be determined by the relation of the rigidity of the design to the moment of inertia in relation to the rotation axis:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2} \frac{k_\alpha}{\rho Bhl_3^3}}.$$
 (5)

Taking into account the formulas (4) and (5), we will receive expression for the criterion of optimization of the RF MEMS switch with a movable element on the basis of the torsions:

$$\frac{f_0^2}{U_{y\mu}^2} = C_{\alpha} \frac{\varepsilon_0}{y_0^3 \rho h}, \qquad (6)$$

where  $C_{\alpha}$  — parameter characterizing the type of the movable element (see fig. 4).

Expression (6) is identical to expression (3) with the accuracy up to the coefficient. However, in case of a bistable design of the movable element on the basis of the torsion suspensions  $C_{\alpha}$  is already not a constant (unlike  $C_{\rm K}$ ), but depends on the geometry and the dimensions of the design (fig. 6):

$$C_{\alpha} = \frac{3}{16\pi^2} \left( \frac{1}{1 - \left(\frac{l_2}{l_3}\right)} - \frac{1}{1 - \left(\frac{l_1}{l_3}\right)} + \ln\left(\frac{1 - \left(\frac{l_2}{l_3}\right)}{1 - \left(\frac{l_1}{l_3}\right)}\right) \right)$$

In order to increase the coefficient  $C_{\alpha}$  it is necessary to increase  $l_2$  and to reduce  $l_1$ , i.e. to maximize the length of the control electrode. It is also possible to reduce  $l_3$ , but the minimal value will be limited by  $l_2$  and the length of the closing contact. Besides, the minimal relation of the dimensions is limited by the technological possibilities of the lithography.

By varying the dimensions of the considered design we can gain on the optimization criterion (the area above the dashed line in fig. 6) in comparison with the considered typical classical design (see fig. 1). This gain is reached at the expense of replacement of the critical turn-on voltage  $U_{\rm K}$  with the voltage of holding  $U_{\rm yg}$  in the criterion of optimization. It is possible to say, what even within the framework of one technology the use of a movable element with two steady states on the basis of the torsion suspensions is more preferable.

Use of SiC film as the material for the movable element imposes additional restrictions on the design. As is known, the composition of "the silicon carbide on an insulator" has a negative (compressing) mechanical stresses during its formation by the method of the magnetron deposition [12]. For compensation of the negative stresses in the bistable design (see fig. 4) a designtechnological solution was developed with an "internal" fastening of the torsion suspensions (fig. 7, see the 4-th side of cover).

The criterion for optimization of the design looks like this:

$$\frac{f_0^2}{U_{y\mu}^2} = C_{\alpha} \frac{\varepsilon_0}{y_0^3 \rho h} \cdot \frac{1}{1 - (l_1/l_3)^3}.$$

Thus, a shift of the area of fastening toward the interior of the movable element allows us to get an additional gain of several percent due to the summand  $[1 - (l_1/l_3)^3]^{-1}$ .

According to calculations, replacement of a classical design including a movable element of "a movable plate on an elastic suspension" type with the design involving a movable element and two steady states and "internal" fastening of the torsion suspensions (fig. 7) allows us to get a considerable (fivefold) gain on the criterion of optimization.

# Manufacturing of RF MEMS switch on the basis of a silicon carbide film

Optimization of the design of the RF MEMS switch always has certain technological restrictions. Thus, the minimal value of the gap between the control electrodes is limited by the method of etching of the sacrificial layer. In our case involving the use of a liquid etching a gap of more than 2...2.5 µm was required, whereas the gas etching made it possible to lower the threshold more than 5 times. In case of development of a switch with a "metal-metal" contact the closing band should be made of a material with a high specific conductivity, and its surface should be resistant to oxidation. Besides, for minimization of the contact resistance and, as a consequence, of the losses introduced in the turn-on mode, it is necessary to use a material with a low hardness. Proceeding from these requirements, it is possible to consider, that the optimal material for the contact area is gold.

For realization of the developed design (fig. 7, see the 4-th side of cover) with account of the above requirements, the manufacturing technology of the RF MEMS switch was developed on the basis of the silicon carbide film (fig. 8, see the 4-th side of cover). Its basic features are:

- insulating substrate with a bilateral polishing;
- 4 operations of photolithography;
- one two-level sacrificial layer;
- movable element on the basis of a layer of silicon carbide;
- gas etching of the sacrificial layer;
- "Au—Au" contact;
- vacuum hermetic sealing.

During realization of the developed technology it was discovered, that the mechanical stresses in the silicon carbide were distributed non-uniformly within the thickness of the film. As a result there was an undesirable bend of the design (fig. 9), which led to an increase of the control voltage, and decrease of the speed and reliability.

One of the basic mechanisms for formation of the mechanical stresses can be plasma-stimulated oxidation of a growing film. Experiments demonstrated that a variation of the atmospheric background in the chamber of a magnetron installation in the course of growth led to a non-uniform distribution of the mechanical stresses within the thickness of a film. An analysis of the experimental results revealed that the curvature of the surface of the movable element decreased simultaneously with the reduction of the pressure difference of the residual atmosphere before the beginning and after the termination of deposition of a silicon carbide film.

Analysis of the electrochemical parameters of the experimental samples of the switch with a movable element, two stable states and "internal" fastening of the torsion suspension shows a twofold advantage on the optimization criterion (compared with the movable element of the classical type).

The insignificant difference between the experimental and the calculated data can be explained by the presence of a curvature of the surface of the movable element.

# Conclusion

The proposed generalized criterion for optimization of the design of the RF MEMS switch allows us to realize a design with the most advantageous correlation of the electromechanical parameters within the framework of a concrete technological process. According to calculations, such a design is the movable element on the basis of a silicon carbide film with two steady states and "internal" fastening torsion suspensions. A technology for manufacturing of the RF MEMS switches with a movable element on the basis of a silicon carbide film was developed. It was discovered, that the undesirable bend of the design caused by a non-uniformly distributed mechanical stresses within the thickness of the film of the movable element, can be lowered due to reduction of the pressure difference of the residual atmosphere before and after deposition.

A practical realization of the design of the switch with a movable element with two steady states and "internal" fastening torsion suspensions made it possible to demonstrate experimentally its advantage in comparison with the typical version of a classical design.

#### References

1. Petersen K. E. Micromechanical Switches on Silicon, *IBM Journal of Research and Development*, 1971, vol. 23, no. 4, pp. 376–385.

2. French P. J. Polysilicon: A Versatile Material for Microsystems, *Sensors and Actuators A Physical*, 2002, vol. A 99, no. 1–2, pp. 3–12.

3. Wang L., Cui Z., Hong J.-S., McErlean E. P., Greed R. B., Voyce D. C. Fabrication of high power RF MEMS switches, *J. Microelectronic Engineering*, 2006, vol. 83, pp. 1418–1420.

4. Song Y.-T., Lee H.-Y., Esashi M. Low Actuation Voltage Capacitive Shunt RF MEMS Switch Having a Corrugated Bridge, *IEICE Trans. Electron.*, 2006, vol. E89–C, no. 12, pp. 1880–1887.

5. Ekkels P., Rottenberg X., Puers R., Tilmans H. A. C. Evaluation of platinum as a structural thin film material for RF-MEMS devices, *J. Micromech. Microeng.*, 2009, vol. 19, pp. 1–8.

6. Bokhov O. S., Dukhnovskii M. P., Kozyrev A. B., Korliakov A. V., Korolev A. N., Lagosh A. V., Luchinin V. V., Toptalov S. I. Nizkopotrebliaiushchie malogabaritnye radiotekhnicheskie moduli na osnove mikroelektromekhanicheskikh kliuchei, *Nano i Mikrosistemnaia Tekhnika*, 2012, no. 12 (149), pp. 60–71 (in Russian).

7. Lagosh A. V., Korliakov A. V. Mekhanizmy degradatsii VCH MEMS-kliuchei, *Nano i Mikrosistemnaia Tekhnika*, 2016, no. 5 (18), pp. 316–331 (in Russian).

8. C.-H. Chu, W.-P. Shih, S. Y. Chung et al. A low actuation voltage electrostatic actuator for RF MEMS switch applications, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, vol. 17, pp. 1649–1656.

9. Korliakov A. V., Lagosh A. V., Luchinin V. V. Mikroelektromekhanicheskii kliuch dlia SVCH primeneniia na osnove plenok karbida kremniia, *Elektronnaia Tekhnika, seriia 1 SVCHtekhnika*, 2013, no. 3 (518), pp. 80–85 (in Russian).

10. **Rebeiz G. M.** RF MEMS theory, design, and technology. Hoboken: John Wiley & Sons. 2003.

11. Sukomal D., Shiban K. K. Design and development of a surface micro-machined push—pull-type true-time-delay phase shifter on an alumina substrate for Ka-band T/R module application, *J. Micromech. Microeng.*, 2012, vol. 22, pp. 1–20.

12. Astashenkova O. N., Korlyakov A. V., Luchinin V. V. Micromechanics based on silicon carbide, *15 nauchnaia molod zhnaia shkola "Fizika i tekhnologiia mikro- i nanosistem. Karbid kremniia i rodstvennye materialy"*, 2012, pp. 38–39. **Л. А. Щигорев**, аспирант Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ", ст. инженер ЗАО НТЦ "Модуль", Москва, e-mail: l.shchigorev@module.ru

# ПРИМЕНЕНИЕ ШИНЫ ДИАГНОСТИКИ В ЗАДАЧЕ САМОРЕМОНТА БЛОКОВ СТАТИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ

Поступила в редакцию 30.08.2017

Рассматривается архитектура устройств встроенного саморемонта памяти с использованием диагностической информации. Показано преимущество по времени выполнения операции саморемонта при использовании шины диагностики вместо флага статуса. Предложена реализация анализатора ремонта для резервных столбцов, базирующаяся на известной архитектуре для резервных строк. Предложен новый подход к анализу диагностической информации, учитывающий вероятность наличия сбитой, но не отказавшей ячейки памяти.

**Ключевые слова:** статическое оперативное запоминающее устройство (СОЗУ), резервирование, резервные столбцы, устройство встроенного саморемонта памяти (УВСР), саморемонт, самотестирование, отказоустойчивость, система на кристалле (СнК)

# Введение

Применение суб-100 нм технологических процессов становится неотъемлемой частью производства микросхем для изготовления современных высокопроизводительных систем [1]. В связи с этим неуклонно растет степень интеграции и плотность размещения элементов на кристалле. По оценкам экспертов группы Semico Research Corp элементы статических оперативных запоминающих устройств (СОЗУ) в ближайшем будущем будут занимать до 75 % площади современных систем на кристалле (СнК) [2]. На практике это значение может варьироваться от 50 до 90 % площади микросхемы. Поэтому выход годных (ВГД) и появляющиеся в процессе эксплуатации дефекты — это в первую очередь сбои и отказы элементов памяти. Выходом из этой ситуации является наличие в составе блоков статического оперативного запоминающего устройства (СОЗУ) резервных элементов.

Идея об использовании резервных элементов была высказана в конце 1960-х гг. [3], а реализована в 1970-х гг. [4]. Резервирование элементов памяти можно разбить на два основных типа: одномерное (1-D) и двухмерное (2-D). Под одномерным типом понимают резервирование строками или столбцами, а под двухмерным типом — строками и столбцами [5].

Архитектурам устройств встроенного саморемонта памяти (УВСР) с двухмерным резервированием посвящено множество работ, наиболее известной из которых является статья, описывающая алгоритм CRESTA [6]. Развитием этого подхода является методология, описанная в работе [7]. Однако нередко разработчикам приходится сталкиваться с блоками памяти, использующими одномерное резервирование [8]. В то время как существуют описанные способы применения резервных строк и анализа ремонтопригодности блоков их использующих [9], проблема реализации устройств, обеспечивающих работу только с резервными столбцами, описана недостаточно.

В данной работе приводится сравнительный анализ времени, затрачиваемого при анализе ремонтопригодности памяти с резервными столбцами с использованием шины диагностики и без нее. Предлагается реализация анализатора ремонта для резервных столбцов по примеру известного устройства для резервных строк. Также предложен новый подход тестирования памяти при принятии решения о ее ремонтопригодности, учитывающий наличие сбитых, но не отказавших ячеек памяти, названный СБ-ОТ УВСР (Сбой-Отказ УВСР).

# Преимущество шины диагностики над флагом статуса теста

Если устройство встроенного самотестирования памяти (УВСТ) не имеет выхода, отражающего поврежденный бит хранимого информационного слова, т. е. шину диагностики, то о результате теста можно судить лишь по флагу OK/FAIL, отражающему статус пройденного теста. В этом случае УВСР при отрицательном исходе теста на основных элементах придется подставлять резервный элемент перебором и ожидать положительного исхода. Этот способ предлагается авторами работы [10]. Условно этот вариант обозначается Способ 1. В работе [11] описано УВСР, работающее с блоком памяти, имеющим по одному резервному элементу для старшей и младшей частей информационного слова, хранящегося в массиве. Условно этот вариант обозначается Способ 2.

Если УВСТ имеет шину диагностики в качестве выхода, размерность которой равна размерности хранимого информационного слова, то для операции саморемонта понадобятся максимум две операции тестирования: первая — для выявления поврежденных элементов и вынесения заключения о ремонтопригодности блока памяти, а вторая, в случае если блок признан пригодным для ремонта, для проверки корректной работы памяти с резервными элементами. Условно этот вариант обозначается *Способ 3*.

Для оценки времени, необходимого для проведения операции саморемонта, рассмотрим худший случай расположения поврежденных ячеек, который обнаруживается при последней перебираемой комбинации. При использовании *Способа 1* и наличии двух резервных столбцов число максимально возможных операций самотестирования будет вычисляться по формуле

$$\frac{N(N+1)}{2} + 1,$$
 (1)

а при использовании Способа 2 по формуле

$$\left(\frac{N}{2}\right)^2 + 1, \tag{2}$$

где *N* — размерность информационного слова.

Для обоих способов прибавление единицы означает первую операцию самотестирования на основных элементах.

В табл. 1 приведены данные о максимально возможных количествах операций самотестирования трех способов при использовании двух резервных элементов.

Из данных табл. 1 можно сделать вывод, что отсутствие шины диагностики увеличивает время проведения операции саморемонта в 14...1009 раз при использовании *Способа 1* и в 8...513 раз при использовании *Способа 2*.

# УВСР с использованием шины диагностики

Как было отмечено выше, построению УВСР для одномерного способа резервирования в технической литературе уделено на порядок меньше внимания, чем для двухмерного. Более того, подробно архитектура построения анализаторов для

<b>Максимальн</b> для <b>трех спосо</b> Maximal for the thi	о возможное числ бов при использо possible quantities ree methods emplo	ю операций само вании двух резер of the self-testing ying two redundan	Таблица 1 <i>Table 1</i> <b>тестирования</b> вных элементов operations nt elements
N	Способ 1 Method 1	Способ 2 Method 2	Способ 3 Method 3
8	29	17	2
16	121	65	2
32	497	257	2
64	2017	1025	2

Элементы, используемые для реализации анализатора ремонта памяти, использующей 1-D резервирование столбцами Elements used for realization of the memory repair analyzer,

using 1-D redundancy by columns

Элемент Elements	Количество, шт Number, pieces	Размерность (для регистров), бит Dimension (for the registers), bit
ДШ (ШДг — АПЭ) DC (DB — ADE)	1	
2-вх-XOR 2-input-XOR	$([\log_2 N] + 1)^* p$	
$([log_2N] + 1)$ -BX-OR $([log_2N] + 1)$ -input-OR	р	
<i>p</i> -вх-OR <i>p</i> -input-OR	1	
СПЭ СDЕ	1	$[\log_2 N] + 1$
ДШ (СПЭ — РЗ АПЭ) <i>DC (CDE — RR ADE)</i>	1	
АПЭ ADE	р	$[\log_2 N] + 1$
<i>n</i> -вх-MUX(р в 1) <i>n- input-MUX(р in 1)</i>	1	
ДШ (АПЭ — КРЭ) <i>D (ADE — RER)</i>	1	
n-вх-DMUX(1 в p) n- input-DMUX(1 in p)	1	
A <sub>p</sub> KPЭ A <sub>x</sub> RER	р	$[\log_2 N] + 2$

резервных столбцов практически не описана, за исключением схем накопления информации об ошибках и способах обхода поврежденных ячеек памяти [12].

В качестве основы для построения УВСР с резервными столбцами выбрано устройство, предназначенное для саморемонта памяти с резервными строками [13].

Основными структурными частями УВСР являются:

- управляющее устройство (УУ), реализованное в виде конечного автомата (КА);
- УВСТ с выходной шиной диагностики;
- анализатор ремонта.

В патенте [13] также приводится список устройств, из которых состоит анализатор ремонта:

- счетчик поврежденных элементов (СПЭ);
- регистры, хранящие адреса поврежденных элементов (АПЭ);
- регистры активации резервных элементов (А<sub>v</sub>КРЭ).

Однако подробно архитектура анализатора автором не рассмотрена. Поэтому в табл. 2 приведен список составных частей, используемых для реализации анализатора ремонта памяти, применяющей 1-D резервирование столбцами. Для регистров дополнительно будет указана размерность, исходя из того, что *n* — размерность информационного слова, хранящегося в памяти, а *p* — число резервных столбцов. Аббревиатуры, используемые в табл. 2:

- шина диагностики ШДг;
- разрешение записи РЗ;
- дешифратор ДШ.

На рисунке приведена схема анализатора ремонта памяти, использующей 1-D резервирование столбцами.

Представлен анализатор ремонта для памяти, которая имеет два резервных столбца. Реализация для иного числа резервных столбцов достигается введением дополнительных элементов, имеющих индекс на схеме. Далее кратко изложен принцип работы анализатора.

В ходе тестирования памяти на ШДг могут появляться флаги ошибок, детектированных УВСТ. С помощью дешифратора (ШДг – АПЭ) генерируется адрес поврежденного элемента (столбца). Затем сгенерированный АПЭ попадает на р блоков, каждый из которых содержит ( $[log_2N] + 1$ )-2-входовых элементов XOR. На рисунке в целях компактного отображения для каждой группы обозначен один элемент XOR. Если сгенерированный АПЭ еще не был записан в регистры анализатора, то хотя бы один результат операции XOR будет содержать логическую единицу. Поэтому хотя бы один из ( $[log_2N] + 1$ )-входовых элементов OR будет на выходе иметь логическую единицу и это послужит сигналом разрешения записи СПЭ (РЗ СПЭ) и СПЭ инкрементируется. Далее, в соответствии



**Схема анализатора ремонта памяти, использующей 1-D резервирование столбцами** *Circuit of the memory repair analyzer using 1-D redundancy by columns* 

со значением СПЭ, будет сгенерирован сигнал РЗ АПЭ в один из АПЭ.

Затем в соответствии с СПЭ мультиплексором будет выбран новый АПЭ для генерации новой конфигурации резервных элементов, которая будет записана в соответствующий А, КРЭ.

# УВСР, учитывающее вероятность наличия сбитой, но не отказавшей ячейки памяти — СБ-ОТ УВСР

Несмотря на большое число публикаций, посвященных проблеме саморемонта памяти, не рассмотренной остается проблема обнаружения сбитой, но не отказавшей ячейки памяти в ходе операции тестирования для дальнейшей операции ремонта.

Существуют работы, посвященные схожей проблеме возникновения отказавших или сбитых ячеек памяти, однако речь в них идет о моменте активной работы, когда осуществить замену невозможно. В этих случаях на помощь приходят устройства на базе кодов обнаружения и коррекции ошибок (ЕСС). Эффект от совместного использования резервных элементов и ЕСС назван синергетическим [14]. Одним из способов совместного использования резервных элементов и ЕСС является классификация обнаруженных в ходе тестирования ошибок на корректирующиеся с помощью ЕСС и некорректирующиеся [15].

Известные алгоритмы проведения операции саморемонта основывают свое решение о наличии отказавшей ячейки памяти только по результатам

> одного тестирования. Однако, если ошибку вызвала ячейка на самом деле не отказавшая, то восстановить ее работу можно простой перезаписью [16]. Таким образом, память, которая могла бы быть ошибочно признана негодной в результате обнаружения сбитой, но не отказавшей ячейки памяти, будет признана годной или пригодной для ремонта. Ремонт будет проводиться только для отказавших ячеек памяти.

> В основу алгоритма СБ-ОТ УВСР положена идея о повторном проведении тестирования как для первой стадии, на которой память признается исправной, годной или негодной для ремонта, так и для второй стадии, во время которой подтверждается корректность работы памяти с резервными элементами. Число тестирований памяти в зависимости от исходов может варьироваться от двух до четырех.

Первое тестирование проводится для основных элементов. Если тест пройден успешно, то память будет сконфигурирована для работы с резервными элементами. Если тест завершился с ошибкой, то память с числом поврежденных элементов, которое не превышает числа резервных элементов, будет сконфигурирована для работы с резервными элементами. Если число поврежденных элементов превышает число резервных, то для памяти будет проведено второе тестирование для исключения сбитых элементов.

Второе тестирование памяти с исправными основными элементами проводится для проверки резервных элементов. В случае его успешного прохождения все (основные и резервные) элементы признаются исправными, иначе будет проведено третье тестирование для исключения возможности наличия сбитых ячеек в резервных элементах.

Для случая обнаружения в ходе первого тестирования числа поврежденных элементов, не превышающего число резервных элементов, второе тестирование проводится для проверки корректности работы резервных элементов на месте отказавших. В случае его успешного прохождения комбинация основных и резервных элементов признается исправной, в противном случае необходимо провести третье тестирование для исключения возможности наличия сбитых ячеек в резервных элементах.

Для случая обнаружения в ходе первого тестирования поврежденных элементов в количестве, превышающем число резервных элементов, второе тестирование проводится вновь для основных элементов, чтобы исключить возможность наличия сбитых ячеек. В случае его успешного прохождения будет продублирован сценарий тестирования памяти с исправными основными элементами. Иначе проверяется число поврежденных элементов. Если их число опять превышает число резервных элементов, то память признается неисправной, но если нет, то будет инициировано третье тестирование для комбинации основных и резервных элементов.

Третье тестирование для случая успешного теста основных элементов и неуспешного теста комбинации основных и резервных элементов проводится для исключения возможности наличия сбитых ячеек в резервных элементах. Если тест завершен с положительным статусом, то все (основные и резервные) элементы признаются исправными, иначе исправными признаются только основные элементы.

Для случая неудачного тестирования комбинации основных и резервных элементов при второй итерации третье тестирование проводится для исключения возможности наличия сбитых ячеек в резервных элементах. Если тест завершен с положительным статусом, то комбинация основных и резервных элементов признается исправной, иначе блок считается неработоспособным.

Для случая обнаружения числа ошибок, не превышающего число резервных элементов, при втором тестировании третья итерация проводится для комбинации основных и резервных элементов. В случае его успешного прохождения комбинация основных и резервных элементов признается исправной, в противном случае необходимо провести четвертое тестирование для исключения возможности наличия сбитых ячеек в резервных элементах. Если оно завершается успешно, то комбинация основных и резервных элементов признается исправной, иначе блок признается неработоспособным.

## Моделирование и анализ результатов

Для исследования характеристик предложенных УВСР были разработаны модели на языке Verilog HDL. Для оценки занимаемой на кристалле площади и максимальной задержки распространения сигнала были выбраны УВСР, предназначенные для работы с блоками памяти, хранящими информационные слова наиболее распространенных размерностей: 8, 16, 32 и 64 бит. Был проведен синтез разработанных устройств в САПР Cadence Encounter RTL Compiler для проектно-технологической нормы 28 нм КМОП при нормальных условиях эксплуатации ( $V_{пит} = 1,0$  В, T = 25 °C). В табл. 3—6 приведены экспериментальные данные.

По полученным данным составлена табл. 7, демонстрирующая максимальное увеличение задержки прохождения сигнала и площади для каждой из рассматриваемых размерностей информационного слова.

> Таблица 3 *Table 3*

DISK for the memory and storing o agai information word					
Dependentia	YBCP (без CБ-OT) BISR (without D-NF		СБ-ОТ УВСР D-NF BISR		
столбцы, шт Redundant columns, pieces	Макс. задержка, пс <i>Maximal</i> delay, ps	Площадь, <sub>МКМ<sup>2</sup></sub> <i>Area,</i> µm <sup>2</sup>	Макс. задержка, пс <i>Maximal</i> delay, ps	Площадь, мкм <sup>2</sup> <i>Area,</i> µm <sup>2</sup>	
1	504	468	509	561	
2	539	513	542	631	
3	578	630	586	754	
4	624	721	628	845	
5	636	793	638	915	

VBCP для блока памяти, хранящего 8-разрядное информационное слово BISR for the memory unit storing 8-digit information word

Таблица 4 *Table 4* 

УВСР для блока памяти,	
хранящего 16-разрядное информационное слово	
BISR for the memory unit storing 16-digit information we	ord

Резервные	УВСР (без СБ-ОТ) BISR (without D-NF)		СБ-ОТ УВСР D-NF BISR	
столбцы, шт Redundant columns, pieces	Макс. за- держка, пс <i>Maximal</i> delay, ps	Площадь, мкм <sup>2</sup> <i>Area,</i> µm <sup>2</sup>	Макс. за- держка, пс <i>Maximal</i> <i>delay, ps</i>	Площадь, мкм <sup>2</sup> <i>Area,</i> µm <sup>2</sup>
1 2 4 8 10	609 652 701 758 782	637 739 957 1372 1619	596 651 715 756 788	725 848 1093 1591 1834

Таблица 5 *Table 5* 

УВСР для блока памяти, хранящего 32-разрядное информационное слово BISR for the memory unit storing 32-bit information word

Резервные	УВСР (без СБ-ОТ) BISR (without D-NF)		СБ-ОТ УВСР D-NF BISR	
столбцы, шт Redundant columns, pieces	Макс. за- держка, пс <i>Maximal</i> delay, ps	Площадь, мкм <sup>2</sup> <i>Area,</i> µm <sup>2</sup>	Макс. за- держка, пс <i>Maximal</i> delay, ps	Площадь, мкм <sup>2</sup> <i>Area,</i> µm <sup>2</sup>
1 2 4 8 10	666 706 759 829 838	1041 1165 1372 1912 2236	664 705 782 827 852	1185 1273 1488 1922 2248

Таблица 6 *Table 6* 

УВСР для блока памяти, хранящего 64-разрядное информационное слово BISR for the memory unit storing 64-digit information word

УВСР (без		з CБ-OT)	СБ-ОТ УВСР	
Peзepвные BISR (witho		hout D-NF)	D-NF BISR	
столбцы, шт <i>Redundant</i> columns, pieces	Макс. за- держка, пс <i>Maximal</i> <i>delay, ps</i>	Площадь, мкм <sup>2</sup> <i>Area,</i> µm <sup>2</sup>	Макс. за- держка, пс <i>Maximal</i> <i>delay, ps</i>	Площадь, мкм <sup>2</sup> <i>Area,</i> µm <sup>2</sup>
1	728	1577	732	1630
2	782	1739	787	1835
4	848	1983	859	2031
8	898	2566	908	2572
14	951	3535	962	3551

Таблица 7

Table 7

# Максимальные значения увеличения задержки прохождения сигнала и площади

Maximal values of the increase of the delay of a signal passage and the area

Размерность	Увеличение	Увеличение
информационного слова	задержки, %	площади, %
Dimension	Increase	Increase
of the information word	of the delay, %	of the delay, %
8	1,4	23,0
16	2,0	16,0
32	3,0	13,8
64	1,3	5,5

# Заключение

В данной работе рассмотрена архитектура устройств встроенного саморемонта памяти с использованием диагностической информации. Представлены данные о времени выполнения операции саморемонта с использованием диагностической информации и без нее. Показано, что в зависимости от способа замены основных элементов резервными преимущество по времени может достигать 1000 раз.

Также представлена архитектура анализатора ремонта резервных столбцов, базирующаяся на известной архитектуре для резервных строк. На ее основе предложен новый алгоритм, названный СБ-ОТ УВСР, учитывающий вероятность наличия сбитой, но не отказавшей ячейки памяти. Это может повысить выход годных устройств за счет признания работоспособными микросхем, содержащих сбитые, но не отказавшие ячейки памяти. Показано, что рост задержки прохождения сигнала при реализации СБ-ОТ УВСР составляет до 3 %, а увеличение площади — до 23 %.

## Список литературы

1. Бобков С. Г. Высокопроизводительные вычислительные системы / Под ред. акад. РАН В. Б. Бетелина. М.: НИИСИ РАН, 2014. 296 с.

2. URL: http://www.semico.com/content/worldwide-soc-market-forecast-approach-200-billion-2019-says-semico-research (дата обращения: 29.07.2017).

3. **Tammaru E., Angell J. B.** Redundancy for LSI Yield Enhancement // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1967. Vol. 2, N. 4. P. 172–182.

4. Cenker R. P., Clemons D. G., Huber W. R. et al. A faulttolerant 64K dynamic RAM // IEEE International Solid-State Circuits Conference. 1979. Vol. 22. P. 150–151.

5. Lu S.-K., Huang S.-C. Built-in Self-Test and Repair (BISTR) Techniques for Embedded RAMs // Records of the 2004 International Workshop on Memory Technology, Design and Testing. 2004. P. 60–64.

6. **Kawagoe T., Ohtani J., Niiro M.** et al. A built-in self-repair analyzer (CRESTA) for embedded DRAMs // Proc. of International Test Conference. 2000. P. 567–574.

7. **Саргсян В. К.** Методология проектирования встроенных анализаторов ремонта памяти // Фундаментальные исследования. 2015. № 5–2. С. 335–339.

8. Kim I., Zorian Y., Komoriya G. et al. Built-in self repair for embedded high density SRAM // Proc. International Test Conference. 1998. P. 1112–1119.

9. Niggemeyer D., Otterstedt J., Redeker M. A Defect-Tolerant DRAM employing a Hierarchical Redundancy Scheme Built-In Self-Test and Self-Reconfiguration // IEEE International Workshop on Memory Technology-Design and Testing. 1997. P. 33–40.

10. Nordholz P., Otterstedt J., Niggemeyer D. A Defect-Tolerant Word-Oriented Static RAM with Built-In Self-Test and Self-Reconfiguration // 8th Annual IEEE International Conference of Innovative Systems In Silicon. 1996. P. 124–132.

11. Щигорев Л. А. Организация саморемонта блоков статической оперативной памяти с резервными элементами //

Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2016: Сб. трудов / Под общ. ред. акад. РАН А. Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2016. Ч. III. С. 178—185.

12. Nicolaidis M., Achouri N., Boutobza S. Optimal reconfiguration functions for column of data-bit built-in self-repair // Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition. Proc. 2003. P. 590–595.

13. Huang J. Built-in self-repair wrapper methodology, design flow and design architecture. US Patent  $N_{2}$  6691264 B2. 10.02.2004. Int. CI 11C 29/00, G11C 7/00.

14. Horiguchi M., Itoh K. Nanoscale Memory Repair. NY: Springer, 2011. 215 p.

15. Lu S.-K., Tsai C.-J., Hasizume M. Enhanced Built-In Self-Repair Techniques for Improving Fabrication Yield and Reliability of Embedded Memories // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems. 2016. Vol. 24, N. 8. P. 2726–2734.

16. Sridharan V., Liberty D. A study of DRAM failures in the field // International Conference for High Performance Computing Networking Storage and Analysis. IEEE, 2012. P. 1–11.

L. A. Shchigorev, Post-Graduate Student, National Research Nuclear University "MEPhI", Senior Engineer, Research Center "Module", e-mail: l.shchigorev@module.ru

#### Corresponding author:

Shchigorev Leonid A., Post-Graduate Student, National Research, Moscow, 115409, Russian Federation Nuclear University "MEPhI", e-mail: l.shchigorev@module.ru

# Built-in Self-Repair Application of a Diagnostic Bus

Received on August 30, 2017 Accepted on September 22, 2017

Memory elements are the most dominating elements in the modern system-on-chips. Usually redundant elements are used for yield improvement after manufacturing testing. This article is devoted to the repair of static random access memory with redundant elements, more precisely, with redundant columns.

The 2-D redundancy problem has received much more attention than 1-D one. Furthermore, analyzer architecture for 1-D column redundancy can be hardly found in articles. That's why this article proposes analyzer architecture for 1-D column redundancy on the basis of well known 1-D row redundancy architecture.

Moreover, a new TEPE (transient error — permanent error) BISR approach is provided. Its main goal is a new algorithm, which is able to distinguish transient errors from permanent errors. It's important for manufacturing testing for yield improvement not to recognize chips with transient errors as a useless device.

For the investigation, the most popular word widths were selected: 8, 16, 32 and 64 bits. The simulation results show that the maximum difference between TEPE and non-TEPE variants does not exceed 3 % for arrival time and 23 % for area.

**Keywords:** static random access memory (SRAM), redundancy, redundant columns, built-in self-repair (BISR), built-in self-test (BIST), fault tolerance, system on chip (SoC)

#### For citation:

Shchigorev L. A. Built-in Self-Repair Application of a Diagnostic Bus, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 98–106.

DOI: 10.17587/nmst.20.98-106

## Introduction

Application of sub-100-nm technological processes is an integral part of the production of microcircuits for manufacturing of modern highly efficient systems [1]. In this connection the degree of integration and density of placement of elements on a crystal grows steadily. According to experts from Semico Research Corp., in near future the elements of the static random access memory (SRAM) will occupy up to 75 % of the area of a system on chip (SoC) [2]. In practice this value can vary from 50 up to 90 % of the area of a microcircuit. Therefore, a product yield (PY) and the defects appearing in the process of operation are first of all failures of the memory elements. A way out from this situation is the presence of the redundant elements in the composition of the units of a static operative memory (SRAM).

The idea to use the redundant elements was expressed in the late 1960s [3], and realized in 1970s [4]. Redundancy of the memory elements can be divided into two basic types: one-dimensional (1-D) and two-dimensional (2-D). The one-dimensional type envisages reservation by lines or columns, and the two-dimensional one — by lines and columns [5].

A big number of works were devoted to the architectures of the devices of the built in self-repair memory (BISR) with two-dimensional redundancy, the most known of them is the article describing CRESTA algorithm [6]. The methodology described in [7] is the development of this approach. However, quite often the developers have to face the memory units using the one-dimensional redundancy [8]. Meanwhile, there are the above mentioned methods for application of the redundant lines and analysis of the repairability of the units, which use them [9], the problem of realization of the devices, which ensure operation only with the redundant columns, has not been described sufficiently enough.

The given work presents an analysis of the time spent during an analysis of maintainability of the memory with redundant columns, with the use of a diagnostics bus and without it. The author proposes realization of an analyzer for repair of the redundant columns in accordance with the example of the known device for the redundant lines, and a new approach to testing of memory during decision-making concerning its maintainability, considering the presence of the damaged, but not failed memory cells, dubbed as D-NF BISR (Damaged-Not Failed BISR).

# Advantage of the diagnostics bus over the flag status test

If the device of the built in self-test memory (BIST) has no output reflecting the damaged bit of the stored information word, i.e. diagnostics bus, it is possible to judge about the result of a test by OK/FAIL flag reflecting the status of the passed test. In this case, BISR at a negative outcome of the test on the basic elements will have to substitute a redundant element by a search and expect a positive outcome. This method is proposed by the authors [10]. Conditionally, the variant is designated as *Method 1*. In [11] BISR is described, working with a memory unit having one redundant element for the senior part and one for the junior part of the information word, stored in an array. Conditionally the variant is designated as *Method 2*.

If BIST has diagnostics bus as an output, the dimension of which is equal to the dimension of the stored information word, a self-repair will require maximum two testing operations: one — for detection of the damaged elements and making a conclusion about the repairability of the memory unit, and the second one — for checking of the correctness of operation of the memory with the redundant elements. Conditionally this variant is designated as *Method 3*.

For estimation of the time necessary for carrying out of a self-repair operation we will consider the worst case of arrangement of the damaged cells, which is detected during the last considered combination. If *Method 1* is used and there are two redundant columns, the number of the greatest possible operations of self-testing will be calculated under the following formula

$$\frac{N(N+1)}{2} + 1,$$
 (1)

and if *Method 2* is used — then under the following formula

$$\left(\frac{N}{2}\right)^2 + 1, \tag{2}$$

where N — dimension of the information word.

For both methods addition of one means the first operation of self-testing on the basic elements.

Table 1 presents data about the greatest possible quantities of self-testing operations of the three methods in case two redundant elements are used.

From the data it is possible to draw a conclusion that absence of a bus of diagnostics increases the period of time for carrying out of a self-repair operation 14...1009 times when *Method 1* is used and 8...513 times when *Method 2* is used.

# BISR with the use of the bus of diagnostics

As it was noted above, the construction of BISR for the one-dimensional method of redundancy in the technical literature attracted roughly 10 times less attention, than for the two-dimensional one. Moreover, in detail the architecture for construction of the analyzers for the redundant columns was practically not described, except for the circuits for accumulation of information concerning the errors and the methods of detour of the damaged memory cells [12].

As a basis for construction of BISR with the redundant columns a device intended for self-repair of memory with the redundant lines [13] was chosen.

The basic structural parts of BISR are the following:

- Control device (CD), realized in the form of the finite state machine (FSM);
- BIST with the output bus of diagnostics;
- Repair analyzer.

In [13] a list of devices is also presented, of which the repair analyzer consists:

- Counter of the damaged elements (CDE);
- Registers storing the addresses of the damaged elements (ADE);
- Registers for activation of the redundant elements (A<sub>x</sub>RER).

However in detail the architecture of the analyzer was not considered by the author. Therefore table 2 presents a list of components for realization of the memory repair analyzer applying 1-D redundancy by columns. In addition for the registers the dimension will be specified, proceeding from the fact that that n — dimension of the information word stored in the memory, and p — number of the redundant columns. Below are the abbreviations used in table 2:

- diagnostics bus DB;
- write enable WE;
- decoder DC.

The figure presents the circuit of the memory repair analyzer the using 1-D redundancy by columns.

The memory repair analyzer with two redundant columns is presented. Realization for another number of the redundant columns is reached by introduction of the additional elements having an index in the circuit. Further, its principle of operation is presented briefly.

During memory testing on DB the flags of the errors can appear detected by BIST. By means of the decoder (DB - ADE) the address of the damaged element (column) is generated. Then the generated ADE comes to p of the units, each of which contains  $(\log_2 N + 1)$ -2-input elements of XOR. For a compact display the figure presents one XOR element for each group. If the generated ADE has not been recorded yet by the analyzer registers, then at least one result of XOR operation will contain a logic unit. Therefore, at least one of  $([\log_2 N] + 1)$ -input OR elements will have a logic unit at the output and this will serve as an enable signal for recording of CDE (WE CDE) and CDE is incremented. Further, according to the value of CDE, the enable signal of recording will be generated in one of ADE (WE ADE).

Then, in accordance with CDE multiplexer a new ADE will be selected for generation of a new configuration of the redundant elements, which will be recorded in the corresponding  $A_x$ RER.

# BISR, taking into account the probability of the presence of a damaged, but not failed memory cell — D-NT BISR

Notwithstanding a big number of the publications devoted to the problem of the memory self-repair, the problem of detection of a damaged, but not failed memory cell during operation of testing for the further repair operation still has not been considered.

There are the works devoted to a similar problem of occurrence of the failed or damaged memory cells, however, they deal with the moment of an active work, when a replacement is impossible. In those cases of great assistance are the devices on the basis of the codes for detection and correction of mistakes (ECC). The effect from a joint use of the redundant elements and ECC is called a synergetic effect [14]. One of the methods for sharing of the redundant elements and ECC is classification of the errors detected during testing into correctable by means of ECC and noncorrectable ones [15].

The known algorithms for carrying out of a self-repair operation base their solution on the presence of a failed memory cell only by the results of one testing. However, if the error was caused by a cell, which actually did not fail, then it is possible to restore its operation by a simple rerecording [16]. Thus, a memory, which could be wrongly recognized as unfit as a result of detection of a damaged, but not failed memory cell, will be recognized as suitable or fit for repair. A repair will be ensured only for the failed memory cells.

The D-NF BISR algorithm is based on the idea about a repeated carrying out of testing both for the first stage, at which the memory is recognized as serviceable, suitable or unusable for repair, and for the second stage, during which the correctness of the work of the memory with the redundant elements is proved. Depending on the outcome, the number of the memory testings can vary from 2 up to 4.

The first testing is done for the basic elements. If the test is passed successfully, the memory will be configured for work with the redundant elements. If the test comes to the end with an error, the memory with the number of the damaged elements which does not exceed the number of the redundant elements, will be configured for work with the redundant elements. If the number of the damaged elements exceeds the number of the redundant ones, the memory will be tested for second time in order to exclude the damaged elements.

The second testing of the memory with the serviceable basic elements is done for checking of the redundant elements. If it is passed successfully, all the elements (both the basic and the redundant ones) are recognized as serviceable, otherwise, the third testing will be done in order to exclude the presence of the damaged cells in the redundant elements.

During the first testing for detection of the number of the damaged elements, which does not exceed the number of the redundant elements, the second testing is done for checking of the correctness of work of the redundant elements on the places of the failed ones. If it is passed successfully, the combination of the basic and the redundant elements is recognized as serviceable, otherwise, it is necessary to undertake the third testing in order to exclude the presence of the damaged cells in the redundant elements.

During the first testing for detection of the damaged elements in the quantity exceeding the number of the redundant elements, the second testing is done again for the basic elements in order to exclude the presence of the damaged cells. If it is passed successfully, the scenario of the memory testing with the serviceable basic elements will be duplicated. Otherwise, the number of the damaged elements is checked. If again their number exceeds the number of the redundant elements, the memory is recognized as faulty, if not, the third testing will be initiated for a combination of the basic elements and the redundant elements.

The third testing for the successful test of the basic elements and the unsuccessful test of a combination of the basic elements and the redundant elements is done in order to exclude the presence of the damaged cells in the redundant elements. If the test is finished with a positive result, all the elements (the basic and the redundant ones) are recognized as serviceable, otherwise, only the basic elements are recognized as serviceable.

For an unsuccessful testing of the combination of the basic elements and the redundant elements during the second iteration, the third testing is done in order to exclude the presence of the damaged cells in the redundant elements. If the test is finished with a positive status, the combination of the basic elements and the redundant elements is recognized as serviceable, otherwise the unit is considered inoperative.

For detection of the number of errors, which does not exceed the number of the redundant elements, during the second testing, the third iteration is done for a combination of the basic and the redundant elements. In case of its successful passage the combination of the basic elements and the redundant elements is recognized as serviceable, otherwise, it is necessary to undertake the fourth testing in order to exclude a possibility of presence of the damaged cells in the redundant elements. If it comes to the end successfully, the combination of the basic elements and the redundant elements is recognized as serviceable, otherwise, the unit is recognized as unserviceable.

# Modeling and analysis of the results

For research of the characteristics offered by BISR models in Verilog HDL language were developed. For estimation of the area occupied on a crystal and the maximal delay in distribution of a signal, the BISR were selected, intended for work with the memory units, storing the information words of the most widespread dimensions: 8, 16, 32 and 64 bits. A synthesis was done of the developed devices in CAD Cadence Encounter RTL Compiler for the design-technological norm of 28 nm of CMOS under normal conditions of operation ( $V_{\Pi MT} = 1.0 \text{ V}, T = 25 \text{ °C}$ ). Tables 3–6 present the experimental data.

The received data are presented in table 7 demonstrating the maximal increase of the delay of a signal passage and the area for each of the considered dimensions of the information word.

## Conclusions

The given work presents the architecture of the devices of the built in memory self-repair employing the diagnostic information, and the data about the time of performance of a self-repair operation, with the use of the diagnostic information and without it. It also demonstrates that, depending on the method of replacement of the basic elements with the redundant ones, the advantage in time can reach 1000 times.

The article also presents the architecture of the analyzer for repair of the redundant columns, based on the known architecture for the redundant lines. On its basis a new algorithm is offered called D-NF BISR, taking into account the probability of presence of a damaged, but not failed memory cell. This can raise the output of the suitable devices due to recognition as efficient the microcircuits containing the damaged, but not failed memory cells. It shows that the growth of the delay in the passage of a signal during realization of D-NF BISR is up to 3 %, and the increase of the area is up to 23 %.

#### References

1. **Bobkov S. G.** Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy / pod red. akademika RAN V. B. Betelina. M.: NIISI RAN, 2014. 296 s. (in Russian).

2. **URL:** http://www.semico.com/content/worldwide-socmarket-forecast-approach-200-billion-2019-says-semico-research (access 29.07.2017)

3. Tammaru E., Angell J. B. Redundancy for LSI Yield Enhancement, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1967, vol. 2, no. 4, pp. 172–182.

4. Cenker R. P., Clemons D. G., Huber W. R. et al. A faulttolerant 64K dynamic RAM, IEEE International Solid-State Circuits Conference, 1979, vol. 22, pp. 150–151.

5. Lu S.-K., Huang S.-C. Built-in Self-Test and Repair (BISTR) Techniques for Embedded RAMs, *Records of the 2004 International Workshop on Memory Technology, Design and Testing*, 2004, pp. 60–64.

6. Kawagoe T., Ohtani J., Niiro M. et al. A built-in self-repair analyzer (CRESTA) for embedded DRAMs, *Proc. of International Test Conference*, 2000, pp. 567–574.

7. Sargsjan V. K. Metodologija proektirovanija vstroennyh analizatorov remonta pamjati, *Fundamental'nye issledovanija*, 2015, no. 5-2, pp. 335–339 (in Russian).

8. Kim I., Zorian Y., Komoriya G. et al. Built-in self repair for embedded high density SRAM, *Proc. International Test Conference*, 1998, pp. 1112–1119.

9. Niggemeyer D., Otterstedt J., Redeker M. A Defect-Tolerant DRAM employing a Hierarchical Redundancy Scheme Built-In Self-Test and Self-Reconfiguration, *IEEE International Workshop on Memory Technology-Design and Testing*, 1997, pp. 33–40.

10. Nordholz P., Otterstedt J., Niggemeyer D. A Defect-Tolerant Word-Oriented Static RAM with Built-In Self-Test and Self-Reconfiguration, *8th Annual IEEE International Conference of Innovative Systems In Silicon*, 1996, pp. 124–132.

11. Shchigorev L. A. Organizacija samoremonta blokov staticheskoj operativnoj pamjati s rezervnymi jelementami, *Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanojelektronnyh sistem-2016*, Sb. trudov., pod obshch. red. akad. RAN A. L. Stempkovskogo. Moscow, IPPM RAN, 2016, part III, pp. 178–185 (in Russian).

12. Nicolaidis M., Achouri N., Boutobza S. Optimal reconfiguration functions for column of data-bit built-in self-repair, *Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition. Proc.*, 2003, pp. 590–595.

13. **Huang J.** Built-in self-repair wrapper methodology, design flow and design architecture, US Patent № 6691264 B2, 10.02.2004. Int. CI 11C 29/00, G11C 7/00.

14. Horiguchi M., Itoh K. Nanoscale Memory Repair. NY: Springer, 2011. 215 p.

15. Lu S.-K., Tsai C.-J., Hasizume M. Enhanced Built-In Self-Repair Techniques for Improving Fabrication Yield and Reliability of Embedded Memories, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 2016, vol. 24, no. 8, pp. 2726–2734.

16. Sridharan V., Liberty D. A study of DRAM failures in the field, *International Conference for High Performance Computing Networking Storage and Analysis, IEEE*, 2012, pp. 1–11.

# Применение MHCT *Application of* MNST

УДК 537.533.2

# DOI: 10.17587/nmst.20.107-110

**П. А. Ерошкин**, мл. науч. сотр., e-mail: eroshkin.pavel@gmail.com, **Е. Ю. Петрунин**, мл. науч. сотр., **Е. П. Шешин**, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: sheshin.ep@mipt.ru, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

"Московский физико-технический институт (государственный университет)", г. Долгопрудный

# РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА ДЛЯ ИОНИЗАЦИИ ГАЗОВ

## Поступила в редакцию 23.08.2017

Предложена конструкция электронной пушки с автоэмиссионным катодом на основе остеклованного пучка полиакрилонитрильных углеродных волокон для рентгеновской трубки. Проведено моделирование электронной системы и выявлены оптимальные параметры конструкции. Изготовлен прототип рентгеновской трубки с предложенной электронной пушкой.

**Ключевые слова:** рентгеновская трубка, автоэлектронная эмиссия, наноструктурированные углеодные материалы, углеродные волокна

# Введение

В настоящее время микрофокусные рентгеновские трубки и портативная аппаратура на их основе являются эффективным средством исследования строения различных объектов на микроуровне [1]. Они используются для микротомографии, микродефектоскопии, диагностики качества промышленных изделий, кристаллографических исследований, медицинской диагностики, обнаружения взрывчатых веществ и других целей. В развитии микрофокусных рентгеновских трубок наблюдается тенденция к созданию специализированных конструкций, в максимальной степени соответствующих требованиям конкретных исследований [2].

Наиболее распространенный тип современных микрофокусных рентгеновских трубок — приборы с прострельным анодом, не имеющим специальных охладителей. Одно из перспективных направлений развития приборов с прострельным анодом дальнейшее увеличение напряжения и мощности при сокращении размеров фокусного пятна, увеличении эффективности трубки и уменьшении ее размеров. Этого можно добиться путем замены термокатодов на автоэмиссионные катоды на основе углеродных материалов [3].

# Электронная пушка

При выборе подходящей конструкции катодномодуляторного узла (КМУ) с катодом на основе полиакрилонитрильных углеродных волокон во внимание принималась возможная простота и технологичность изготовления всего устройства.

Для определения и утверждения всех межэлектродных расстояний (рис. 1) было проведено моделирование электронно-оптической системы рентгеновской трубки, включая распределение потенциала и траектории электронов [4].



Рис. 1. Подбор геометрических параметров электронно-оптической системы: *D* — диаметр диафрагмы модулятора; *L* — расстояние от модулятора до люминесцентного экрана анода; *H* — глубина расположения автокатода

Fig. 1. Selection of the geometrical parameters of the electron-optical system: D — diameter of the diaphragm of the modulator; L — distance from the modulator to the luminescent screen of the anode; H — depth of the arrangement of the autocathode



Рис. 2. Эмиссионные характеристики разработанной электронной пушки и автоэмиссионное изображение распределения потока электронов на аноде

Fig. 2. Emission characteristics of the developed electron gun and an autoemission image of the distribution of the electron flow on the anode

Полученные расчетные данные позволяют уверенно полагать, что спроектированная электронная пушка удовлетворяет всем следующим предъявленным к ней требованиям (тестирование катодно-модуляторного узла, собранного по расчетным параметрам, также подтверждает это):

- достигнуто полное отсутствие перехвата автоэмиссионного тока на управляющем электроде, расчетные траектории движения электронов даже не касаются модулятора (сила тока модулятора, измеренная при рабочих напряжениях на электродах и токе катода I<sub>K</sub> = 100 мкА, составляет I<sub>M</sub> < 0,5 мкА);</li>
- автоэлектроны практически не могут попасть на вертикальную стенку внутренней поверхности стеклооболочки трубки. Только вблизи анода они попадают на стенку трубки, но эта ситуация разрешается напылением дополнительного обода из алюминия, что было учтено при моделировании (тестирование КМУ показало, что электроны не попадают на стенку лампы);
- весь электронный поток, попадая на анод, должен засвечивать практически всю область с нанесенным люминофором (при тестировании пробного КМУ автоэмиссионное изображение действительно занимало всю люминесцентную область анода);
- расчетная область вольт-амперной характеристики спроектированного KMУ укладывается в границы модуляторного напряжения  $U_{\rm M} < 1500$  В (измерения вольт-амперных характеристик KMУ показали, что при токе  $I_{\rm K} = 100$  мкА и напряжении на аноде  $U_{\rm a} = 10$  кВ значение модуляторного напряжения составило  $U_{\rm M} = 1,2$  кВ).

В ходе экспериментов было отмечено, что несмотря на различную микрогеометрию волокон на разных катодах смещение вольт-амперной характеристики в область больших или меньших напряжений на управляющем электроде является минимальным, что также указывается в других работах [5, 6]. На рис. 2 приведены характерные эмиссионные характеристики электронной пушки.

# Прототип рентгеновской трубки с автоэмиссионным катодом

Разработанная на первом этапе работы электронная пушка на основе полиакрилонитрильных углеродных волокон была применена при изготовлении рабочих прототипов рентгеновской трубки. За основу конструкции была взята серийная рентгеновская трубка БХ-2 производства ЗАО "Светлана-Рентген" (г. Санкт-Петербург, Россия). Конструкция анодной группы при изготовлении прототипов была взята с лампы БХ-2 без изменений. Цокольная часть лампы и нижняя половина корпуса выполнены из стекла. Внутри готовых устройств в целях поддержания приемлемого уровня вакуума установлены нераспыляемые геттеры на основе титана. Вид рабочего прототипа представлен на рис. 3.

Для проверки работоспособности ламп и выяснения, удовлетворяют ли они поставленным задачам, было проведено два эксперимента.

В первом эксперименте в качестве внешнего слоя применяли зеленый люминофор, активируемый рентгеновским излучением лампы в различных режимах работы. Изображение визуально



**Рис. 3. Вид рабочего прототипа рентгеновской трубки с автокатодом** *Fig. 3. View of the working prototype of the x-ray tube with the autocathode* 

сравнивалось с аналогичными изображениями для серийной трубки БХ-2 производства ЗАО "Светлана-Рентген", получаемыми параллельно. Помимо этого, вольт-амперные характеристики прототипов были сверены с характеристикой, снятой для КМУ на первом этапе работы. Внимательное изучение и сравнение картин свечения позволяет сделать вывод, что рабочие прототипы на данный момент не уступают серийному образцу. Во втором эксперименте была исследована ионизирующая сила выходного излучения прототипов с использованием ионизационной камеры. По результатам эксперимента ионизирующая сила излучения оценена как удовлетворяющая условиям поставленной задачи, не уступающая серийным образцам производства ЗАО "Светлана-Рентген", г. Санкт-Петербург.

## Заключение

В ходе работ удалось заменить термокатод в рентгеновской трубке БХ-2 производства ЗАО "Светлана-Рентген" (г. Санкт-Петербург, Россия) на катодно-модуляторный узел с автокатодом из полиакрилонитрильных углеодных волокон. Полученные результаты измерений в значительной степени превосходят показатели стандартной рентгеновской трубки БХ-2, что говорит о продуктивности и целесообразности проделанной работы.

#### Список литературы

1. **Ерошкин П. А., Романько В. А., Шешин Е. П.** Маломощные рентгеновские трубки с автоэмиссионным катодом на основе наноструктурированных углеродных материалов // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 9. С. 11–15.

2. Бугаев А. С., Ерошкин П. А., Романько В. А., Шешин Е. П. Маломощные рентгеновские трубки (современное состояние) // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. № 7. С. 727—740.

3. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд. МФТИ, 2001.

4. **Ерошкин П. А., Шешин Е. П.** Электронная пушка для рентгеновской трубки с автоэмисионным катодом // Труды МФТИ. 2014. Т. 6. № 1 (21). С. 46—53.

5. Baker F. S., Osborn A. R., Williams J. Field emission from carbon fibers: A New Electron Source // Nature. 1972. Vol. 239, N. 8. P. 96–97.

6. **Ерошкин П. А., Шешин Е. П.** Электронная пушка с автоэмиссионным катодом для ваккумных приборов // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 1(162). С. 43—44.

P. A. Eroshkin, Junior Researcher, eroshkin.pavel@gmail.com, E. Y. Petrunin, Junior Researcher,
E. P. Sheshin, D. Sc., Professor, sheshin.ep@mipt.ru

Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow

Corresponding author:

**Eroshkin Pavel A.,** Junior Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), e-mail: eroshkin.pavel@gmail.com

# X-ray Tube for Gas Ionization

Received on August 23, 2017 Accepted on September 11, 2017

The article presents a design of an X-ray tube for gas ionization with a field emission cathode and defocusing system. The cathode for an electron gun of the tube is based on a beam of polyacrylonitrile carbon fibers. The simulation of the electronic defocusing system is carried out and the optimal design parameters are revealed. A prototype of an X-ray tube with a proposed electron gun is made and tested.

Keywords: x-ray tube, field emission, nanostructured carbon materials, carbon fibers

## For citation:

Eroshkin P. A., Petrunin E. Y., Sheshin E. P. X-ray Tube for Gas Ionization, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 107–110.

DOI: 10.17587/.nmst.20.107-110

## Introduction

Microfocus x-ray tubes and portable equipment on their basis are an effective means for research of the structure of various objects at the microlevel [1]. They are used for a microtomography, microdefectoscopy, diagnostics of the quality of the industrial products, crystallographic research works, medical diagnostics, detection of explosives and for other purposes. In development of the microfocus x-ray tubes a trend is observed for creation of special designs, corresponding to the requirements of a concrete research to the maximum degree [2].

The most widespread type of the modern microfocus x-ray tubes is a device with a perforated anode, without special coolers. One of the promising directions for development of the devices with a perforated anode is the further increase of the voltage and power with a simultaneous reduction of the sizes of the focal spot, ensuring higher efficiency of the tube and its smaller dimensions. This can be achieved by replacement of the thermo-

cathodes with the field-emission cathodes on the basis of the carbon materials [3].

# **Electron gun**

During selection of a suitable design of the cathodemodulator node (CMN) with a cathode on the basis of polyacrylonitrile carbon fibers, attention was devoted to a possible simplicity and technological adaptability of the whole of the device.

For determination and approvement of all the interelectrode distances (fig. 1) a simulation was done of the electron-optical system of an x-ray tube, including distribution of the potential and the trajectory of the electrons [4].

The obtained calculated data allow us to believe confidently that the designed electron gun meets all the requirements to it (testing of the cathode-modulator node made according to the calculated parameters also confirms this):

- full absence of interception of the autoemission current on the control electrode is reached, the calculated trajectories of the movement of electrons even do not touch the modulator (the force of the current of the modulator, measured at the working voltages on the electrodes and the cathode current  $I_{\rm K} = 100 \ \mu$ A, equals to  $I_{\rm M} < 0.5 \ \mu$ A);
- autoelectrons practically cannot get to the vertical wall of the internal surface of the tube's glass shell. Only near the anode they get to the tube wall, but this situation is solved by sputtering of an additional rim from aluminum, which was taken into account during modeling (testing of CMN demonstrated that the electrons did not reach the lamp wall);
- all of the electron flow, when it gets to the anode, will highlight practically all of the area with the deposited luminophor (during testing of the trial CMN the autoemission image really occupied all of the luminescent area of the anode);
- the calculated area of the volt-ampere characteristic of the designed CMN is within the limits of the modulator voltage of  $U_{\rm M} < 1500$  V (measurements of the volt-ampere characteristics of CMN demonstrated that at the current of  $I_{\rm K} = 100$  µA and voltage on the anode of  $U_{\rm a} = 10$  kV, the value of the modulator voltage was  $U_{\rm M} = 1.2$  kV).

During the experiments it was pointed out that notwithstanding the microgeometry of the fibers on different cathodes, the displacement of the volt-ampere characteristics to the area of the higher or lower voltages on the control electrode was minimal, which was also underlined in the other works [5, 6].

Fig. 2 presents the typical emission characteristics of the electron gun.

# Prototype of the x-ray tube with an autoemission cathode

The electron gun developed at the first stage on the basis of polyacrylonitrile carbon fibers was applied for

manufacturing of the working prototypes of the x-ray tube. BX-2 serial x-ray tube, manufactured by Svetlana-Roentgen Co. (St.-Petersburg, Russia) was taken as the basis for the design. The design of the anode group was taken for manufacturing of prototypes from BX-2 lamp without changes. The base part of the lamp and the bottom half of the case were made from glass. For preserving of an acceptable level of vacuum, the nonpulverizable getters on the basis of titanium were fixed inside the ready devices. A view of the working prototype is presented in fig. 3.

For checking of the lamps' workability and determination, whether they satisfied the set tasks, two experiments were made.

In the first experiment the role of the external layer was played by the green luminophor, activated by the xray radiation of the lamp in various operating modes. The image was visually compared with the similar images for the serial tube BX-2 from Svetlana-Roentgen Co. received in parallel. Besides that, the volt-ampere characteristics of the prototypes were compared with the characteristic recorded for CMN at the first stage of the work. Attentive studying and comparison of the pictures of the luminescence allows us to draw a conclusion that the working prototypes do not concede to the serial sample. In the second experiment the ionizing force of the output radiation of the prototypes with the use of the ionizing chambers was investigated. By the results of the experiment the ionizing force of radiation was found as satisfying the conditions of the set task, and not conceding to that of the serial samples manufactured by Svetlana-Roentgen Co, Saint-Petersburg.

# Conclusion

During the works the authors managed to replace the thermocathode in BX-2 x-ray tube manufactured by Svetlana-Roentgen Co, Saint-Petersburg. with a cathode-modulator node with the autocathode from the polyacrylonitrile carbon fibers. The received results of measurements surpassed substantially the indices of the standard BX-2 x-ray tube, which testified to the efficiency and the expediency of the work done.

## References

1. Eroshkin P. A., Romanko V. A., Sheshin E. P. Nano- *i microsistemnaya tekhnika*, 2012, no. 9, pp. 11–15 (in Russian).

2. Bugaev A. S., Eroshkin P. A., Romanko V. A., Sheshin E. P. Uspekhi Fizicheskih Nauk, 2013, vol. 183, no. 7, pp. 727–740 (in Russian).

3. **Sheshin E. P.** *Struktura poverkhnosti i avtoemissionnie svoistva uglerodnih materialov*, Moscow. Publ. MIPT, 2001 (in Russian).

4. Eroshkin P. A., Sheshin E. P. *Trudi MFTI*, 2014, vol. 6, no. 1 (21), pp. 46–53 (in Russian).

5. Baker F. S., Osborn A. R., Williams J. Nature, 1972, vol. 239, no. 8, pp. 96–97.

6. Eroshkin P. A., Sheshin E. P. Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika, 2014, no. 1(162), pp. 43–44 (in Russian).

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

УДК 539.23-022.53

DOI: 10.17587/nmst.20.111-124

**П. А. Александров**, д-р физ.-мат. наук, директор Института информационных технологий НРЦ "Курчатовский институт", **В. И. Жук**, канд.физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., **В. Л. Литвинов**, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., **С. Е. Стельмак**, науч. сотр., НРЦ "Курчатовский институт", Москва, e-mail: alexandrov\_pa@nrcki.ru, vict-zh@yandex.ru

# О КВАДРИРОВАНИИ ТРАНЗИСТОРОВ В НАНО- И МИКРОЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ

Поступила в редакцию 19.07.2017

Приведен анализ схем квадрированного транзистора. Предложена оценка отказоустойчивости квадрированной микросхемы при ее облучении. Дано сравнение отказоустойчивости квадрированной и покомпонентно дублированной микросхем. Показано, что отказоустойчивость квадрированных микросхем при их облучении на один — два порядка выше отказоустойчивости покомпонентно дублированных микросхем.

**Ключевые слова:** наноэлектроника, микроэлектроника, отказоустойчивость, отказ, резервирование, дублирование, учетверенная транзисторная структура, квадрирование, квадрированный транзистор

#### Введение

В работах [1-7] нами были предложены новые схемотехнические способы повышения отказоустойчивости нано- и микроинтегральных схем (ИС) при облучении, основанные на постоянном покомпонентном дублировании, при котором компоненты не обладают памятью, а расстояние между дублирующими друг друга компонентами больше размера области повреждения от одной частицы. В качестве компонентов могут выступать логические элементы, транзисторы, другие приборы и межсоединения. При дублировании логических элементов выходы дублирующих друг друга логических элементов соединяют между собой, для чего в каждом логическом элементе устанавливают простой по аппаратным затратам выходной каскад. В дублирующих элементах можно резервировать отдельные приборы. Из дублированных компонентов можно строить логические элементы с памятью (триггеры). Исследовано поведение дублирующего и дублированного элементов при различных дефектах при всех сочетаниях входных сигналов.

Отметим, что в указанных в этой статье работах и в данной статье под отказом понимаются как постоянные отказы, так и временные, называемые сбоями.

В тех же работах [1—7] нами были предложены также новые методы оценки отказоустойчивости

нано- и микро ИС, предназначенные не для оценки конкретных схем, а в отличие от известных способов, для оценки отказоустойчивости обобщенных интегральных схем, построенных любыми способами, в том числе без резервирования и с резервированием, например, с различными видами покомпонентного дублирования и мажоритарного резервирования на основе математических моделей ИС. Поскольку предлагаемые нами новые методы оценки отказоустойчивости предназначены для оценки обобщенных ИС, характеризуемых только способами их построения, то для удобства будем называть их методами оценки отказоустойчивости способов построения ИС.

Известные методы оценки отказоустойчивости ИС, в отличие от предложенных нами, предназначены для оценки безотказности конкретных интегральных схем и не могут быть использованы для оценки различных способов резервирования. Эти методы оценки отказоустойчивости основаны на использовании так называемых  $\lambda$ -характеристик, которые задаются в таблицах как константы для каждого типа приборов и других компонентов интегральной схемы [8, 9]. Поэтому параметры облучения могут быть учтены в этих характеристиках лишь в ограниченных пределах. В предложенных нами методах указанные  $\lambda$ -характеристики не применяются, а используется такая важная характеристика облучения, как флюенс, меняющийся в широких пределах, и тот факт, что облучение действует на "площади" микросхемы независимо от ее функционального содержания. Поэтому предложенные нами методы названы методами оценки отказоустойчивости "по площадям". Они позволяют сравнивать отказоустойчивость при различных способах постоянного резервирования. С помощью этих методов показано, что отказоустойчивость предложенной покомпонентно дублированной микросхемы примерно на порядок выше, чем у троированной микросхемы при идеальных, т. е. безотказных, мажоритарных клапанах, а количество оборудования в этой дублированной микросхеме ниже, чем в троированной. Для повышения отказоустойчивости мажоритарных клапанов и контрольной аппаратуры крупных цифровых систем нами предложено использовать указанные способы покомпонентного дублирования [10, 11].

Дальнейшее повышение отказоустойчивости микро- и наноИС возможно при использовании четырехкратного резервирования одиночных транзисторов. В работе [12, с. 308, рис. 11.5] был приведен пример одновременно параллельного и последовательного дублирования диодов и сообщалось, что "аналогичные методы могут быть использованы для резисторов, конденсаторов и транзисторов". Это давняя идея. Относительно недавно в работах [13-15] был предложен аналогичный метод одновременно параллельного и последовательного дублирования транзисторов, который его авторы называют методом построения четырехкратно резервированной (или учетверенной) транзисторной структуры (quadded transistor structure). В дальнейшем будем называть этот метод квадрированием транзисторов по аналогии с предложенным в работе [16, с. 7] термином "квадрирование резервируемых компонентов", где под компонентами понимаются в первую очередь диоды, и дается ссылка на работу [12, с. 308], где упоминается, что аналогичные методы резервирования могут быть использованы для резисторов, конденсаторов и транзисторов. В работах [13, 14] квадрирование транзисторов обобщается как простой случай построения  $N^2$ -транзисторной структуры  $(N^2$ -transistor structure) при N = 2. Эта  $N^2$ -транзисторная структура, состоящая из  $N^2$  одиночных транзисторов, образующих N строк и N столбцов, предложена при N > 2 для повышения отказоустойчивости к большему числу дефектов. Однако такая структура, являющаяся развитием квадрированной структуры, требует увеличения затрат аппаратуры и в этих работах подробно не исследована.

В работе [14] предложенному методу квадрирования транзисторов противопоставляют известные методы троирования и метод учетверенной логики (quadded logic). В ней отмечается, что ошибки в мажоритарном клапане не позволяют получить правильный результат и не могут быть скорректированы. Там также отмечается, что хотя учетверенная логика гарантирует отказоустойчивость по отношению к большинству одиночных ошибок, тем не менее ошибки, встречающиеся на последних двух ступенях учетверенной логической схемы, могут быть не скорректированы. В связи с этим в работе [15] предложена так называемая "гибридная" схемотехника, согласно которой первые ступени логической схемы строят как учетверенную логику, а на ее последних ступенях используют квадрирование транзисторов.

Хотя в работах [13—15] приводятся формулы вероятностей отказа квадрированных транзисторов и состоящих из них схем, но аргументом в этих формулах служит представленная в буквенном виде вероятность отказа одиночного транзистора, которая не раскрывается. В них не указываются причины возникновения дефектов одиночных транзисторов и не рассматривается отказоустойчивость микросхемы, состоящей из квадрированных транзисторов, под действием облучения. В настоящей работе исследуется квадрирование транзисторов в микрои наноИС при облучении на основе предложенной и использованной нами ранее модели оценки надежности облучаемых ИС "по площадям" [1—7].

# 1. Структуры квадрированных транзисторов и влияние отказов одиночных транзисторов на отказы квадрированных транзисторов

Примеры схем квадрирования полевых транзисторов, показанные на рис. 1, *а* и *b*, полностью аналогичны схемам, приведенным в работах [13, 14]. На этих рисунках квадрированный транзистор содержит одинаковые одиночные транзисторы,  $T_1 - T_4$ . Входы *A* всех одиночных транзисторов, входящих в один квадрированный транзистор, в общем случае могут быть соединены между собой (эти соединения на рис. 1, *а* и 1, *b* не показаны).

Квадрированный транзистор можно использовать в схемах логических элементов вместо оди-





Таблица 1 Table 1

\_

\_

\_

Структура на рис. 1, а Структура на рис. 1, b Structure in fig. a Structure in fig. b Дефекты типа КЗ Дефекты типа "обрыв' Дефекты типа КЗ Дефекты типа "обрыв' Defects of "open circuit" type Defects of SC type Defects of "open circuit" type Defects of SC type Пары транзисторов Отказ Пары транзисторов Отказ Пары транзисторов Отказ Пары транзисторов Отказ Pairs of transistors Failure Pairs of transistors Failure Pairs of transistors Failure Pairs of transistors Failure  $T_1, T_2$ + $T_3$ + $T_1, T_2$ + + $T_1, T_2, T_4, T_1, T_3, T_4, T_1, T_3, T_2, T_4$  $T_1, T_2, T_1, T_4, T_2, T_3, T_4, T_4, T_5, T_4$ +  $T_{1}, T_{4}$ + +  $T_{2}^{'}$ ,  $T_4$ +  $T_{2}, T_{3}, T_{4}$  $T_{2}, T_{4}$  $T_1^2, T_2^2$  $T_1, T_4$ \_ + + \_

 $T_1, T_3$ 

 $T_{2},$  $T_3$ 

+

\_

Влияние отказов пар одиночных транзисторов на отказ квадрированного транзистора для его структур, приведенных на рис. 1, а и 1, b Influence of the failures of the pairs of the single transistors on the failure of the quadrated transistor for its structures presented in fig. 1, a and b

ночного транзистора. Он существенно защищен от дефектов типа "обрыв" и типа "короткое замыкание" (КЗ). Так, он полностью защищен от отказа одного любого входящего в него одиночного транзистора вследствие дефекта любого типа ("обрыв" или КЗ). Он не полностью, но в значительной мере защищен от отказов пар входящих в него одиночных транзисторов вследствие дефектов в них только одного типа (табл. 1). В случае же, когда в одном квадрированном транзисторе одновременно имеют место дефекты обоих типов, квадрированный транзистор частично защищен от отказов трех входящих в него одиночных транзисторов и отказывает при выходе некоторых троек одиночных транзисторов (табл. 2).

\_

\_

 $T_{1}, T_{2}$ 

 $T_4$ 

 $T_{1}, T_{4}$ 

 $T_2, T_{3-}$ 

Наличие в микросхеме дефектов типа "обрыв" более характерно для наноэлектроники (при нейтронном облучении). Наличие в микросхеме дефектов типа КЗ более характерно для микроэлектроники при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ).

В работах [13, 14] наряду с дефектами "обрыв" и КЗ упоминаются так называемые дефекты типа мостиков (bridges) между затворами транзисторов, а именно мостик типа "монтажное И" (AND-bridge) и "монтажное ИЛИ" (OR-bridge). Однако там дефекты типа мостиков не показаны на схеме квадрированных транзисторов и не учитываются при выводе формул вероятности отказа квадрированного транзистора (см. раздел Appendix в работе [14]). При рассмотрении вероятности безотказной работы квадрированных транзисторов в дальнейшем не будем учитывать эти дефекты.

В табл. 1 указаны пары одиночных транзисторов, в каждой из которых транзисторы имеют дефекты одинакового типа, и для каждой пары указано, приводят ли эти дефекты в каждом из транзисторов этой пары к отказу квадрированного транзистора. Если приводят к отказу, то в столбце "Отказ" указан знак "+", а если не приводят к отказу, то в столбце "Отказ" указан знак "-".

 $T_2, T_3$ 

 $T_4$ 

+

\_

Из табл. 1 видно, что если из-за одинакового типа дефекта в квадрированном транзисторе откажут три одиночных транзистора, то отказ всего квадрированного транзистора может быть вызван либо одной парой, либо двумя парами из этих трех отказавших одиночных транзисторов.

Пары одиночных транзисторов, при отказе которых отказывает квадрированный транзистор, будем называть отказывающими парами. Число G отказывающих пар зависит от структуры квадрированного транзистора и типа дефекта. Числа отказывающих пар в зависимости от структуры квадрированного транзистора и типа дефекта в соответствии с табл. 1 при одинаковом типе дефектов в одиночных транзисторах будут

$$G_{a,o\delta p} = 2, \quad G_{a,\kappa 3} = 4, \quad G_{b,o\delta p} = 4, \quad G_{b,\kappa 3} = 2, \quad (1.1)$$

где нижние индексы означают: *а* и *b* — типы структур квадрированных транзисторов (см. рис. 1, а

> Таблица 2 Table 2

#### Влияние отказов тройки одиночных транзисторов на отказ квадрированного транзистора со структурой, показанной на рис. 1, а

Influence of failures of a group of three single transistors on the failure of the quadrated transistor with the structure shown in figure 1, a

$T_1$	<i>T</i> <sub>2</sub>	<i>T</i> <sub>3</sub>	Отказ Failure
К3	K3	Обрыв	_
SC	SC	Open circuit	
K3	Обрыв	Обрыв	-
SC	Open circuit	Open circuit	
Обрыв	K3	Обрыв	-
Open circuit	SC	Open circuit	
K3	Обрыв	K3	+
SC	Open circuit	SC	
Обрыв	K3	K3	+
Open circuit	SC	SC	
Обрыв	Обрыв	K3	+
Open circuit	Open circuit	SC	

и 1, б); обр — тип дефекта "обрыв"; кз — тип дефекта КЗ (короткое замыкание).

Максимальное число  $G_{\text{max}}$  любых пар одиночных транзисторов в квадрированном транзисторе равно числу сочетаний из четырех по два, т. е. б. Относительная вероятность  $\mu$  попадания частицы в отказывающую пару одиночных транзисторов будет

$$\mu = G_{\text{отк}}/G_{\text{max}},\tag{1.2}$$

где  $G_{\text{отк}}$  — число отказывающих пар транзисторов в квадрированном транзисторе, определенное в (1.1).

Тогда при одинаковом типе дефектов в одиночных транзисторах получим  $\mu = 1/3$ , либо  $\mu = 2/3$ .

Рассмотрим теперь случаи, когда в одном квадрированном транзисторе одновременно имеют место дефекты обоих типов. Квадрированный транзистор обоих типов структур полностью защищен от отказов в нем любой пары одиночных транзисторов, один из которых отказал вследствие дефекта в нем одного типа, а другой — вследствие дефекта другого типа.

Рассмотрим возможности защиты квадрированного транзистора от отказов трех входящих в него одиночных транзисторов при условии, что два из этих транзисторов отказали вследствие разных типов дефектов. В табл. 2 в качестве примера показано влияние отказов тройки одиночных транзисторов T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> при различных сочетаниях типов дефектов в них при исправном транзисторе  $T_4$  на отказы квадрированного транзистора, имеющего структуру типа "а". Если дефекты, указанные в каждой строке табл. 2, приводят к отказу квадрированного транзистора, то в столбце "Отказ" указан знак "+", а если они не приводят к его отказу, то в столбце "Отказ" указан знак "--". Для каждой такой тройки одиночных транзисторов в трех случаях из шести квадрированный транзистор не выходит из строя. Число таких троек транзисторов из четырех одиночных транзисторов равно 4. Это означает, что в 12 случаев из 24, т. е. в половине случаев отказа троек одиночных транзисторов вследствие одновременного появления дефектов разных типов. не происходит отказа квадрированного транзистора. Аналогичным образом можно показать, что при структуре типа b квадрированного транзистора он не откажет в 1/3 случаев отказа троек одиночных транзисторов вследствие появления дефектов разных типов.

Будем считать, что в квадрированной микросхеме используются только квадрированные логические элементы ИЛИ-НЕ. Схема двухвходового элемента ИЛИ-НЕ с нерезервированной структурой, построенного на квадрированных транзисторах, содержит три таких транзистора, т. е. всего 12 одиночных транзисторов. Однако квадрированные транзисторы можно использовать в дублированном элементе ИЛИ-НЕ вместо дублированных транзисторов, резисторов и диода. Такой двухвходовой элемент ИЛИ-НЕ потребует 10 квадрированных транзисторов или 40 одиночных транзисторов.

# 2. Особенности квадрированной микросхемы и ее модель

Наиболее простым видом микросхем с квадрированными транзисторами является микросхема, состоящая из квадрированных логических элементов, имеющих нерезервированных оструктуру. В таком логическом элементе каждый одиночный транзистор заменен на квадрированный транзистор. Будем условно называть такой логический элемент простым квадрированным элементом, и поэтому микросхему, состоящую из таких простых логических элементов, назовем простой квадрированной микросхемой. В данной работе будем рассматривать только простую квадрированную микросхему, но в ее названии слово "простая", как правило, для сокращения будем опускать.

Микросхема выходит из строя, если откажет один ее квадрированный транзистор. Возможны два варианта случаев отказа квадрированного транзистора в зависимости от одинаковости типов дефектов в нем:

1) неодинаковые типы дефектов одиночных транзисторов,

2) одинаковые типы дефектов одиночных транзисторов.

В первом варианте обеспечивается наибольшая отказоустойчивость квадрированной микросхемы, поскольку квадрированный транзистор не отказывает при отказе любой пары одиночных транзисторов, а может отказать только при отказе трех одиночных транзисторов. Однако этот вариант представляется менее вероятным, чем второй вариант, который является не только более вероятным, но и гораздо менее отказоустойчивым. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только случаи отказа квадрированного транзистора, в котором имеют место дефекты одного типа. В этих случаях квадрированный транзистор отказывает в зависимости от его схемы (структуры) и типа дефектов, если откажет некоторая пара одиночных транзисторов в нем. Эти случаи являются наихудшими, так как в каждом из них отказывает минимальное число одиночных транзисторов, вызывающее отказ квадрированного транзистора, а именно два одиночных транзистора, составляющих отказывающую пару.

Микросхема, состоящая из "простых" квадрированных логических элементов, выйдет из строя в случае, если откажет один из ее логических эле-

ментов. Этот элемент откажет в случае, если откажет один входящий в него квадрированный транзистор, а квадрированный транзистор откажет, если в нем выйдет из строя одна его отказывающая пара одиночных транзисторов. Таким образом, "простая" квадрированная микросхема откажет в случае, если в ней выйдет из строя одна отказывающая пара одиночных транзисторов в одном квадрированном транзисторе. При этом отказывающая пара одиночных транзисторов может выйти из строя либо под действием двух частиц, каждая из которых поражает один одиночный транзистор этой пары, либо под действием одной частицы, если при малом расстоянии между двумя одиночными транзисторами она может вывести из строя два этих транзистора.

Межсоединения между квадрированными логическими элементами и между квадрированными транзисторами будем называть внешними, а межсоединения между одиночными транзисторами внутри каждого квадрированного транзистора будем называть внутренними. Заметим, что случай, когда под действием одной частицы происходит "обрыв" внутреннего межсоединения между двумя одиночными транзисторами, входящими в отказывающую пару, может быть приравнен к отказу одного из этих транзисторов, и поэтому его можно не учитывать как дефект внутреннего межсоединения.

Модель квадрированной микросхемы будем рассматривать на трех уровнях:

- на уровне квадрированных логических элементов;
- на уровне квадрированных транзисторов;
- на уровне одиночных транзисторов, входящих в состав квадрированных транзисторов.

Размеры промежутков между квадрированными транзисторами и, следовательно, между квадрированными логическими элементами превышают размеры области повреждения в микросхеме от одной облучающей частицы. Поэтому одна частица не может вывести из строя два соседних квадрированных транзистора и два соседних квадрированных логических элемента. Но как отмечалось, расстояние между одиночными транзисторами, входящими в один квадрированный транзистор, может не превышать размеры области повреждения от одной частицы. В этом случае попадание одной частицы между двумя соседними одиночными транзисторами может привести к их одновременному отказу.

Модель квадрированной микросхемы на всех ее уровнях, как и в случае нерезервированной и дублированной микросхем [5], является планарной и ее площадь разбита на соприкасающиеся "клетки" — ячейки. На всех уровнях квадрированной микросхемы ячейка содержит некоторую часть внешних межсоединений, необходимых для соединения квадрированных транзисторов. Поскольку внешние межсоединения сделаны так, что они не подвержены отказу под действием частиц, то при приближенных оценках отказоустойчивости квадрированных микросхем для упрощения не будем учитывать внешние межсоединения в составе ячеек.

Квадрированая микросхема *на уровне одиночных транзисторов* содержит одинаковые по размеру ячейки, в каждой из которых четыре одиночных транзистора и относящиеся к нему внутренние межсоединения.

*На уровне квадрированных транзисторов* квадрированная микросхема содержит одинаковые по размеру ячейки, в каждой из которых четыре одиночных транзистора и относящиеся к нему внутренние межсоединения.

На уровне квадрированных логических элементов ячейки квадрированной микросхемы в общем случае могут быть неодинаковыми по размеру и логическим функциям. Однако для упрощения примем, что логические элементы этой микросхемы одинаковы по своим функциям и размеру.

Для упрощения примем, что внутренние межсоединения в квадрированном транзисторе, в том числе являющиеся частью ячейки на уровне одиночных транзисторов, не будем учитывать в составе ячейки квадрированного и ячейки одиночного транзистора.

# 3. Оценка вероятности отказа квадрированной микросхемы при одинаковом типе дефектов в одиночных транзисторах квадрированного транзистора

Оценим вероятность  $P_1$  отказа одиночного транзистора в квадрированной микросхеме, в которой возможны только одинаковые типы дефектов в одиночных транзисторах, при попадании в нее одной частицы по аналогии с формулой (1.11) в работе [5]:

$$P_1 = \Phi_{\rm KB} S_{\rm KB} W, \tag{3.1}$$

где  $\Phi_{\rm KB}$  — флюенс для квадрированной микросхемы;  $S_{\rm KB}$  — площадь квадрированной микросхемы; W — вероятность повреждения единицы площади микросхемы при попадании в нее частицы, определенная в [5, (1.12)].

Площадь  $S_{\rm KB}$  квадрированной микросхемы без учета площади внешних соединений представим в виде:

$$S_{\rm KB} = s_{\rm o,T} N_{\rm o,T},$$
 (3.2)

где  $s_{0.T}$  — площадь ячейки нижнего уровня микросхемы, содержащей один одиночный транзистор;  $N_{0.T}$  — число одиночных транзисторов в квадрированной микросхеме. Если принять  $S_{\rm KB} = 1 \ {\rm cm}^2$ , то из (3.2) найдем

$$s_{0.T} = (1/N_{0.T}) \text{ cm}^2.$$

Подставим (3.2) в (3.1):

$$P_1 = \Phi_{\rm KB} S_{\rm O,T} N_{\rm O,T} W. \tag{3.3}$$

Так как каждый квадрированный транзистор содержит четыре одиночных транзистора, то

$$N_{\rm o.T} = 4N_{\rm KB},$$
 (3.4)

где  $N_{\rm KB}$  — число квадрированных транзисторов в квадрированной микросхеме:

$$N_{\rm KB} = N_{\rm J.3} n_{\rm KB.T}, \qquad (3.5)$$

где  $N_{\text{л.9}}$  — число квадрированных логических элементов в микросхеме;  $n_{\text{кв.т}}$  — число квадрированных транзисторов в одном квадрированном логическом элементе; для упрощения оценок величину  $n_{\text{кв.т}}$  примем постоянной.

Вероятность  $P_{\rm KB.T}$  попадания двух частиц или одной частицы, поражающих два одиночных транзистора, в один квадрированный транзистор микросхем будет

$$P_{\rm KB.T} = P_1^2 / N_{\rm KB}. \tag{3.6}$$

Найдем теперь вероятность  $P_{\rm KB.\Pi}$  попадания двух частиц или одной частицы в два разных одиночных транзистора, входящих в один квадрированный транзистор, т. е. в одну любую пару из  $G_{\rm max}$ пар одиночных транзисторов одного квадрированного транзистора:

$$P_{\rm KB,\Pi} = P_1^2 / (N_{\rm KB} G_{\rm max}). \tag{3.7}$$

Как отмечалось, квадрированный транзистор откажет, если два пораженных одиночных транзистора входят в отказывающую пару этого квадрированного транзистора.

Вероятность  $P_{\rm M}$  отказа квадрированной микросхемы при попадании двух частиц или одной частицы в разные одиночные транзисторы отказывающей пары одного квадрированного транзистора найдем как вероятность того, что пара одиночных транзисторов одного квадрированного транзистора, пораженных двумя частицами или одной частицей, окажется отказывающей:

$$P_{\rm M} = \mu P_{\rm KB.\Pi},\tag{3.8}$$

где вероятность  $P_{\text{кв.п}}$  определена в формуле (3.7), величина  $\mu$  — в (1.2).

Подставив (3.7) и (3.3) в (3.8), получим

$$P_{\rm M} = \mu (\Phi_{\rm KB} S_{\rm 0.T} N_{\rm 0.T} W)^2 / (N_{\rm KB} G_{\rm max}).$$
(3.9)

# 4. Сравнение отказоустойчивости покомпонентно дублированной и квадрированной микросхем

Сравним отказоустойчивость квадрированных микросхем, построенных из квадрированных логических элементов без резервирования их структуры, и покомпонентно дублированных микросхем.

Найдем показатель  $\alpha_{2-M}$  изменения отказоустойчивости:

$$\alpha_{2-M} = P_2/P_M, \tag{4.1}$$

где  $P_2$  — вероятность отказа покомпонентно дублированной микросхемы;  $P_{\rm M}$  — вероятность отказа квадрированной микросхемы с квадрированными логическими элементами без резервирования их структуры, определенная в (3.8).

Вероятность отказа покомпонентно дублированной микросхемы определена в работе [6, (1.12)]:

$$P_2 = P_{\pi}^2 / (0,5N), \qquad (4.2)$$

где  $P_{\Pi}$  — вероятность отказа хотя бы одной ячейки в одном из двух подмножеств, соответствующих половине ячеек дублированной микросхемы и содержащих N непарных ячеек, за время облучения до отказа микросхемы; N — число дублированных компонентов микросхемы.

Вероятность  $P_{\Pi}$  определена в работе [5, (2.1)]:

$$P_{\Pi} = \Phi_{\Pi} S_{\Pi,\Pi} W, \qquad (4.3)$$

где  $\Phi_{\rm d}$  — флюенс для дублированной микросхемы за время облучения до отказа микросхемы;  $S_{\rm d, ff}$  площадь гипотетической нерезервированной микросхемы, содержащей N дублируемых ячеек; W см. формулу (3.1).

Подставим (4.3) в (4.2):

$$P_2 = (\Phi_{\rm d} S_{\rm d.n} W)^2 / (0,5N). \tag{4.4}$$

Для удобства вычисления показателя  $\alpha_{2-M}$  изменения отказоустойчивости по формуле (4.1) укажем соответствие между величинами, входящими в формулы (3.8) и (4.4).

Величина N в формуле (4.4) соответствует числу  $N_{\rm KB}$  квадрированных транзисторов в квадрированной микросхеме:

$$N = N_{\rm KB}.\tag{4.5}$$

Площадь  $S_{\text{д.п}}$  соответствует площади, которую занимает четверть числа одиночных транзисторов в квадрированной микросхеме:

$$S_{\rm II,II} = k s_{\rm O,I} N_{\rm O,I} / 4,$$
 (4.6)

где k — число одиночных транзисторов в ячейке нижнего уровня микросхемы;  $s_{0,T}$  — площадь, занимаемая одиночным транзистором;  $N_{0,T}$  — число одиночных транзисторов в квадрированной микросхеме; величины  $s_{0.T}$  и  $N_{0.T}$  определены выше в формулах (3.2) и (3.4). С учетом (3.4) из (4.6) получим

$$S_{\Pi \Pi} = k s_{0 \Pi} N_{\text{KB}}. \tag{4.7}$$

Флюенс  $\Phi_{\pi}$  для дублированной микросхемы может не совпадать с флюенсом  $\Phi_{\rm KB}$  для квадрированной микросхемы. Для упрощения оценки примем, что флюенс  $\Phi_{\pi}$  равен флюенсу  $\Phi_{\rm KB}$ :

$$\Phi_{\pi} = \Phi_{\rm KB}. \tag{4.8}$$

Выполним замены (4.5), (4.7), (4.8) в (4.4):

$$P_2 = (\Phi_{\rm KB} k s_{\rm 0.T} N_{\rm KB} W)^2 / (0.5 N_{\rm KB}).$$
(4.9)

Подставив (4.9) и (3.9) в (4.1), после преобразований получим:

$$\alpha_{2-M} = k^2 G_{\text{max}} / 8\mu. \tag{4.10}$$

Поскольку для квадрированной микросхемы  $G_{\text{max}} = 6$  и при этом относительная вероятность  $\mu$ принимает два значения, то из (4.10) при k = 1 получаем минимальные значения  $\alpha_{2-M} = 2,25$  при  $\mu = 1/3$  и  $\alpha_{2-M} = 1,125$  при  $\mu = 2/3$ . В действительности  $k \gg 1$ . Например, в дублированной микросхеме без квадрирования транзисторов дублируемый логический элемент (при замене резисторов и диода на транзисторы) содержит семь одиночных транзисторов (см. [7, рис. 2]). В этом случае при k = 7 получим соответственно  $\alpha_{2-M} = 110,25$  при  $\mu = 1/3$  и  $\alpha_{2-M} = 55,125$  при  $\mu = 2/3$ , т. е. в этом случае вероятность отказа квадрированной микросхемы по сравнению с вероятностью отказа дублированной микросхемы снижается в 100 и 50 раз соответственно. Остается существенный запас снижения вероятности отказа квадрированной микросхемы в случае неодинаковых типов дефектов в одиночных транзисторах квадрированного транзистора, поскольку в этом случае он не работает при отказе трех одиночных транзисторов, а при отказе двух одиночных транзисторов сохраняет свою работоспособность. Вследствие этого обеспечивается существенное снижение вероятности отказа (примерно на три порядка), причем без увеличения затрат аппаратуры.

Заметим, что затраты аппаратуры в "простой" квадрированной микросхеме могут быть меньше, чем в дублированной микросхеме, построенной на логических элементах с резервированной структурой. Так, квадрированный двухвходовой логический элемент ИЛИ-НЕ без резервирования его структуры содержит три квадрированных транзистора или 12 одиночных транзисторов, а реализующий ту же логическую функцию дублированный логический элемент с дублированной структурой и без использования квадрированных транзисторов (см., например, [7], рис. 2 с заменой резисторов и диода на одиночные транзисторы) содержит от 14 до 20 одиночных транзисторов в зависимости от внутреннего резервирования в дублируемом логическом элементе.

Возможный путь дальнейшего повышения отказоустойчивости микросхем — увеличение кратности резервирования транзисторов по сравнению с их квадрированием, а именно использование  $N^2$ -транзисторных структур (при  $N \ge 3$ ), требующих увеличения аппаратных затрат [13, 14].

## Заключение

Показано, что квадрированные микросхемы с одинаковыми типами дефектов в одиночных транзисторах по сравнению с покомпонентно дублированными микросхемами обеспечивают существенное уменьшение вероятности отказа под влиянием облучения (на один — два порядка). При этом последние могут быть менее экономичными по затратам аппаратуры.

Наиболее существенное снижение вероятности отказа квадрированных микросхем, причем без увеличения затрат аппаратуры, достигается в случае, когда в квадрированной микросхеме "простые" квадрированные транзисторы отказывают вследствие неодинаковых типов дефектов в одиночных транзисторах.

#### Список литературы

1. Александров П. А., Жук В. И., Литвинов В. Л. Способ постоянного поэлементного дублирования в дискретных электронных системах (варианты). Патент РФ на изобретение № 2475820 от 10.08.2011, классы МПК G06F 11/16, H03K 19/007.

2. Александров П. А., Бударагин В. В., Жук В. И., Литвинов В. Л., Свечников А. Б. Действие излучений на материалы, приборы и схемы наноэлектроники // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4, № 6. С. 590—596.

3. Александров П. А., Бударагин В. В., Жук В. И., Литвинов В. Л. Об отказоустойчивости наноэлектронных интегральных схем при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 1. С. 1—14.

4. Александров П. А., Жук В. И., Литвинов В. Л. Наноэлектроника и радиация // Природа. 2015. № 1. С. 14—21.

5. Александров П. А., Бударагин В. В., Жук В. И., Литвинов В. Л. Отказоустойчивость покомпонентно дублированной микросхемы при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 3. С. 10–23.

6. Александров П. А., Бударагин В. В., Жук В. И., Литвинов В. Л. Сравнительные оценки отказоустойчивости мажоритарно резервированных и покомпонентно дублированных микросхем при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 3. С. 176—196.

7. Александров П. А., Бударагин В. В., Горемыкин А. М., Жук В. И., Литвинов В. Л. О построении дублированных логических элементов для повышения отказоустойчивости микросхем при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 4. С. 239—256.

8. **Чеканов А. Н.** Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры. М.: КНОРУС, 2012. 440 с.

9. Брагин И. Расчет надежности. 2003. URL: http://tvskit.narod.ru/stati/stati21/stati21.html

10. Александров П. А., Жук В. И., Литвинов В. Л. Способ резервирования мажоритарных клапанов. М.: НИЦ "Курча-товский институт", 2014. Ноу-хау № 183/2014.

11. Александров П. А., Жук В. И., Ветров В. А., Стельмак С. Е. Способ построения контрольной аппаратуры постоянного дублирования крупных узлов цифровых систем. М.: НИЦ "Курчатовский институт", 2014. Ноу-хау № 189/2014.

12. Байцер Б. Архитектура вычислительных комплексов / Пер. с англ. Ю. П. Селиванова, Б. А. Квасова. Том 2. М.: Мир, 1974. 568 с.

13. Maleh A. H., Al-Hashimir B. M., Melouki A. Transistor-Level Based Defect-Tolerance for Reliable Nanoelectronics. Computer Systems and Applications, 2008. AICCSA 2008. IEEE/ACS International Conference on. (31 March—4 April 2008). http://www.ccse.kfupm.edu.sa/~aimane/pub/Transistor $Level \% 20 Based \% 20 Defect-Tolerance \% 20 for \% 20 Reliable \% 20 Nanoelectronics\_AICCSA-08.pdf$ 

14. **Maleh A. H., Al-Hashimir B. M., Melouki A., Khan F.** Defect Tolerant N<sup>2</sup>-Transistor Structure for Reliable Nanoelectronic Designs // IET Computers & Digital Techniques. November 2009. Vol. 3, Is. 6. P. 570–580. (with Appendix). http:// eprints.soton.ac.uk/267678/1/IET\_DefectTolerantStrucureNanoelectronics.pdf

15. **Han J., Leung E., Lie L., Lombardi F.** A Fault-Tolerant Technique using Quadded Logic and Quadded Transistors // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) System. 2014. Vol. 23, N. 8. P. 1562–1566.

16. **Жук В. И.** О возможности применения аппаратных методов повышения надежности работы оперативных и полупостоянных запоминающих устройств, используемых в условиях повышенной радиации. Препринт ИАЭ-6577/16. М.: РНЦ "Курчатовский институт, 2009. 19 с.

P. A. Aleksandrov, D. Sc., Director, V. I. Zhuk, Ph. D. Leading Researcher,

V. L. Litvinov, D. Sc., Leading Researcher, S. E. Stelmak, Researcher,

Institute of Information Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182,

 $Russian\ Federation,\ e-mail:\ alexandrov\_pa@nrcki.ru.\ vict-zh@yandex.ru$ 

Corresponding author:

**Zhuk Victor I.,** Ph. D. Leading Researcher, Institute of Information Technologies, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182, Russian Federation, e-mail: vict-zh@yandex.ru

# The Transistor Quadration in the Nano- and Micro- Digital Integrated Circuits under Irradiation

Received on July 19, 2017 Accepted on August 29, 2017

The analysis of circuits of quadrated transistor operation is represented. The analytic investigation of fault-tolerance of irradiaton simple quadrated nano- and micro- inregrated circuits by employing approximative model "by the areas" for assessment of the fault probability of the irradiated microcircuits. The estimation of quadrated microcircuits under irradiation is proposed.

It is shown that simple transistors quadrating, i.e. the usage one of quadrated transistor consisting of four single transistors instead each single transistor, on condition of equal defect types in each single tansistors, achieves substantial decrease of the fault probability of the irradiated microcircuit by one-two orders below than the fault probability of the irradiated component-wise dublicated microcircuit.

The most significant decrease in the fault probability, without increasing the cost of equipment, is achieved in the case when quadratured transistors fail in a simple guadratured microcircuit due to unequal types of defects in single transistors.

Keywords: nanoelectronics, microelectronics, fault-tolerance, failure, redundancy, duplication, quadded transistor structure, quadrating, quadrated transistor

For citation:

Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L., Stelmak S. E. The Transistor Quadration in the Nano- and Micro- Digital Integrated Circuits under Irradiation, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 111–124.

DOI: 10.17587/nmst.20.111-124

# Introduction

In [1-7] we offered new circuit methods for increasing of the fault tolerance of the nano- and microintegrated circuits (IC) under an irradiation. The methods are based on a constant component-wise duplication, due to which the components do not have memory, while the distance between the duplicating components is more than the size of the area of the damage caused by one particle. The role of the components can be played by the logic elements, transistors, and other devices and interconnections. During duplication of the logic elements the outputs of the duplicating logic elements are connected between themselves, for which purpose an output cascade is established in each element, involving only modest hardware costs. In the duplicating elements it is possible to reserve separate devices. The duplicated components can be used for construction of the logic elements with memory (triggers). The behavior of the duplicating and duplicated elements was investigated in case of various defects and all the combinations of the input signals.

We should point out, that in the works mentioned in the article and in the given article the word "failures" are understood as both constant failures and temporary ones.

In the same [1–7] we offer new methods for estimation of the fault tolerance in nano- and micro IC, intended not for evaluation of any concrete circuits, but, as opposed to the known methods, for estimation of the fault tolerance of the generalized IC, constructed by any methods, including with redundancy and without it, for example, with various kinds of componentwise duplication and majority redundancy on the basis of the mathematical models of IC. Since the new methods for estimation of the fault tolerance offered by us are intended for estimation of the generalized IC, characterized only by the methods of their construction, then, for the reasons of convenience we will call them "methods for estimation of fault tolerance of the methods for construction of IC".

The already known methods for estimation of the fault tolerance of IC, as opposed to the ones offered by us, are intended for estimation of a non-failure operation of a concrete IC and cannot be used for estimation of various methods for reservation. These methods for estimation of fault tolerance are based on the use of  $\lambda$ -characteristics, which are set in the tables as constants for each type of the devices and other components of IC [8, 9]. Therefore, the irradiation parameters can be considered in these characteristics only within certain limits. In the methods offered by us the specified  $\lambda$ -characteristics are not used, but such an important characteristic of irradiation as fluence, varying within a wide range, and the fact, that the irradiation operates on the "area" of a microcircuit irrespective of its functional content, are used. Therefore, the methods offered by us are dubbed as the methods for estimation of a fault tolerance "by the areas". They allow us to compare the fault tolerances in case of various methods of a constant redundancy. By means of the methods it is shown, that the fault tolerance of the proposed component-wise duplicated microcircuit is roughly by an order higher than that of the triplicated microcircuits in case of the ideal, i.e. trouble-free, majority valves, while the quantity of the equipment in such a duplicated microcircuit is much lower than in a triplicated one. In order to increase the fault tolerance of the majority gates and control equipment of large digital systems we offered to use the specified methods of the componentwise duplication [10, 11].

The further increase of the fault tolerance of the micro- and nano IC is possible with the use of the quadruple redundancy of the single transistors. In [12, p. 308, fig. 11.5] the authors present an example of a simultaneously parallel and consecutive duplication of the diodes and inform, that "similar methods can be used for

the resistors, condensers and transistors". This is an old idea. Relatively not long ago in [13-15] the authors proposed a similar method for the parallel and consecutive duplication of the transistors, called by them as the method for construction of a guadded transistor structure. Hereinafter we will call this method as quadration of transistors by analogy with the term offered in [16, p. 7] "quadration of the redudant components", where the term "components" is first of all referred to the diodes, and a reference is given to [12, p. 308], where it is mentioned that similar methods of reservation can be used for the resistors, condensers and transistors. In [13, 14] the quadration of transistors is generalized as a simple case of construction of  $N^2$ -transistor *structure* at N = 2. This  $N^2$ -transistor structure consisting from  $N^2$  of the single transistors, forming N lines and N columns, is offered at N > 2 for increasing the fault tolerance to a bigger number of defects. However, such a structure, which is a development of the quadded structure, demands bigger hardware costs and in those works it was not investigated in detail.

In [14] the proposed method of quadration of transistors is opposed by the known methods of triplication and the method of the quadded logic. It underlines that the errors in the majority valve do not allow us to receive the correct result and cannot be corrected. It also points out that although the quadded logic guarantees the fault tolerance in relation to the majority of the single errors, nevertheless, those errors encountered in the last two steps of the quadded logic circuit, cannot be corrected. In this connection in [15] a "hybrid" circuitry is offered, according to which the first steps of the logic circuit are built as the quadded logic, but in its last steps the quadration of transistors is used.

Although in [13-15] the formulas are presented of the probabilities of failures of the quadrated transistors and the circuits consisting of them, the argument in the formulas is the presented in a letter form probability of failure of a single transistor, which is not revealed. They do not specify the reasons for occurrence of the defects of the single transistors and do not consider the fault tolerance of a microcircuit consisting from the quadrated transistors under the influence of irradiation. The present work investigates the quadration of the transistors in the micro- and nano- IC under irradiation on the basis of the offered and used by us model for estimation of reliability of IC irradiated "by the areas" [1-7].

# 1. Structures of the quadrated transistors and influence of the failures of the single transistors on the failures of the quadrated transistors

Examples of the circuits of quadration of the field transistors, shown in figures *a* and *b*, are completely similar to the circuits presented in [13, 14, figure 2 (*b*), (*c*)]. In these figures the quadrated transistor contains identical single transistors  $T_1 - T_4$ . Inlets *A* of all the single

transistors, which are parts of one quadrated transistor, in a general case can be connected among themselves (in figures a and b the connections are not shown).

The quadrated transistor can be used in the circuits of the logic elements instead of a single transistor. It is protected rather well from the defects of "open circuit" and "short circuit" (SC) types. Thus, it is completely protected from a failure of any single transistor, which makes a part of it, owing to any defect ("open circuit" or "SC"). It is protected, although not completely, but quite well, from the failures of the pairs of single transistors of it owing to the fact that the defects in them are only of one type (table 1). In the case, when in one quadrated transistor there are defects of both types at the same time, the quadrated transistor is partially protected from failures of the three single transistors of it and fails in case of a failure of certain groups of three single transistors (table 2).

Presence in a microcircuit of the defects of a "open circuit" type is more typical for the nano-electronics (in case of a neutron irradiation). Presence in a microcircuit of the defects of "SC" type is more typical for the microelectronics under the influence of the heavy charged particles (HCP).

In [13, 14] alongside with the "open circuit" and SC defects, the defects of bridges between the gates of the transistors are mentioned, namely, the AND-bridge and the OR-bridge defects. However, the defects of bridges are not shown on the circuit of the quadrated transistors and they are not considered in the formulas of failure probability of a quadrated transistor (see Appendix in [14]). Talking about a probability of a non-failure operation of the quadrated transistors we will not consider these defects.

Table 1 presents pairs of single transistors, in each of which the transistors have defects of equal type, and for each pair it is specified, whether the defects in each of the transistors of this pair result in a failure of the quadrated transistor. If they do, column "Failure" contains sign "+", and if they do not, the column "Failure" contains sign "-".

From table 1 it is visible, that, if due to the equal type of a defect three single transistors fail in the quadrated transistor, then a failure of the whole of the quadrated transistor can be caused by either one pair, or two pairs out of these three failed single transistors.

The pairs of the single transistors, the failure of which causes a failure of the quadrated transistor, we will call the *failing pairs*. Number G of the failing pairs depends on the structure of a quadrated transistor and a defect. According to table 1, the numbers of the failing pairs, depending on the structure of the quadrated transistor and the defect, in case of equal type of the defects in the single transistors, will be

$$G_{a,obp} = 2, \ G_{a,K3} = 4, \ G_{b,obp} = 4, \ G_{b,K3} = 2, \ (1.1)$$

where the bottom indexes mean: a and b — types of the structures of the quadrated transistors (see fig. 1, a and 1, b); oбp — the type of defect is "open circuit";  $\kappa_3$  — the type of defect is short circuit ("SC").

The maximal number  $G_{\text{max}}$  of any pairs of the single transistors in a quadrated transistor equals to the number of the combinations from four by two, i.e. 6. The relative probability  $\mu$  that a particle gets into the failing pair of the single transistors will be

$$\mu = G_{\text{OTK}}/G_{\text{max}},\tag{1.2}$$

where  $G_{\text{отк}}$  — number of the failing pairs of the transistors in the quadrated transistor, defined in (1.1).

Then, at the identical type of defects in the single transistors we will get  $\mu = 1/3$ , or  $\mu = 2/3$ .

Now let us consider the cases, when in one quadrated transistor the defects of both types take place simultaneously. The quadrated transistor of the both types of the structures is completely protected from failures in it of any pair of the single transistors, one of which failed owing to a defect in it of one type, and another — owing to a defect of the other type.

Let us consider opportunities for protection of a quadrated transistor from failures of three single transistors, which are a part of it, provided that two of these transistors failed owing to different types of defects. As examples, Table 2 presents the influence of the failures of a group of three single transistors  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  at different combinations of the types of the defects in them, at the operable transistor  $T_4$  on the failures of the quadrated transistor, which has a structure of "a" type. If the defects specified in each line of Table 2 lead to a failure of the quadrated transistor, the column "Failure" contains the sign of "+" and, if they do not lead to its failure, the column "Failure" contains the sign of "-". For each such group of three single transistors in three cases out of six the quadrated transistor will not fail. The number of such groups of three transistors from four single transistors is equal to 4. This means, that in 12 cases out of 24, i.e. in half of the cases of failure of the groups of three single transistors owing to a simultaneous occurrence of the defects of different types, there will be no failure of the quadrated transistor. Similarly, it is possible to show, that in case of the type of structure b of the quadrated transistor it will not fail in 1/3 of cases of failure of the groups of three single transistors owing to occurrence of different defects.

Let us assume that in a quadrated microcircuit only the quadrated logic elements OR-NOT are used. The circuit of a two-input OR-NOT element with an unreserved structure, constructed on the quadrated transistors, contains three such transistors, i.e. only 12 single transistors. However, the quadrated transistors can be used in the duplicated OR-NOT element instead of the duplicated transistors, resistors and diode. Such a twoinput OR-NOT element will demand 10 quadrated transistors or 40 single transistors.

# 2. Features of a quadrated microcircuit and its model

The most simple kind of the microcircuits with the quadrated transistors is the microcircuit consisting from the quadrated logic elements with an unredundancy structure. In such a logic element each single transistor is replaced with a quadrated transistor. We will call such a logic element as a simple quadrated element and, consequently, we will call a microcircuit from such simple logic elements as a simple quadrated microcircuit. In the given work we will discuss only a simple quadrated microcircuit, but, as a rule, we will omit the word "simple" in the name, to make it short.

A microcircuit fails, if one of its quadrated transistors fails. Two variants of the cases of failure of a quadrated transistor, depending on the similarity of the types of defects in it, are possible:

1) unequal types of defects of the single transistors;

2) equal types of defects of the single transistors.

The first variant ensures the greatest fault tolerance of a quadrated microcircuit, because a quadrated transistor does not fail in case of failure of any pair of the single transistors, and it can fail only in case of failure of three single transistors. However, this variant seems to be less probable, than the second variant, which is more probable, but is also considerably less failure-resistant. Therefore, we will consider only the failure cases of the quadrated transistor, the defects in which are of one type. In these cases the quadrated transistor fails depending on its circuit (structure) and the type of defects, if a certain pair of the single transistors fails in it. These are the worst cases, because in each of them a minimal number of the single transistors fails, causing a failure of the quadrated transistor, namely, of two single transistors, which make a failing pair.

A microcircuit from "simple" quadrated logic elements will fail in case, if one of its logic elements fails. This element will fail in case, if one quadrated transistor, making a part it, fails, and the quadrated transistor fails, when one of its failing pairs of the single transistors fails. Thus, "a simple" quadrated microcircuit will fail, if one of its failing pairs of the single transistors in one quadrated transistor fails. At that, the failing pair of the single transistors can fail either under the influence of two particles, each of which hits one single transistor of this pair, or under the influence of one particle, if in case of a small distance between the two single transistors, it can put out of action these two transistors.

Interconnections between the quadrated logic elements and between the quadrated transistors we will call "external", and the interconnections between the single transistors inside every quadrated transistor we will call "internal". We should point out, that when under the influence of one particle "a breakage" occurs of the internal interconnection between two single transistors, which are a part of a failing pair, it can be considered equal to a failure of one of these transistors and, consequently, it can be considered as a defect of the internal interconnection.

We will consider a model of a quadrated microcircuit at three levels:

- at the level of the quadrated logic elements;

— at the level of the quadrated transistors;

— at the level of the single transistors, which are a part of the quadrated transistors.

The sizes of the intervals between the quadrated transistors and, hence, between the quadrated logic elements exceed the sizes of the area of damage in a microcircuit from one irradiating particle. Therefore, one particle cannot put out of action two neighboring quadrated transistors and two neighboring quadrated logic elements. But, as it was already mentioned, the distance between the single transistors, which make a part of one quadrated transistor, may not exceed the sizes of the area of damage from one particle. In this case a hit of one particle between two neighboring single transistors can lead to their simultaneous failure.

At all its levels the model of a quadrated microcircuit, just like in case of the unredudancy and duplicated microcircuits [5], is planar and its area is divided into the adjoining cells. At all the levels of the quadrated microcircuit a cell contains a certain part of the external interconnections, necessary for connection of the quadrated transistors. Since the external interconnections are made so, that they will not fail under the influence of particles, then, for simplification reasons, in the approximated estimations of the fault tolerance of the quadrated microcircuits we will not consider the external interconnections within the cells.

At the level of single transistors a quadrated microcircuit contains cells, identical by their sizes, each of which contains a single transistor and the related internal interconnections.

At the level of the quadrated transistors a quadrated microcircuit contains cells, identical by their sizes, in each of which there are four single transistors and the related internal interconnections.

At the level of the quadrated logic elements the cells of a quadrated microcircuit, in a general case can be unequal by the sizes and the logic functions. However, for simplification reasons, we will assume that the logic elements of this microcircuit are equal by their functions and sizes.

For simplification reasons, we will assume, that the internal interconnections in a quadrated transistor, including the ones, which are a part of the cell at the level of the single transistors, we will not consider as a part of a cell of the quadrated transistor and of a cell of a single transistor.

# 3. Estimation of the probability of a failure of a quadrated microcircuit in case of identical type of defects in the single transistors of a quadrated transistor

Let us estimate probability  $P_1$  of a failure of a single transistor in a quadrated microcircuit, in which only equal types of defects are possible in the single transistors when hit by one particle, by analogy with the formula (1.11) in [5]:

$$P_1 = \Phi_{\rm KB} S_{\rm KB} W, \tag{3.1}$$

where  $\Phi_{\rm KB}$  — fluence for a quadrated microcircuit;  $S_{\rm KB}$  — area of a quadrated microcircuit; W — probability of damage of a unit of the area of a microcircuit when hit by a particle, defined in [5, (1–12)].

The area of  $S_{\rm KB}$  of a quadrated microcircuit without account of the area of the external connections we will present in the following form:

$$S_{\rm KB} = s_{\rm OT} N_{\rm OT}, \tag{3.2}$$

where  $s_{ot}$  — the area of a cell of the bottom level of the microcircuit containing one single transistor;  $N_{ot}$  — number of single transistors in a quadrated microcircuit.

If we accept  $S_{\rm KB} = 1 \text{ cm}^2$ , then from (3.2) we will find:

$$s_{\rm ot} = (1/N_{\rm ot}) \, {\rm cm}^2.$$

Let us insert (3.2) in (3.1):

$$P_1 = \Phi_{\rm KB} S_{\rm OT} N_{\rm OT} W. \tag{3.3}$$

Since every quadrated transistor contains four single transistors, then

$$N_{\rm ot} = 4N_{\rm KB},\tag{3.4}$$

where  $N_{\rm KB}$  — number of the quadrated transistors in a quadrated microcircuit:

$$N_{\rm KB} = N_{\rm JII} n_{\rm KB.T}, \qquad (3.5)$$

where  $N_{\rm T3}$  — number of the quadrated logic elements in a microcircuit,  $n_{\rm KB,T}$  — number of the quadrated transistors in one quadrated logic element; for simplification reasons, we assume the value of  $n_{\rm KB,T}$  as constant.

The probability  $P_{kv}$  that one particle or two particles hit one quadrated transistor of a microcircuit and damage two single transistors, will be

$$P_{\rm KB.T} = P_1^2 / N_{\rm KB}. \tag{3.6}$$

Now, let us find probability  $P_{kv,\Pi}$  that one particle or two particles hit two different single transistors, which are a part of one quadrated transistor, i.e. one of any pairs from  $G_{max}$  pairs of single transistors of one quadrated transistor:

$$P_{\rm KB.\Pi} = P_1^2 / (N_{\rm KB} G_{\rm max}). \tag{3.7}$$

As it was already mentioned, a quadrated transistor will fail, if two damaged single transistors are a part of the failing pair of this quadrated transistor.

Probability  $P_{\rm M}$  of a failure of a quadrated microcircuit, when one particle or two particles hit different single transistors of the failing pair of one quadrated transistor, we will find as the probability that the pair of the single transistors of one quadrated transistor, damaged by two particles or one particle, will appear failing:

$$P_{\rm M} = \mu P_{\rm KB.\Pi},\tag{3.8}$$

where probability  $P_{kv-p}$  is defined in the formula (3.7), value of  $\mu$  — in (1.2).

By inserting (3.7) and (3.3) in (3.8), we will receive

$$P_{\rm M} = \mu (\Phi_{\rm KB} s_{\rm OT} N_{\rm OT} W)^2 / (N_{\rm KB} G_{\rm max}).$$
(3.9)

# 4. Comparison of the fault tolerances of the component-wise duplicated and quadrated microcircuits

Let us compare the fault tolerances of the quadrated microcircuits, constructed from the quadrated logic elements without a reservation of their structure, and of the component-wise duplicated microcircuits.

Let us find index  $\alpha_{\text{2-M}}$  of variation of the fault tolerance:

$$\alpha_{2-M} = P_2 / P_M, \tag{4.1}$$

where  $P_2$  — probability of a failure of a componentwise duplicated microcircuit;  $P_{\rm M}$  — probability of a failure of a quadrated microcircuit with the quadrated logic elements without a reservation of their structure, defined in (3.8).

The probability of a failure of a component-wise duplicated microcircuit is defined in [6, (1.12)]:

$$P_2 = P_{\Pi}^2 / (0,5N), \tag{4.2}$$

where  $P_{\Pi}$  — probability of a failure of at least one cell in one of the two subsets corresponding to a half of the cells of the duplicated microcircuit and containing N of unpaired cells, during irradiation up to a failure of the microcircuit; N — number of the duplicated components of the microcircuit.

Probability  $P_{\Pi}$  is defined in [5, (2.1)]:

$$P_{\Pi} = \Phi_{\Pi} S_{\Pi,\Pi} W, \qquad (4.3)$$

where  $\Phi_{\rm g}$  — fluence for the duplicated microcircuit during irradiation up to a failure of the microcircuit,  $S_{\rm g.n}$  — area of a hypothetical unreserved microcircuit containing *N* of the duplicated cells, *W* — see (3.1).

Let us insert (4.3) in (4.2):

$$P_2 = (\Phi_{\rm g} S_{\rm g.n} W)^2 / (0,5N). \tag{4.4}$$

For convenience of calculation of index  $\alpha_{2-M}$  of the variation of fault tolerance under formula (4.1) we will

specify correspondence between the values, which are a part the formulas (3.8) and (4.4).

Value N in the formula (4.4) corresponds to the number of  $N_{\rm KB}$  of the quadrated transistors in a quadrated microcircuit:

$$N = N_{\rm KB}.\tag{4.5}$$

Area  $S_{\mu,\Pi}$  corresponds to the area, which is occupied by a quarter of the number of the single transistors in a quadrated microcircuit:

$$S_{\rm II,II} = k s_{\rm 0,T} N_{\rm 0,T} / 4,$$
 (4.6)

where k — number of the single transistors in a cell of the bottom level of the microcircuit;  $s_{0.T}$  — area occupied by a single transistor;  $N_{0.T}$  — number of the single transistors in a quadrated microcircuit;  $s_{0T}$  and  $N_{0.T}$ were defined above in formulas (3.2) and (3.4).

Taking into account (3.4) from (4.6) we will receive:

$$S_{\mathrm{I}.\Pi} = k s_{\mathrm{o}.\mathrm{T}} N_{\mathrm{KB}}.$$

Fluence  $\Phi_{\pi}$  for the duplicated microcircuit may not coincide with fluence  $\Phi_{\kappa B}$  for a quadrated microcircuit. For simplification of the estimation we will assume that fluence  $\Phi_{\pi}$  is equal to fluence  $\Phi_{\kappa B}$ :

$$\Phi_{\rm ff} = \Phi_{\rm KB}.\tag{4.8}$$

Let us implement replacements of (4.5), (4.7), (4.8) in (4.4):

$$P_2 = (\Phi_{\rm KB} k s_{\rm 0,T} N_{\rm KB} W)^2 / (0,5 N_{\rm KB}).$$
(4.9)

Having inserted (4.9) and (3.9) in (4.1), after transformations we will receive:

$$\alpha_{2-M} = k^2 G_{\text{max}} / 8\mu. \tag{4.10}$$

Since for the quadrated microcircuit  $G_{\text{max}} = 6$ and, at that, the relative probability  $\mu$  acquires two values, out of (4-10) at k = 1 we get minimal values of  $\alpha_{2-M} = 2.25$  at  $\mu = 1/3$  and  $\alpha_{2-M} = 1.125$  at  $\mu = 2/3$ . In fact  $k \gg 1$ . For example, in a duplicated microcircuit without quadration of the transistors the duplicated logic element (in case of replacement of the resistors and diode by transistors) contains seven single transistors. In this case at k = 7 ([7, fig. 2]), we will get accordingly  $\alpha_{2-M} = 110.25$  at  $\mu = 1/3$  and  $\alpha_{2-M} = 55.125$  at  $\mu = 2/3$ , i.e. in this case the probability of a failure of a quadrated microcircuit in comparison with the probability of a failure of a duplicated microcircuit decreases 100 and 50 times. There is an essential reserve for a decrease of the probability of a failure of a quadrated microcircuit in case of the unequal types of defects in the single transistors of a quadrated transistor, because in this case it does not work in case of a failure of three single transistors, but in case of a failure of two single transistors preserves its operability. Thereof, an essential decrease of the probability of a failure (approximately by three orders) is ensured, at that, without an increase of the hardware costs.

We should point out, that in a "simple" quadrated microcircuit the hardware costs can be less, than in a duplicated microcircuit constructed on the logic elements with a reserved structure. Thus, a quadrated two-input OR-NOT logic element without a reservation of its structure contains three quadrated transistors or 12 single transistors, while the duplicated logic element realizing the same logic function, with a duplicated structure and without the use of the quadrated transistors (see, for example, [7], fig. 2 with replacement of the resistors and the diode by single transistors) contains from 14 up to 20 single transistors, depending on the internal reservation in the duplicated logic element.

A possible way to improve the fault tolerance of the microcircuits is to increase the reservation ratio of the transistors in comparison with their quadration, namely, to use  $N^2$ -transistor structures (at  $N \ge 3$ ), which require higher hardware costs [13, 14].

## Conclusion

It was shown, that the quadrated microcircuits with the identical types of defects in the single transistors in comparison with the component-wise duplicated microcircuits ensured an essential reduction of the probability of a failure under the influence of irradiation (by one or two orders). At that, the latter could be less economic by the hardware costs.

The most essential decrease of the probability of a failure of the quadrated microcircuits, at that, without an increase of the hardware costs, was reached in the case when in a quadrated microcircuit "simple" quadrated transistors failed owing to unequal types of the defects in the single transistors.

#### References

1. Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Sposob postoyannogo poelementnogo dublirovaniya v diskretnykh electronnykh systemakh (varianty). Patent RF na izobretenie № 2475820 ot 10.08.2011, klassy MPK G06F11/16, H03K19/007 (in Russian).

2. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L., Cvechnikov A. B. Deystvie izlucheniy na materially, pribory i skhemy nanoelectroniki, *Yadernaya fizika i Inzhiniring*, 2013, vol. 4, no. 6, pp. 590–596 (in Russian).

3. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Ob otkazoustoychivosti nanoelectronnykh itegral'nykh skhem pri obluchenii, *Nano- i mikrosystemnaya tekhnika*, 2014, no. 1, pp. 1–14 (in Russian).

4. Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Nanoelectronika i radiatsia, *Priroda*, 2015, no. 1, pp. 14–21 (in Russian).

5. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Otkazoustoychivost' pokomponentno dublirovannoy microsrhemy pri obluchenii, *Nano- i mikrosystemnaya tekhnika*, 2015, no. 3, pp. 10–23 (in Russian).

6. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Sravnitel'nye otsenki otkazoustoychivosti mazhoritarno rezervirovannykh i pokomponentno dublirovannykh microckhem pri obluchenii, *Nano- i mikrosystemnaya tekhnika*, 2016, no. 3, pp. 176–196 (in Russian).

7. Aleksandrov P. A., Budaragin V. V., Goremykin A. M., Zhuk V. I., Litvinov V. L. O postroenii dublirovannykh logicheckikh elementov dlya povysheniya otkazoustoychivosti microskhem pri obluchenii, *Nano- i mikrosystemnaya tekhnika*, 2016, no. 4, pp. 239–256 (in Russian).

8. Chekanov A. N. Raschety I obespechenie nadezhnosti electronnoy apparatury. Moscow, KNORUS, 2012. 440 p. (in Russian).

9. **Bragin I.** Raschet nadezhnosti (08.2003). http:tvskit// tvskit.narod.ru/stati/stati21/stati21.html (in Russian)

10. Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Sposob rezervirovanya mazhoritarnykh klapanov, Moscow, NITS "Kurchatovskiy institut", 2014, Nou-khau No. 183/2014 (in Russian).

11. Aleksandrov P. A., Zhuk V. I., Vetrov V. A., Stel'mak S. E. Sposob postroenya kontrol'noy apparatury postoyannogo dublirovania krupnykh uzlov tsifrovykh system, Moscow, NITS "Kurchatovskiy institut", 2014, Nou-khau No. 180/2014 (in Russian).

12. **Baytser B.** *Arkhitektura vychislitel'nykh kompleksov* / per. s angl. Selivanova Yu. P., Kvasova B. A., Moscow, Mir, 1974, vol. 2. 568 p. (in Russian).

13. Aiman H. Maleh, Bashir M. Al-Hashimir, Aissa Melouki. Transistor-Level Based Defect-Tolerance for Reliable Nanoelectronics. — Computer Systems and Applications, 2008. *AICCSA* 2008. *IEEE/ACS International Conference on. 31 March—4 April* 2008. http://www.ccse.kfupm.edu.sa/~aimane/pub/Transistor-Level%20Based%20Defect-Tolerance%20for%20Reliable%20 Nanoelectronics\_AICCSA-08.pdf

14. Aiman H. Maleh, Bashir M. Al-Hashimir, Aissa Melouki, Farhan Khan. Defect Tolerant  $N^2$ - Transistor Structure for Reliable Nanoelectronic Designs. *IET Computers & Digital Techniques*, November 2009. vol. 3, is. 6, pp. 570–580. (with Appendix). http://eprints.soton.ac.uk/267678/1/IET\_DefectTolerant-StrucureNanoelectronics.pdf

15. Han J., Leung E., Lie L., Lombardi F. A Fault-Tolerant Technique using Quadded Logic and Quadded Transistors, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) System*, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 1562–1566.

16. **Zhuk V. I.** O vozmozhnosti primeniya apparatnykh metodov povyshniya nadezhnosti raboty operativnykh i polupostoyannykh zapominayuschikh ustroystv, ispol'zuemykh v uslovyakh povyshennoy radiatsii. Preprint IAE-6577/16, Moscow: RNTS "Kurchatovskiy institute", 2008. 19 p. (in Russian).

УДК 623.4.084.2

DOI: 10.17587/nmst.20.124-128

**А. С. Шалимов**, канд. техн. наук, науч. сотр., доц., e-mail: 85e@mail.ru, **С. П. Тимошенков**, д-р техн. наук, проф., директор, e-mail: spt@miee.ru, **М. С. Головинский**, инженер, e-mail: maxim1112010@mail.ru, **Л. И. Долговых**, инженер, e-mail: timfox@inbox.ru, **В. В. Калугин**, д-р техн. наук, проф., e-mail: viktor118@mail.ru, **Чжо Мье Аунг**, аспирант, e-mail: sitbolay@gmail.com, Институт НМСТ Национального исследовательского университета "Московский институт электронной техники"

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТЫ И САМОКАЛИБРОВКИ МЭМС-ИНКЛИНОМЕТРА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Поступила в редакцию 14.07.2017

Данные об исследовании шумов акселерометров были использованы для расчета возможного разрешения МЭМС-инклинометра. Конструкторские расчеты позволяют оценить надежность и эффективность работы МЭМС-инклинометра под действием внешних воздействующих факторов. В целях обеспечения импортозамещения было предложено решение, позволяющее разработать МЭМС-инклинометр, не уступающий по функциональным параметрам зарубежным аналогам и реализующий функцию самокалибровки.

**Ключевые слова:** инклинометр, акселерометр, внешний воздействующие факторы, самокалибровка датчиков, технология защиты, МЭМС

# Введение

Инклинометр — микромеханическая электронная система, предназначенная для измерения угла наклона объекта относительно гравитационного поля Земли. В состав датчика входят преобразователи линейного ускорения (ПЛУ), основная задача которых — измерение ускорения, направленного вдоль измерительной оси, с помощью микромеханического чувствительного элемента (ЧЭ), изготовленного по объемной технологии, микроконтроллер (МК) и другие периферийные устройства. Различают три основные группы датчиков наклона: одноосевые (ось X), двухосевые (оси X и Y) и трехосевые (оси X, Y и Z).

Инклинометр может найти свое применение в различных областях науки и техники:

— самолетостроении, машиностроении, в том числе в системах компенсации и стабилизации;

 в системах измерения угла наклона платформ радиолокационных антенн;

 при мониторинге строительных инженерных сооружений, природных объектов, горных выработок; — при исследовании изгибных деформаций элементов строительных и других конструкций.

Сигнал от ПЛУ сначала поступает на МК, который затем преобразует его из аналоговой формы в цифровой код в соответствии с одним из общеизвестных интерфейсов передачи данных (UART, I2C, SPI и др.).

На сегодняшний день существует много видов инклинометров, которые могут быть классифицированы по типам ЧЭ, по способам обработки сигналов, по способам вывода сигнала от электронного устройства (ЭУ), по конструкции. Крупнейшими зарубежными производителями инклинометров являются такие фирмы, как Analog Devices, Colibrys, Memsic.

Актуальность проводимой работы заключается в предложенном решении, позволяющем разработать МЭМС-инклинометр (МИ), функциональные параметры которого не уступают зарубежным аналогам, а его конструктивное решение обеспечивает возможность работы в условиях действия различных внешних воздействующих факторов (ВВФ), что потенциально дает возможность реализовать также функцию самокалибровки датчика.

# Анализ ключевых функциональных параметров МЭМС-инклинометра

Одним из ключевых параметров, определяющим качество функционирования МИ (точность измерения угла наклона), является уровень собственных шумов. Главным источником шумов в данном устройстве являются ПЛУ, реализующие функцию первичного преобразователя ускорения в электрический сигнал. В табл. 1 представлены данные о результатах измерения среднего квадратичного отклонения шума (СКО) ПЛУ, разработанных в НИУ МИЭТ [1—3].

Исходя из данных табл. 1, можно сделать вывод о том, что среднее значение СКО шума для предложенной выборки образцов (диапазон измеряемых ускорений  $\pm 1$  g) в диапазоне частот 0,1...1 Гц составляет 0,25 мВ. Для инклинометра целесообразнее использовать ПЛУ на диапазон  $\pm 1$  g, масштабный коэффициент которых (*K*) составляет около 2 B/g, но при необходимости можно также рассматривать возможность применения ПЛУ на диапазон  $\pm 5$  g ценой ухудшения измерительной точности.

Выражение, устанавливающее связь между выходным сигналом ПЛУ ( $U_{\text{вых}}$ ), приложенным ускорением (g) и его нулевым сигналом ( $U_0$ ) имеет вид:

$$U_{\rm Bbix} = Kg + U_0. \tag{1}$$

С учетом того, что в случае инклинометра нужно оценивать не само ускорение, а угол поворота ( $\alpha$ )

Значения СКО шума ПЛУ

Диапазон измеряемых ускорений Range of the measured accelerations	±1 g	±5 g
СКО шума ПЛУ в частотном диапазоне 0,11 Гц AQD noise of CLA in the frequency range of 0,11 Hz	0,10,4 mV	0,10,9 mV

как величину, связанную с ним, и при этом диапазон измеряемых ускорений не превышает значения  $\pm 1$  g, выражение (1) примет вид:

$$U_{\rm BMX} = Kg \cdot \sin\alpha + U_0. \tag{2}$$

Нулевой сигнал в данной оценке учитывать не будем, так как при самокалибровке датчиков его значение может быть сведено к минимальному. Таким образом, можно оценить разрешающую способность инклинометра, учитывая, что sin $\alpha \approx \alpha$  при  $\alpha \rightarrow 0$ :

$$\sin \alpha = \frac{CKO}{Kg} \approx \alpha.$$
(3)

Соответственно, можем получить оценку значения угла:

$$\alpha \approx \frac{\text{CKO}}{Kg} \approx \frac{0.25 \text{ MB}}{1g \cdot 2\frac{B}{g}} \approx 0.125^{\circ}.$$
 (4)

В работе [4] представлены исследования влияния магнитных потоков на погрешности калибровки инклинометров. Во избежание искажения значений инклинометра были отобраны несколько немагнитных материалов, приведенных в табл. 2.

Для корпуса МИ из представленных материалов был выбран сплав алюминия Д16Т.

Для изготовления многослойной печатной платы подходящим вариантом был стеклотекстолит марки FR4 KB-6167F фирмы *Kingboard* с температурой стеклования 135 °С. Для металлического покрытия была использована медная фольга толщиной 35 мкм.

В качестве препрега использован КВ-6067 1080 толщиной 69 мкм, а фольга — толщиной 35 мкм.

Основная задача при разработке конструкции МИ — расположить три акселерометра соответственно по трем осям *X*, *Y*, *Z*.

Конструкция блока представлена на рис. 1, на рис. 2 — компоновка блока. Контакт ячеек между собой достигается за счет объемных проводников. Внешние выводы выполнены с помощью герметичного разъема.

Корпус МИ имеет много функций, в том числе защита от влаги и электромагнитного излучения,





**Рис. 1. Конструкция блока** Fig. 1. Unit design

**Рис. 2. Компоновка блока** *Fig. 2. Unit configuration* 

Таблица 2 *Table 2* 

Основные характеристики немагнитных материалов	[5]
Basic characteristics of the nonmagnetic materials [5]	!

Наименование	Марка	Модуль упругости	Предел прочности Ultimate strength, MPa	Плотность	Магнитная проницаемость
Name	Brand	Elasticity module, GPa		Density, g/cm <sup>3</sup>	Magnetic permeability
Алюминиевые сплавы	Д16Т	72	450	2,78	<1,01
Aluminum alloys	B95	74	560600	2,85	<1,01
Марганцевые чугуны Manganese irons	ЧГ6СЗШ ЧГ7Х4 ЧГ8Д3		490 150 150		
Ayстенитные стали Austenitic steels	12X18H9 08X18H10T	 198 196	550600 420520 470740	7,7 7,9 7,8	<1,05

на корпусе имеется теплоотвод для защиты от термоударов.

Для надежной работы устройства ЧЭ были зафиксированы в пазах корпуса с помощью клея ВК-9. Крепление печатных плат с МК выполнено с помощью винтов М1.6h5.5.

Герметизация корпуса выполнена с помощью паяного шва. Предварительно были проведены следующие операции:

- укладка резиновой прокладки ИРП-1267 для большей герметичности;
- укладка стальной проволоки диаметром 0,8 мм по периметру паяного шва.

Для создания инертной среды внутри корпуса использован азот.

# Заключение

В результате выполненной работы было найдено оптимальное решение для построения МЭМСинклинометра. Проведенные исследования позволили оценить качественные характеристики. Проблема импортозамещения была решена частично.

## Список литературы

1. Семёнов А. Н., Шалимов А. С., Зуев Е. В. Исследование возможности создания на БМК 5503 микросхемы управления емкостным преобразователем линейного ускорения // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 11. С. 49—51.

2. Тимошенков С. П., Шалимов А. С., Кочурина Е. С., Naing S. M., Bushnak A. R. Исследование статических характеристик емкостного преобразователя линейного ускорения на базе микросхемы отечественного производства // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 4 (96). С. 90—92.

3. Shalimov A., Timoshenkov S., Korobova N., Golovinskiy M., Timoshenkov A., Zuev E., Berezueva S., Kosolapov A. Comb structure analysis of the capacitive sensitive element in MEMS accelerometer // Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VII Conference (SPIE.DSS). 2015. Vol. 9467. P. 82.

4. Гарейшин З. Г., Газизов М. Н. Исследования влияния магнитной массы каротажного подъемника на погрешности калибровки скважинных инклинометров // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2012. № 6. С. 313—332. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Gareyshin/Gareyshin\_2.pdf.

5. Ульянов И. А. Материалы элементов конструкции установки для поверки и калибровки магнитных инклинометров // Вестник науки Сибири. 2011. № 1 (1). С. 142—148.

A. S. Shalimov, Ph. D., Researcher, Associate Professor, 85e@mail.ru, S. P. Timoshenkov, D. Sc., Professor, Director of Institute NMST MIET, spt@miee.ru, M. S. Golovinsky, Engineer, maxim1112010@mail.ru,
L. I. Dolgovykh, Engineer, timfox@inbox.ru, V. V. Kalugin, D.Sc., Professor, viktor118@mail.ru,
Chjo Me Aung, Postgraduate Student, sitbolay@gmail.com,
NMST Institute of National Research University of Electronic Technology (MIET) Moscow 124498 Russia

NMST Institute of National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, 124498, Russia

Corresponding author:

Shalimov Andrey S., Ph. D., Researcher, Associate Professor, NMST Institute of National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, 124498, Russia, 85e@mail.ru

# Operation and Self-calibration of MEMS Inclinometer under the External Influencing Factors

Received on July 07, 2017 Accepted on August 28, 2017

Research data concerning the noise of accelerometers were used to calculate a possible solution. The layout scheme was developed for a design of an inclinometer. The inclinometer is a micromechanical electronic system intended to measure the inclination angle of an object in relation to the Earth's gravitational field. The sensor consists of the linear acceleration converters, the purpose of which is to measure the acceleration directed along the measuring axis by means of a micromechanical sensing element manufactured by the volumetric technology, a microcontroller and other peripheral devices. The engineering calculations allow us to estimate the reliability and efficiency of operation of MEMS inclinometer under the external influencing factors. The case of the MEMS inclinometer has many functions: protection from moisture and EMP, its body has a heat sink for protection against a thermal shock. A protection technology was developed to ensure a reliable operation of the inclinometer under the influence of the external factors. In order to ensure an import substitution, a solution was proposed, which will make it possible to develop a MEMS inclinometer (MI) and achieve the values of the functional parameters, not inferior to the analogues. The conducted research works allowed us to evaluate its qualitative characteristics. The problem of import substitution was partially solved.

Keywords: inclinometer; accelerometer; external influencing factors; self-calibration of sensors; protection technology, MEMS

For citation:

Shalimov A. S., Timoshenkov S. P., Golovinsky M. S., Dolgovykh L. I., Kalugin V. V., Chjo Me Aung. Operation and Self-calibration of MEMS Inclinometer under the External Influencing Factors, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 124–128.

DOI: 10.17857/nmst.20.124-128

# Introduction

*An inclinometer* is a micromechanical electronic system for measurement of the angle of inclination of an object in relation to the gravitational field of the Earth. The composition of the sensor includes converters of linear acceleration (CLA), the primary goal of which is measurement of the acceleration directed along the measuring axis, by means of a micromechanical sensitive element (SE) made by the volume technology, a microcontroller (MC) and other peripheral units.

There are three basic groups of sensors of inclination, these are one-axial (axis X), two-axial (axes X and Y) and three axial (axes X, Y and Z).

The inclinometer can find its application in various spheres of science and technologies:

- aircraft industry, mechanical engineering, including for the compensation and stabilization purposes;

— in the systems for measurement of the angles of inclination of the radar platforms;

 monitoring of the engineering constructions, natural objects and mines;

- research of the bend deformations of the construction elements and other designs.

A signal from CLA comes to MC, which transforms it from the analogue form into a digital code, according

to one of well-known interfaces for data transmission (UART, I2C, SPI, etc.).

There are many kinds of inclinometers, which can be classified by types of SE, by the methods of signal processing, by the output of a signal from an electronic device (ED), and by the design. The largest foreign manufacturers of the inclinometers are Analog Devices, Colibrys and Memsic companies.

The importance of the undertaken work consists in the proposed solution, allowing to develop a MEMS inclinometer (MI), the functional parameters of which do not concede to the foreign analogues, while its design solution provides a possibility of operation in the conditions of various external influencing factors (EIF), which potentially gives a chance to realize the function of self-calibration of the sensor.

# Analysis of the key functional parameters of MI

One of the key parameters, which determines the quality of functioning of MI (accuracy of measurement of the angle of inclination), is the level of the own noises. The main source of the noises in the device is CLA, realizing the function of the primary converter of acceleration into an electric signal. Table 1 presents the data concerning the results of measurement of an av-

erage quadratic deviation of noise (AQD) of CLA, developed in MIET [1-3].

Proceeding from the data, it is possible to draw a conclusion that an average value of AQD noise for the proposed samples (range of accelerations  $\pm 1$  g) in the range of frequencies of 0.1...1 Hz equals to 0.25 mV. For the inclinometer it is more expedient to use CLA for the range of  $\pm 1$ g, the scale factor (*K*) of which is about 2 V/g, but if, necessary, it is possible to consider also a possibility of application of CLA for the range of  $\pm 5$  g at the expense of deterioration of the measuring accuracy.

The expression, which establishes connection between the output signal of CLA ( $U_{\text{BbIX}}$ ), applied acceleration (g) and its zero signal ( $U_0$ ) looks like the following:

$$U_{\rm BMX} = Kg + U_0. \tag{1}$$

Considering the fact that in case of the inclinometer it is necessary to estimate not acceleration, but the angle of a turn ( $\alpha$ ) as the value connected with it, and, at that, the range of the measured accelerations does not exceed the value of  $\pm 1$  g, the expression (1) will look like the following:

$$U_{\rm BMX} = Kg \sin\alpha + U_0. \tag{2}$$

In the given estimation we will not take into account the zero signal, because during a self-calibration of the sensors its value can be minimized. Thus, it is possible to estimate the resolution power of the inclinometer, considering, that  $\sin \alpha \approx \alpha$  at  $\alpha \rightarrow 0$ :

$$\sin \alpha = \frac{CKO}{Kg} \approx \alpha.$$
 (3)

Accordingly, we can estimate the value of an angle:

$$\alpha \approx \frac{\text{CKO}}{Kg} \approx \frac{0.25 \text{ mV}}{1g \cdot 2\frac{V}{g}} \approx 0,125^{\circ}.$$
 (4)

In [4] the research is presented of the influence of the magnetic flows on an error of calibration of the inclinometers. In order to avoid distortion of the values of the inclinometer, several nonmagnetic materials were selected and presented in table 2.

From the presented materials for the case of MI the D16T aluminum alloy was selected.

A suitable material for manufacturing of a multilayer printed-circuit board was FR4 KB-6167F glass-cloth laminate from *Kingboard Co.* with the temperature of vitrification of 135 °C. For the metal covering a copper foil with 35 micrometer thickness was used.

As a prepreg, KV-6067 1080 with thickness of 69  $\mu$ m was used, and the foil with thickness of 35  $\mu$ m.

The primary goal in development of MI design was to arrange three accelerometers on three axes of *X*, *Y*, *Z*.

The design of the unit is presented in fig. 1, and in fig. 2 - the configuration of the unit. The contact between the cells themselves is reached due to the volume conductors. The external outlets are made by means of a tight socket.

Case of MI has many functions, including protection against moisture and electromagnetic radiation, on the case there is a heat-conducting path for protection against the thermoblows.

In order to ensure a reliable operation of the device, SE are fixed in the grooves of the case by means of VK-9 glue. Fastening of the printed-circuit boards with MC is done by means of M1.6h5.5 screws.

The hermetic sealing of the case is implemented with the help of a soldered seam. The following preliminary operations were implemented:

- Packing of IPP-1267 rubber gasket was done in order to ensure the proper tightness;
- A steel wire with diameter of 0.8 mm was laid on the perimeter of the soldered seam;

Nitrogen was used for creation of an inert environment within the case.

#### Conclusion

As a result of the implemented work the optimum solution was found for the design of the MEMS inclinometer. The carried out research allowed us to estimate its qualitative characteristics. The problem of import substitution was partially solved.

## References

1. Semenov A. N., Shalimov A. S., Zuev E. V. Issledovanie vozmozhnosti sozdanija na BMK 5503 mikroshemy upravleniya emkostnim preobrazovatelem linejnogo uskorenija. Nano- and Mikrosystemnaya tekhnika, 2014, no. 11, pp. 49–51 (in Russian).

2. Timoshenkov S. P., Shalimov A. S., Kochurina E. S., Naing S. M., Bushnak A. R. Issledovanie staticheskih harakteristik emkostnogo preobrazovatelja linejnogo uskorenija na baze mikroshemy otechestvennogo proizvodstva. *Proceedings of universities. Electronics*, 2012, no. 4 (96), pp. 90–92 (in Russian).

3. Timoshenkov S., Kalugin V., Shalimov A., Timoshenkov A., Golovinskiy M., Berezueva S. Measurement of capacitive accelerometer with decreased nonlinearity of static characteristic, *International Conference on Intelligent Materials and Manufacturing Engineering (IMME 2015)*, 2015, P. 43.

4. Gareyshin Z. G., Gazizov M. N. Issledovanija vlijanija magnitnoj massy karotazhnogo pod#jomnika na pogreshnosti kalibrovki skvazhinnyh inklinometrov, *Online scientific magazine* "*Neftegazovoye Delo*", 2012, pp. 313–332. URL: http://www.ogbus.ru/authors/ Gareyshin/Gareyshin\_ 2.pdf (in Russian).

5. **Ulyanov I. A.** Materialy jelementov konstrukcii ustanovki dlja poverki i kalibrovki magnitnyh inklinometrov. *Vestnik nauki Sibiri*, 2011, no. 1 (1), pp. 142–148 (in Russian).

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

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Н. В. Яшина.

Сдано в набор 21.12.2017. Подписано в печать 25.01.2018. Формат 60×88 1/8. Заказ MC0218. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

# Рисунки к статье Н. А. Торхова, Е. В. Никульниковой «Методы АСМ для контроля качества *p*<sup>+</sup> – *n*-переходов GaAs»

N. A. Torkhov, E. V. Nikulnikova

«Methods of AFM for p+ - n-junction GaAs Quality Control»









Рис. 2. АСМ-изображения рельефа поверхности  $p^+ - n$  GaAs{100} (*a*), его КРП поверхности (белые области соответствуют потенциальным ямам для электронов «*e*» (белые стрелки), темные области – потенциальным ямам для дырок «*h*» (черные стрелки) (*b*), КРП поперечного сечения интерфейса  $p^{++} - n$ -перехода (*c*)

Fig. 2. AFM images of the relief of the surface of  $p^+n - GaAs\{100\}$  (a), its CPD of the surface (white areas correspond to the potential wells for electrons «e» (white arrows), dark areas – to the potential wells for holes «h» (black arrows) (b), CPD of the cross-section of the interface of  $p^{++}n$  junction (c)

Рис. 4. АСМ-изображение участка исходной химически окисленной поверхности. Стрелками указаны точки измерения ВАХ кантилевера *Ipr*-методом (*a*); кривые подвода *1* и отвода *2* кантилевера к исходной ХОП DFL-1 и отожженной при 360 °C DFL-2 поверхностям (*b*). ВАХ 1 и 2 кантилевера в точках *1* и *2* исходной ХОП и типичная ВАХ 3 кантилевера в точке ХОП после отжига 360 °C (*c*)

Fig. 4. AFM image of a section of the initial chemically oxidized surface. Arrows show the points of measurement of VAC of the cantilever by Ipr method (a); curves of advance 1 and retract 2 of the cantilever to the initial COS DFL-1 and annealed at 360 °C DFL-2 surfaces (b). VAC 1 and 2 of the cantilever in points 1 and 2 of the initial COS and typical VAC 3 of the cantilever in point of COS after annealing at 360 °C (c) Рисунки к статье А. В. Корлякова, А. В. Лагоша «КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО КЛЮЧА СВЧ ДИАПАЗОНА»

10000

0

A. V. Korlyakov, A. V. Lagosh

«CRITERION FOR OPTIMIZATION OF THE MICROMECHANICAL SWITCH FOR RF BAND»



Рис. 7. Бистабильная конструкция ключа с «внутренним» закреплением торсионных подвесов: *a* – вид сверху; *b* – боковые сечения

Fig. 7. Bistable design of a switch with «internal» fastening of the torsion suspensions: a - top view; b - lateral sections



Рис. 8. Технология изготовления ВЧ МЭМС-ключа на основе пленки карбида кремния

Fig. 8. Technology for manufacturing of the RF MEMS switch based on the silicon carbide film