

ISSN 1813-8586

# НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

Том 25. № 5. 2023





Рисунки к статье П. П. Мальцева, А. А. Ганжи, В. Ю. Павлова, А. О. Михалёва,  
А. И. Козлитина, В. В. Сарайкина

# «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ НИТЕЙ С НАНООСТРОВКОВОЙ ТОПОЛОГИЕЙ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР АЛЮМИНИЯ»

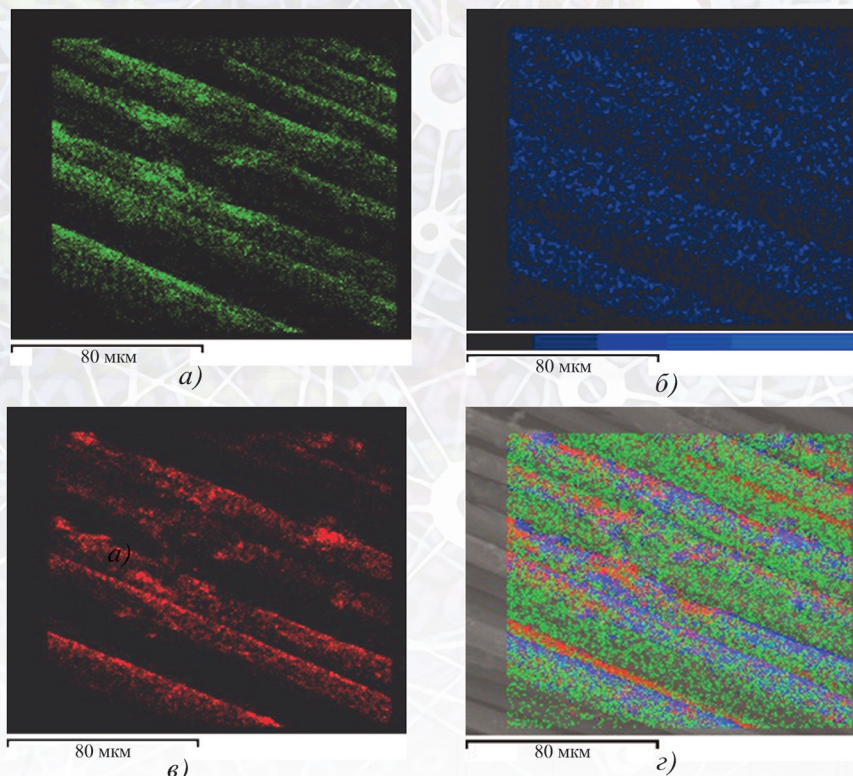


Рис. 3. Фотографии карт RGB, представляющих собой распределения C (а), Cl (б), Al (в) и наложение карт C, Cl, Al (г) поверхности полимерной нити с наноостровковой топологией наногетероструктур алюминия

Рисунки к статье С. А. Жуковой, Д. Ю. Обижаева, С. Ю. Суздальцева

# «ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ГЕРМЕТИЗАЦИИ НА УРОВНЕ ПЛАСТИН ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА»

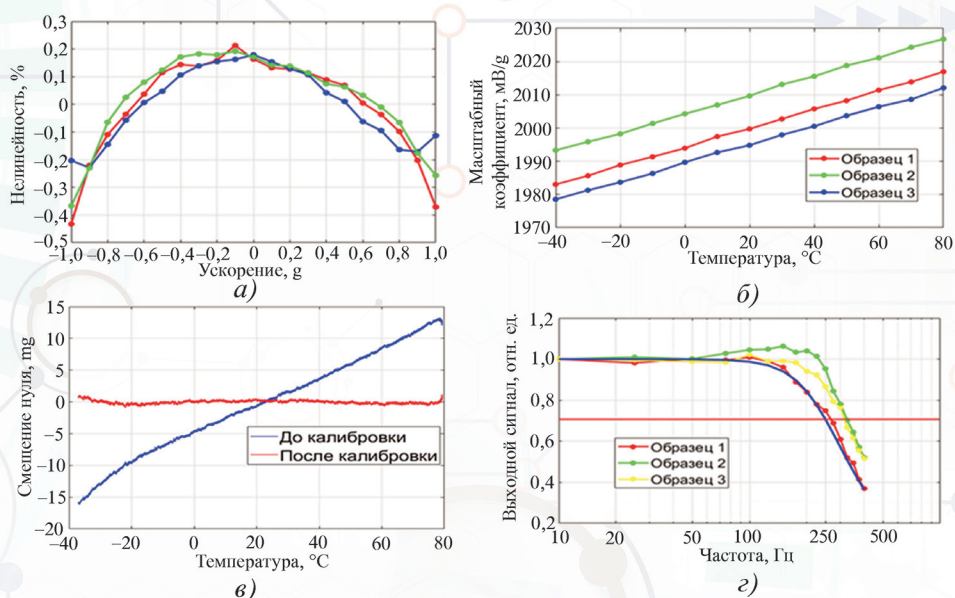


Рис. 8. Влияние внешних условий эксплуатации ММА маятникового типа на выходные характеристики: а – нелинейность; б – масштабный коэффициент; в – смещение нуля; г – амплитудно-частотная характеристика



# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 25. № 5 ♦ 2023

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.

Журнал включен в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным специальностям 1.3.11. — Физика полупроводников (физ.-мат., техн.), 2.2.2. — Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств (физ.-мат., техн.).

2.2.3. — Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (техн.), 2.2.9. — Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (техн.), 1.4.15. — Химия твердого тела (хим., техн., физ.-мат.).

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук. Статьи имеют DOI

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

## Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

## Зам. гл. редактора

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

## Редакционный совет:

Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН (председатель)

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Горнев Е. С., д.т.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)

Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Сауров А. Н., д.т.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.

Васильев А. А., д.т.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.ф.-м.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов Е. В., д.т.н., проф.

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., Ph.D, проф. (Япония)

Сантос Э. Х. П., Ph.D, Ful. Prof. (Бразилия)

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенков С. П., д.т.н., проф.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

## Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Шетинкин Д. А. (сайт)

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Мальцев П. П., Ганжа А. А., Павлов В. Ю., Михалев А. О., Козлитин А. И., Сарайкин В. В. Исследование полимерных нитей с наноостровковой топологией наногетероструктур алюминия . . . . . 203

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Масальский Н. В. Низковольтные логические вентили на базе вертикальных GAA нанотранзисторов . . . . . 210

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Сухов И. В., Козин А. С., Пронин И. А., Головашкин А. Н., Комолов А. С., Карманов А. А., Якушова Н. Д. Исследование влияния комбинированного фото- и термического отжига на структуру и свойства пленок оксида цинка для гибкой электроники . . . . . 216

Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю. Проблемы технологии герметизации на уровне пластин при изготовлении чувствительного элемента для микромеханического акселерометра . . . . . 221

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Чаплыгин Ю. А., Лосев В. В., Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Котляров Е. Ю., Гуминов Н. В. Методика экстракции входной емкости затвора GaN полевого транзистора в гигагерцовом диапазоне . . . . . 229

Галкин А. А., Кочурин Е. С., Тимошенков С. П., Еркин П. В., Тимошенков А. С., Михеев А. В., Родин А. М. Калибровка инерциального измерительного модуля на основе МЭМС . . . . . 235

Алешин А. Н., Харитонов К. Ю., Зенченко Н. В., Рубан О. А. Механизмы образования токопроводящих каналов в биполярных мемристорах различных конструкций . . . . . 241

### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ. РАДИОФОТОНИКА

Белкин М. Е., Васильев М. Г., Сигов А. С. Концепция построения Московской сотовой телекоммуникационной сети поколения B5G . . . . . 246

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 "Пресса России"  
(индекс 27849)  
в редакции журнала  
(тел. 8(499) 270-16-52)

### Адрес для переписки:

107076, Москва,  
ул. Матросская Тишина,  
д. 23, стр. 2, оф. 45  
e-mail: nmst@novtex.ru

### Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

# NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 25

No. 5

2023

## CHIEF EDITOR

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

## DEPUTY CHIEF EDITOR

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

## Editorial council:

Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS (chairman)  
Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS  
Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS  
Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS  
Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS  
Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB  
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS  
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

## Editorial board:

Abramov I. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (Belorussia)  
Andreev A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (UK)  
Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.  
Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China)  
Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.)  
Dayneko A. V., Cand. Sci. (Phys.-Math.)  
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.  
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. Prof.  
Kuznetsov E. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Pozhela K., Dr. Sci. (Phys.-Math.) (Lithuania)  
Ryzhii M. V., Ph. D., Prof. (Japan)  
Santos E. J. P., Ph. D., Prof. (Brasil)  
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Singh K., PhD (India)  
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Vasiliev A. A., Dr. Sci. (Tech.)  
Vikulov V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

## Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)  
Lysenko A. V. (Executive secretary)  
Chugunova A. V. (Research Editor)  
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.

## CONTENTS

### NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

Maltsev P. P., Ganzha A. A., Pavlov V. Yu., Mikhalev A. O., Kozlitin A. I., Saraikin V. V. A Study of Polymer Threads with Nanoisland Topologies of Aluminum Nanoheterostructures . . . . . 203

### MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Masalsky N. V. Low-Voltage Logic Gates based on Vertical GAA Nano-transistors . . . . . 210

### SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Sukhov I. V., Kozin A. S., Pronin I. A., Golovyashkin A. N., Komolov A. S., Karmanov A. A., Yakushova N. D. Investigation of the Effect of Combined Photo- and Thermal Annealing on the Structure and Properties of Zinc Oxide Films for Flexible Electronics . . . . . 216

Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Suzdal'cev S. Yu. Problems of Wafer Level Packaging of Sensitive Elements for MEMS . . . . . 221

### MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Chaplygin Yu. A., Losev V. V., Khlybov A. I., Rodionov D. V., Kotlyarov E. Yu., Guminov N. V. The Extraction Methodic for GaN Field Transistor input Gate Capacitance in GHz Band . . . . . 229

Galkin A. A., Kochurina E. S., Timoshenkov S. P., Erkin P. V., Timoshenkov A. S., Miheev A. V., Rodin A. M. Industrial-Grade MEMS IMU Calibration . . . . . 235

Aleshin A. N., Kharitonova K. Y., Zenchenko N. V., Ruban O. A. Mechanisms of Formation of Current-Conducting Channels in Bipolar Memristors of Various Designs . . . . . 241

### APPLICATION OF MNST. MICROWAVE-PHOTONICS

Belkin M. E., Vasil'ev M. G., Sigov A. S. The Concept of Designing Moscow Cellular Telecommunication Network of B5G Generation . . . 246

Web: [www.microsystems.ru/eng](http://www.microsystems.ru/eng); e-mail: [nmst@novtex.ru](mailto:nmst@novtex.ru)



# Нанотехнологии и зондовая микроскопия

## NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 314.748

DOI: 10.17587/nmst.25.203-209

**П. П. Мальцев**, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник, ИСВЧПЭ РАН, p.p.maltsev@mail.ru,  
**А. А. Ганжа**, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, ИСВЧПЭ РАН,  
**В. Ю. Павлов**, мл. науч. сотрудник, ИСВЧПЭ РАН,  
**А. О. Михалев**, мл. науч. сотрудник, ИСВЧПЭ РАН,  
**А. И. Козлитин**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, руководитель ЦКП Синхротрон  
НИЦ "Курчатовский институт",  
**В. В. Сарайкин**, гл. науч. сотрудник, ЦКП Синхротрон  
НИЦ "Курчатовский институт"

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ НИТЕЙ С НАНООСТРОВКОВОЙ ТОПОЛОГИЕЙ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР АЛЮМИНИЯ

Поступила в редакцию 18.05.2023 г.

*Рассмотрены результаты исследования параметров нескольких вариантов образцов полимерных нитей: без металлизации; со сплошной металлизацией; с наноструктурной топологией наногетероструктур из алюминия. Обсуждается возможное возникновение излучения.*

**Ключевые слова:** полимерные нити, наноструктурная топология наногетероструктур алюминия, излучение, компоненты полимерной наноэлектроники

### Введение

В данной работе рассмотрены результаты изучения свойств полимерных нитей с наноструктурной топологией наногетероструктур алюминия. Полимерную нить можно представить в виде 3D-структуры, т. е. цилиндра из свернутой двумерной полимерной пленки (2D-структур), максимально вытянутого в длину. Ранее в литературе рассматривались варианты взаимодействия полимерных материалов в виде плоских двумерных структур и электрода из металла.

### Влияние наноразмерных объектов на двумерные пленки

В тонких пленках ряда полимеров можно наблюдать уникальные электрофизические явления. В работе [1] отмечено, что в пленках субмикрометровой толщины полидифениленфталидов (ПДФ) существует высокая степень локализации валентных электронов вблизи атомов углерода в скелетной части молекулы. В связи с этим они являются диэлектрическими

материалами с большой шириной запрещенной зоны. Однако при определенных условиях они демонстрируют аномально высокие уровни электропроводности, сопоставимые с электропроводностью металлов.

В обычном состоянии ПДФ является диэлектриком и характеризуется следующими параметрами [1]: ширина запрещенной зоны 4,3 эВ, электронное сродство 2 эВ, первый потенциал ионизации 6,2 эВ. Известно, что боковые фталидные фрагменты мономерных звеньев имеют дипольный момент, равный 5,6 дБ.

Методом полевой электронной спектроскопии [2] исследованы энергетические распределения электронов из металла, покрытого ПДФ. Обнаружены следующие результаты:

а) эмиссия происходит из отдельных дискретных центров, распределенных с большой плотностью по эмитирующей поверхности.

б) происходит уменьшение более чем на порядок эффективной работы выхода электронов из металла в системе металл/полимер/вакуум по сравнению с работой выхода из чистого металла.



в) спектр распределения электронов, эмитированных с острия с полимерным покрытием, при достижении некоторого напряжения начинает смещаться в сторону низких энергий, приближаясь к уровню Ферми металла.

Данные результаты продемонстрировали перспективы использования тонких пленок ПДФ для целей полевой эмиссии электронов наравне с алмазоподобными и графитосодержащими материалами. Возможности применения электронной эмиссии на планарной структуре показаны в работе [3]. Необходимым условием для создания самоподдерживающейся эмиссии в данном случае является наличие микро-разряда.

Микроразряд создает слой заряженных ионов на поверхности полимерной пленки, поле которого облегчает инжекцию заряда в полимерную пленку и создает условия для формирования глубоких электронных состояний высокой плотности в полимерной пленке. При воздействии микроразряда на поверхность образца возникает эмиссия электронов, время которой зависит от толщины полимерной пленки и ее размеров. Как отмечено в работе [3], в этом случае эмиссия происходит неравномерно, из отдельных участков (каналов), распределенных по всей поверхности. Результаты этих работ наталкивают на мысль о возможности получения эмиссии из отдельных локальных участков поверхности.

Наличие тонкой полимерной пленки ПДФ толщиной от 200 до 700 нм в планарной структуре кремний—полимер позволяет реализовать самоподдерживающую электронную эмиссию по типу малтеровской [3]. Электропроводящая кремниевая подложка необходима, так как для поддержания эмиссии нужен источник инжектируемых зарядов в полимерную пленку с подходящей энергетической зонной структурой. Подложка в данном случае является своего рода резервуаром электронов. Инициализации эмиссии проводится путем кратковременного воздействия с помощью микроразряда в вакууме. Анализ вольт-амперных характеристик (ВАХ) регистрируемого тока в координатах Фаулера—Нордгейма подтверждает автоэмиссионную природу явления.

Зависимость тока эмиссии от электрического поля в координатах Фаулера—Нордгейма является линейной. Экспериментальные данные строят как функции тока от напряжения между электродами (ВАХ), полагая линейной зависимость поля от напряжения. Это основная формула теории автоэлектронной эмиссии. Она выводится из рассмотрения туннельного эффекта при прохождении электрона через потенциальный барьер на границе металл—вакуум, на которую наложено перпендикулярное границе электрическое поле.

Экспериментально в работе [1] было установлено, что локальное переключение структуры металл/полимер/металлический зонд в высокопроводящее состояние (ВПС) происходит при микроразряде следующим образом. Напряжение на образце плавно поднималось до 0,3...1 В, затем происходил разряд в момент

касания анода металлическим острием, после чего фиксировалось переключение образца. Оказалось, что воздействие микроразряда приводит к тому, что переключение происходит при напряжениях в десятые доли вольта. Рабочий интервал, при котором происходит переключение, начинается, когда на анод подается потенциал 4...6 кВ. Если на аноде потенциал меньшего значения, переключения не происходит.

В работе [1] была проведена оценка удельного сопротивления отдельного канала проводимости (в состоянии ВПС) в предположении, что проводимость происходила по всей площади контакта зонда с полимерной пленкой,  $\rho_{\text{канала}} = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Толщины пленок составляли 90, 220 и 360 нм, а чем толще полимерная пленка, тем заряд с большей энергией необходимо инициировать, чтобы пленка перешла в ВПС.

При соприкосновении с поверхностью пленки острого зонда и подаче напряжения порядка 1 В обнаружено, что эмиссия в планарной структуре металл/полимер исчезает, а образец переходит в проводящее состояние. Таким образом, в системе образец — острый зонд (с радиусом закругления 1...50 нм) создаются условия для возникновения единичного канала проводимости.

Существует вполне обоснованное предположение о том, что возникновение высокой электропроводности в тонких пленках полимеров является следствием нескольких факторов.

Во-первых, критическая толщина всегда коррелирует с глубиной проникновения поверхностного заряда в полимерную пленку, это означает, что весь объем пленки находится в поле поверхностного заряда.

Во-вторых, в полимерном материале должны быть созданы условия для инжекции заряда на глубокие долгоживущие ловушки.

В настоящее время отсутствуют общие представления о роли полимерного диэлектрика в процессе возникновения высокопроводящего состояния. Спектр мнений довольно широк: от закорачивания между электродами через отверстия в полимерной пленке или дендритообразования до возможности высокотемпературной сверхпроводимости и левитации электронов.

Кроме того, существует проблема "переходного" сопротивления, которое возникает на границе раздела между полимером и металлическим электродом. Это сопротивление может быть обусловлено сопротивлением "растекания" или неким потенциальным барьером, который неизбежно возникает при контактировании полимера и металла.

К этим проблемам добавляется необходимость учета роли химической природы полимерных материалов и сильной склонности несопряженных полимеров к эффектам локализации зарядов.

Главным условием для возникновения и, соответственно, наблюдения электронных явлений является то, что полимерный материал должен быть изготовлен в виде пленки, толщина которой меньше глубины проникновения поверхностного заряда.



Аномально высокая проводимость на границе раздела двух полимерных пленок продемонстрирована в работе [4]. Измеренная проводимость интерфейса полимер/полимер равнялась  $\rho \approx 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Рассчитанные подвижности носителей заряда полимерного интерфейса на пять порядков превысили объемную подвижность ( $3,76 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Также обнаружена возможность управления проводимостью двумерной структуры внешним электрическим полем по схеме полевого транзистора. Полученные четкие изображения интерфейса методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), металлический тип проводимости и наличие полевого эффекта дали авторам основания для предположения о возможном квазидвумерном электронном газе на границе раздела двух полимерных диэлектриков, т. е. гетероструктуры. Дальнейшие исследования показали, что проводимость интерфейса определяется видом и степенью внешнего воздействия.

Методом Кельвин-зонд-микроскопии исследованы процессы накопления и релаксации зарядов в полевых транзисторных структурах с активным слоем на основе полупроводникового полимера — производного карбазола, как в чистом виде, так и в виде композита с добавлением наночастиц золота [5]. Обнаружено, что внедрение наночастиц золота в слой полимера приводит к повышению способности слоя экранировать внешний электрический потенциал, подаваемый на затвор транзисторной структуры. Показано, что процессы накопления и диссипации зарядов в слое композита полимер—наночастицы золота происходят в 4—6 раз быстрее, чем в чистом полимере. Этот эффект может быть усилен при более равномерном и плотном распределении наночастиц золота по объему композитной пленки.

В работе [6] показано, что полученные малые значения барьеров  $\phi$  для эмиссии из микрозерен InSb и InAs позволяют говорить о ее низкополевом характере. Наблюдаемые для них ВАХ свидетельствуют об ограничении тока зарядом, локализованным в приповерхностном слое полупроводника. Спецификой InSb и InAs являются очень малые значения эффективной массы  $m$  (легкие электроны,  $m \sim 0,01m_0$ ) и энергии  $E$  ( $< 0,2 \text{ эВ}$ ) электронов. Это приводит к сравнительно большим значениям длины волны де Бройля для электрона —  $\lambda = h(2mE)^{-1/2}$  — до 30 нм (для других полупроводников — порядка одного нанометра). Зона действия приповерхностных локализованных состояний эмиссии должна примерно соответствовать размеру  $\lambda$ . Площадь эмиссионной поверхности зерна по условиям эксперимента  $\sim 3 \text{ мкм}^2$ . Тогда объем размещения локализованных состояний в микрозерне  $v \sim 10^{-13} \text{ см}^3$ , концентрация локализованных центров эмиссии —  $NS/v = (10^{17} \dots 10^{18}) \text{ см}^{-3}$ , а средние расстояния между центрами —  $(NS/v)^{-1/3} \sim (10 \dots 30) \text{ нм}$ . Эти значения соответствуют параметрам  $\lambda$  и  $(\lambda)^{-3}$ .

Локализацию заряда в объеме микрозерна можно объяснить тем, что электроны, переходя из валентной зоны в зону проводимости, на время жизни  $\tau_0$  испытывают кулоновское взаимодействие при усло-

вии, когда расстояния между ними, определяемые их концентрацией и энергией, становятся сравнимыми с длиной волны де Бройля  $\lambda$  для электрона. На некоторое время установится статистическое распределение электронов на уровнях, большее, чем время жизни  $\tau_0$ . На размерное квантование и локализацию заряда в приповерхностной зоне зерна оказывают влияние кривизна и неровности его поверхности. На идеально гладкой поверхности эффект не проявляется.

ВАХ эмиссии из зерен GaAs соответствуют теории полевой эмиссии из металлов, а узкозонных InSb и InAs — эмиссии из приповерхностных состояний полупроводников. В узкозонных полупроводниках наблюдаются важные для практики явления низкополевой эмиссии и ограничения тока локализованным зарядом.

За счет кулоновской блокады темновые токи имеют очень малые значения (менее  $10^{-10} \text{ А}$ ), а токи при засветке, которая "срывает" эффект, — резкий рост. Это должно дать резкое повышение параметров фоточувствительности, что свидетельствует о перспективности использования микроструктурного антимонита индия собственного типа проводимости как фото- и автокатода. Результаты работы могут быть использованы при исследованиях и разработках элементов и схем эмиссионной микроэлектроники и фотокатодов.

В работе [7] показано, что при положительном смещении на зонде (отрицательный потенциал на полупроводнике) осуществлялась эмиссия электронов из выступов на поверхности полупроводника, являющихся по своей природе нанообъектами (размер острия эмиссии мог достигать 10...20 нм).

Эмиссия электронов из полупроводника происходит с участием (одного или нескольких) квантованных уровней энергии электронов в приповерхностной зоне материала — в частях выступов шероховатой поверхности, обращенных к зонду.

Очевидно положение основного пика определяется шириной запрещенной зоны полупроводника и положением уровня Ферми, а также возможным начальным искривлением зон вблизи поверхности, соответствующим режиму обогащения поверхности полупроводника электронами. Интервал по напряжению между пиками в экспериментах получался примерно равным 0,6...0,7 В. Если предположить, что данные пики обусловлены дискретными уровнями энергии электронов в квантовой точке, образованной частями выступов шероховатой поверхности, то можно оценить линейные размеры таких квантовых точек. По этим оценкам они оказываются в интервале от 10 до 20 нм, что вполне согласуется с аналитическими оценками для InSb. Таким образом, квантовая точка, образованная частью выступа шероховатой поверхности полупроводника, выполняет функцию своеобразного "фильтра" для эмиссионного потока электронов из полупроводника в вакуум и далее к зонду туннельного микроскопа.

Таким образом, проведено экспериментальное исследование и соответствующий теоретический анализ



возможных механизмов автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой шлифованной поверхности образцов полупроводника InSb, полученных без использования сложной технологии создания наноструктурированных объектов. Показано, что механизм наблюдавшегося тока автоэлектронной эмиссии из полупроводника удовлетворительно описывается теорией Моргулиса—Стрэттона в диапазоне значений напряженности электрического поля, соответствующем условиям экспериментов. Анализ ВАХ позволяет считать, что в условиях эксперимента наблюдался эффект низкополевой автоэлектронной эмиссии из полупроводника, а пики на туннельных спектрах связаны с особенностями энергетического спектра квантово-размерного объекта, сформированного на вершинах выступов шероховатой поверхности полупроводника.

### Влияние наночастиц на трехмерные объекты

В работе [8] продемонстрировано отступление от формулы Фаулера—Нордгейма для тока автоэмиссии из наночастиц при анализе экспериментальных данных острых автокатодов из углеродных нанотрубок. Отмечено, что для получения при эксперименте тока значение напряжения должно быть, по крайней мере, в 10 раз больше, т. е. наблюдается не автоэлектронная эмиссия для изготовленных острых автоэмиссионных катодов с уменьшенной высотой до субмикронных размеров, а так называемая низкополевая эмиссия.

Причина низкополевой эмиссии предполагается связана с уменьшением плотности электронных состояний наночастицы вследствие размерного квантования спектра. Это приведет к контактной разности потенциалов между наночастицей и массивной под-

ложкой. Заряд наночастицы тогда создаст у поверхности подложки вблизи места сочленения наночастицы с массивным основанием поле, достаточное для туннелирования электронов из него в наночастицу по вакууму. Внешнее напряжение только изменит траекторию движения эмитированных электронов.

Другая возможная модель заключается в деформации поверхностного слоя внешними электрическими силами. Деформации в таком случае могут быть усилены рычагами, составленными из наночастиц.

В данной статье приводятся результаты исследования полимерных нитей с наноостровковой топологией наногетероструктур алюминия.

Для экспериментов была использована полимерная нить (диаметром до 500 мкм), сформированная из пучка свободно переплетающихся нескольких десятков волокон ароматического полиамида — арамида (с диаметром до 10 мкм). На арамидную нить наносили алюминий магнетронным способом с оптимальным временем для формирования наноостровковой топологии наногетероструктур алюминия размером 100...1000 нм [9].

Арамид (англ. aramid аббр. aromatic polyamide — ароматический полиамид) — длинная цепочка синтетического полиамида, в которой по меньшей мере 85 % амидных связей прикреплены непосредственно к двум ароматическим кольцам. Свойства арамидных волокон определяются одновременно и химической, и физической микроструктурой. Амидные связи обеспечивают высокую энергию диссоциации (на 20 % выше алифатических аналогов, например нейлона), а арамидные кольца дают превосходную термостабильность. Различают три основных типа коммерческих арамидных волокон, присутствующих на рынке: параaramиды (п-aramиды), метаaramиды (м-aramиды) и сополимеры полиамида.

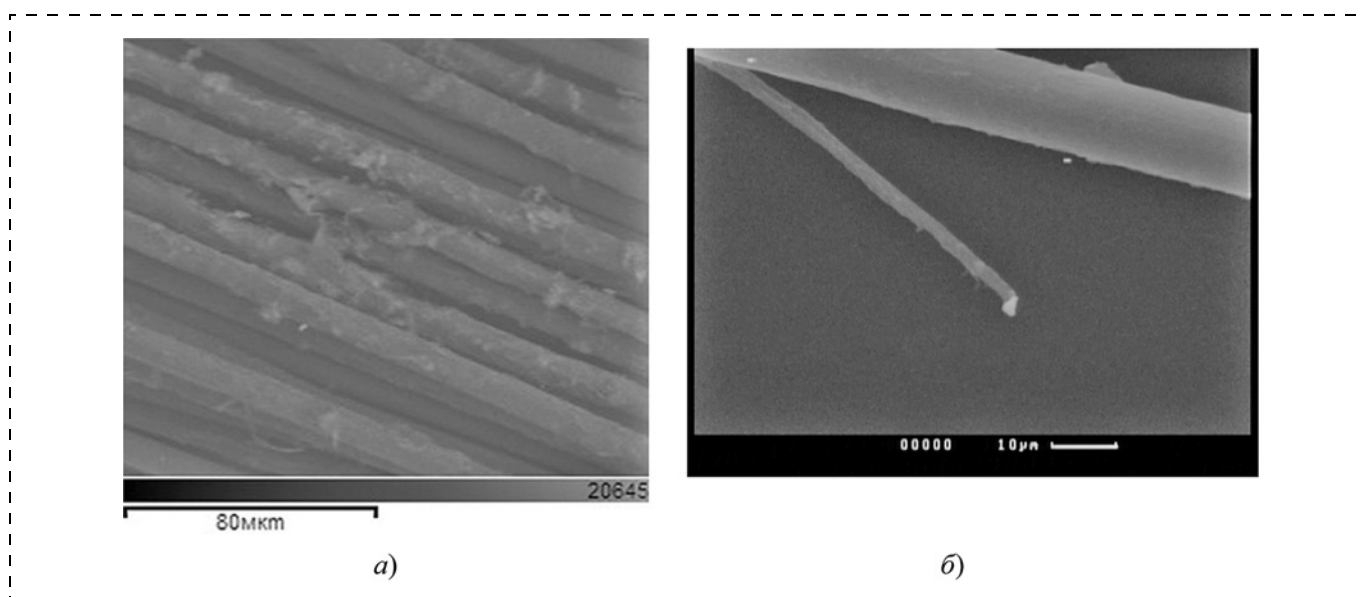


Рис. 1. Фотография картины во вторичных электронах поверхности полимерной нити с наноостровковой топологией наногетероструктур алюминия — светлые наночастицы (а) и отдельного волокна (б)

Таблица 1

Состав полимерной нити

Элемент	Весовая доля	Атомная доля
C	66,43	76,36
O	19,68	16,98
Al	7,25	3,71
Si	5,19	2,55
Cl	0,49	0,19
Cu	0,95	0,21

Для анализа трехмерных структур сделаны фотографии полимерных нитей в ЦКП "Синхротрон" НИЦ "Курчатовский институт" на растровом электронном микроскопе CAMSCAN — S4 с энергодисперсионной и волнодисперсионной приставками: Oxford INCA Energy 350 и INCA Wave 700 (Cambridge, Англия).

На рис. 1 приведена фотография картины во вторичных электронах поверхности полимерной нити с nanoостровковой топологией наногетероструктур алюминия. На поверхности волокон видны белые наночастицы вещества, сформированные при свободной nanoостровковой топологии алюминия (размером 100...1000 нм), которые в месте соединения могут образовывать наногетероструктуры алюминий/арамид.

Результаты рентгено-спектрального анализа поверхности волокна с nanoостровковой топологией наногетероструктур алюминия приведены на рис. 2 и в табл. 1, из которой видно, что основу составляют углерод, кислород и включения алюминия.

Получены карты распределения C, Al, Cl в исследуемых нитях (рис. 3, см. вторую сторону обложки). Карта алюминия в оттенках красного (рис. 3, в), углерод в оттенках зеленого (рис. 3, а) и хлор в оттенках синего (рис. 3, б). Карта RGB представляет собой наложение карт по указанным элементам (рис. 3, г).

На рис. 3 видно, что участки алюминия прерывистые, не сплошные. Это объясняется тем, что при малых напряжениях нить с nanoостровковой топологией наногетероструктур алюминия является изолятором.

Вместе с тем структура такой металлизации приводит к плотному заполнению нити проводящими участками с малыми промежутками между ними. Такое геометрическое построение может быть причиной сильного снижения пробивного напряжения нити. Экспериментально установлено, что пробивное напряжение нити при разряде составляет около 1000...2000 В на сантиметр, что на порядок меньше пробивного напряжения воздуха.

Электрическая прочность газа в сильной степени зависит от его плотности (т. е. от давления, если температура постоянна). При малых изменениях температуры и давления газа пробивное напряжение пропорционально плотности газа. При нормальных условиях, т. е. при давлении 0,1 МПа и температуре 20 °С, электрическая прочность воздуха при рассто-

янии между электродами 1 см составляет примерно 3,2 МВ/м. Развитие пробоя зависит от степени однородности электрического поля, в котором происходит пробой газа. Если в однородном поле напряженность поля постоянна, то в резко неоднородном поле она изменяется на несколько порядков вдоль силовой линии [10].

Для экспериментальных исследований полимерных нитей с nanoостровковой металлизацией алюминием был изготовлен макет источника питания на напряжение 1600 В, и напряжение подвели к двум стойкам-электродам, между которыми закрепляли нить. Длина рабочей части нити (на которую подавалось напряжение) составляло 10 мм. При проведении испытаний выяснено следующее:

при резкой подаче высокого напряжения (разряде) на полимерную нить с nanoостровковой металлизацией алюминием происходит электрический пробой и при этом наблюдается излучение в видимой области спектра;

при плавной подаче напряжения на полимерную нить (в течение 1 с) электрический пробой не наблюдается.

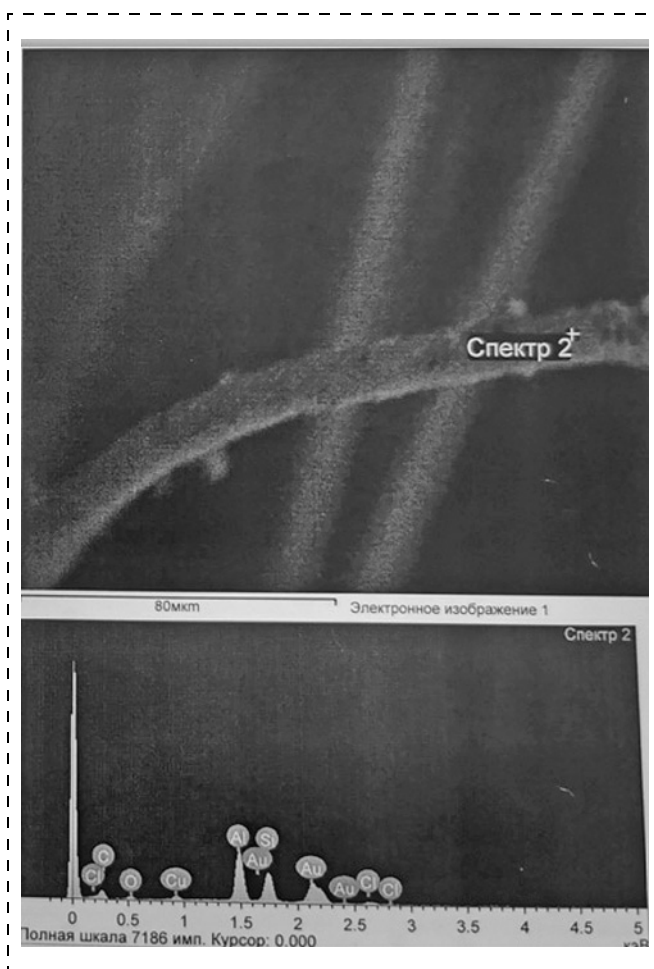


Рис. 2. Фотографии волокна полимерной нити и результата рентгено-спектрального анализа поверхности волокна с гетероструктурным покрытием алюминием





**Рис. 4.** Фотография электрического разряда над полимерной нитью с nanoостровковой металлизацией алюминием длиной 30 м при напряженности электрического поля 30 кВ/м

При электрическом разряде электрический ток через нить не проходит и она не сгорает. Это можно объяснить следующим образом: происходит пробой между алюминиевыми nanoостровками и образуется плазма над поверхностью нити. Учитывая, что плазма имеет низкое сопротивление, это приводит приложенное напряжение к уменьшению до значений, недостаточных для получения пробивных эффектов в самой нити. Таким образом, электрический ток идет через плазму над поверхностью нити между стойками-электродами. Если по какой-то причине ток плазмы в момент разряда прервется, то на этом участке нити может вновь создаться достаточное пробивное напряжение и разряд возобновиться, т.е. восстановится плазма. Таким образом, можно образовать систему с самоподдержанием плазменного разряда.

В работе [11] приведена фотография внешнего вида формирования электрического разряда над полимерной нитью с nanoостровковой металлизацией алюминием длиной 30 м при напряженности электрического поля 30 кВ/м (рис. 4). Эксперимент был проведен на высоковольтных стендах Всероссийского электротехнического института. При эксперименте установлено, что при электрическом пробое на воздухе полимерные нити с nanoостровковой металлизацией алюминием не перегорают.

## Заключение

При экспериментальных исследованиях полимерных нитей с nanoостровковой металлизацией алюминием выяснено следующее:

при резкой подаче высокого напряжения (разряде) значением 1600 В на полимерную нить с nanoостровковой металлизацией алюминием происходил пробой и наблюдалось излучение в видимой области спектра;

при плавной подаче напряжения на полимерную нить с nanoостровковой металлизацией алюминием (в течение 1 с) пробой не наблюдался.

При электрическом разряде нить не сгорает. Возможно пробой происходит между алюминиевыми nanoостровками и образуется плазма над поверхностью нити. Плазма имеет низкое сопротивление, что приводит приложенное напряжение к уменьшению до значений, недостаточных для получения пробивных эффектов в самой нити.

Результаты исследований можно использовать при создании коммутаторов энергии и других устройств полимерной наноэлектроники.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01158, <https://rscf.ru/project/22-29-01158/>.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карамов Д. Д. Атомно-силовая микроскопия субмикронных пленок полидифениленфталата: дис. на соискание канд. физ.-мат. наук / Карамов Данфис Данисович. ФГБУ Уфимский научный центр РАН, 2016. 145 с.
2. Юмагузин Ю. М., Корнилов В. М., Лачинов А. Н. Энергетические распределения электронов в системе металл—полимер—вакуум // ЖЭТФ. 2006. Т. 130, № 2. С. 303—309.
3. Корнилов В. М., Лачинов А. Н., Логинов Б. А., Беспалов В. А. Эмиссионные свойства планарной структуры кремний—полимер—вакуум // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, вып. 5. С. 116—119.
4. Гадиев Р. М., Лачинов А. Н., Корнилов В. М. и др. Аномально высокая проводимость вдоль интерфейса двух полимерных диэлектриков // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90, № 11. С. 821—825.
5. Дементьев П. А., Дунаевский М. С., Алешин А. Н. и др. Эффект накопления и релаксации носителей заряда в активной области полимерных и композитных (полимер—наночастицы золота) полевых транзисторных структур // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, вып. 5. С. 1015—1018.
6. Глуховской Е. Г., Жуков Н. Д. Протекание тока в автоэмиссионном наноконтакте металл—полупроводник // Прикладная физика. 2015, № 3. С. 5—9.
7. Михайлов А. И., Кабанов В. Ф., Жуков Н. Д. Особенности автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности антимонида индия. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 12. С. 8—14.
8. Стеценко Б. В. Отступление от формулы Фаулера—Нордгейма для тока автоэмиссии из наночастиц // Журнал технической физики. 2011. Т. 81, вып. 4. С. 152—154.
9. Мальцев П. П., Ганжа А. А., Павлов В. Ю. и др. Формирование полимерных нитей с наноразмерными nanoобразованиями из алюминия // Нано- и микросистемная техника. 2022. Т. 24, № 5. С. 219—222.
10. Физические величины. Справочник / [А. П. Баби́чев и др.]; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.
11. Ганжа А. А. Исследования атмосферного электричества с помощью квантово-структурных нитей // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". 16—20 ноября. 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 145. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a

**P. P. Maltsev**, Chief Researcher, IUHFSE RAS, p.p.maltsev@mail.ru,  
**A. A. Ganzha**, Leading Researcher, IUHFSE RAS,  
**V. Yu. Pavlov**, Junior Researcher, IUHFSE RAS,  
**A. O. Mikhalev**, Junior Researcher, IUHFSE RAS,  
**A. I. Kozlitin**, Senior Researcher, Head of the Collective Use Center "Synchrotron",  
National Research Center "Kurchatov Institute",  
**V. V. Saraikin**, Chief Science Officer, Collective Use Center "Synchrotron",  
National Research Center "Kurchatov Institute"

## A Study of Polymer Threads with Nanoisland Topologies of Aluminum Nanoheterostructures

*Corresponding author:*

**Petr P. Maltsev**, Chief Researcher, IUHFSE RAS, Moscow, p.p.maltsev@mail.ru

*Received on May 18, 2023*

*Accepted on June 01, 2023*

**Abstract.** *The article discusses the results of a parameter research of polymer filaments for several variants of samples: polymer filaments without metallization; polymer threads with continuous metallization; polymer filaments with nanoisland topology of aluminum nanoheterostructures. The possible occurrence of radiation is discussed.*

**Keywords:** *polymer threads, nanoisland topology of aluminum nanoheterostructures, radiation, components of polymer nanoelectronics*

*For citation:*

**Maltsev P. P., Ganzha A. A., Pavlov V. Yu., Mikhalev A. O., Kozlitin A. I., Saraikin V. V.** A Study of Polymer Threads with Nanoisland Topologies of Aluminum Nanoheterostructures, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 203–209.

DOI: 10.17587/nmst.25.203-209

### References

1. **Karamov D. D.** Atomno-silovaya mikroskopiya submikronnyh plenok polidifenilentalida. Dis. na soiskanie k. f.-m. n / Karamov Danfis Danisovich. FGBU Ufimskij nauchnyj centre RAN, 2016. 145 p. (in Russian).
2. **Yumaguzin Yu. M., Kornilov V. M., Lachinov A. N.** Energeticheskie raspredeleniya elektronov v sisteme metall-polimer-vakuum, *ZHETF*, 2006, vol. 130, no. 2, pp. 303–309 (in Russian).
3. **Kornilov V. M., Lachinov A. N., Loginov B. A., Bespalov V. A.** Emissionnye svoystva planarnoj struktury kremnij–polimer–vakuum, *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2009, vol. 79, is. 5, pp. 116–119 (in Russian).
4. **Gadiev R. M., Lachinov A. N., Kornilov V. M.** et al. Anom-al'no vysokaya provodimost' vdol' interfejsa dvuh polimernyh dielektrikov, *Pis'ma v ZHETF*, 2009, vol. 90, no. 11, pp. 821–825 (in Russian).
5. **Dement'ev P. A., Dunaevskij M. S., Aleshin A. N.** et al. Effekt nakopleniya i relaksacii nositelej zaryada v aktivnoy oblasti polimernyh i kompozitnyh (polimer–nanochasticy zolota) polevyh tranzistornyh struktur, *Fizika tverdogo tela*, 2014, vol. 56, is. 5, pp. 1015–1018 (in Russian).

6. **Gluhovskoj E. G., Zhukov N. D.** Protekanie toka v avtoemissionnom nanokontakte metall-poluprovodnik, *Prikladnaya fizika*, 2015, no. 3, pp. 5–9 (in Russian).
7. **Mihajlov A. I., Kabanov V. F., Zhukov N. D.** Osobennosti avtoelektronnoj emissii iz submikronnyh vystupov sherohovatoj poverhnosti antimonida indiya, *Pis'ma v ZHETF*, 2015, vol. 41, is. 12, pp. 8–14 (in Russian).
8. **Stecenko B. V.** Otsuplenie ot formuly Faulera–Nordgejma dlya toka avtoemissii iz nanochastic, *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2011, vol. 81, is. 4, pp. 152–154 (in Russian).
9. **Maltsev P. P., Ganzha A. A., Pavlov V. Yu.** et al. Formirovanie polimernyh nitej s nanorazmernymi nanoobrazovaniyami iz alyuminiya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, no. 5, pp. 219–222 (in Russian).
10. **Fizicheskie velichiny:** Spravochnik / [A. P. Babichev et al.]; Eds. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejliхова, Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1231 p. (in Russian).
11. **Ganzha A. A.** Issledovaniya atmosfernogo elektrichestva s pomoshch'yu kvantovo-strukturnykh nitej // Materialy Vosemnadcatoy Vserossijskoj Otkrytoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa". 16–20 noyabrya, 2020, IKI RAN, 2020. 145 p. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a



# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.382.323

DOI: 10.17587/nmst.25.210-215

**Н. В. Масальский**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: volkov@niisi.ras.ru  
Федеральное государственное учреждение "Федеральный научный центр  
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской Академии наук"

## НИЗКОВОЛЬТНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ВЕНТИЛИ НА БАЗЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ GAA НАНОТРАНЗИСТОРОВ

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.

*Обсуждаются вопросы численного моделирования низковольтных логических вентилях на базе кремниевых вертикальных КМОП-нотранзисторов с полностью охватывающим затвором с конической геометрией. С помощью программы приборного технологического моделирования TCAD выполнены численные исследования конических прототипов, которые демонстрируют улучшенные электрофизические характеристики в диапазоне управляющих напряжений от 0 до 0,6 В. Разработаны и исследованы модели логических вентилях на вертикально расположенных транзисторах n- и p-типов с оптимизированным отношением диаметров рабочей области, которые демонстрируют наносекундные задержки и низкое энергопотребление.*

**Ключевые слова:** "кремний на изоляторе", конический КНИ КМОП-нотранзистор с полностью охватывающим затвором, логический вентиль, низкое напряжение питания, моделирование

### Введение

Дальнейший рост эффективности кремниевых СБИС напрямую связан с использованием новых нанотранзисторных архитектур [1–6]. Благодаря эффективному подавлению короткоканальных эффектов (ККЭ) транзисторное семейство GAA (*gate-all-around*) является наиболее продвинутой, способной преодолеть технологические ограничения масштабирования планарных транзисторных структур [5, 6]. Кремниевый цилиндрический с полностью охватывающим затвором полевой транзистор является одним из членов семейства GAA. Следует отметить, что цилиндрическая архитектура отличается от двухзатворной примерно 30 %-ным уменьшением характеристической длины при одних и тех же толщинах рабочей области (в нашем случае диаметра) и подзатворного диэлектрика [7, 8], что обусловлено более сильным влиянием полностью охватывающего затвора на потенциал канала. Однако цилиндрическая форма рабочей области не может компенсировать деградирующее влияние горячих носителей на ток стока транзистора [1, 6, 9]. Для этого можно использовать дизайн рабочей области в виде усеченного конуса [9], где его форма задается следующим образом. Со сто-

роны истока для большого диаметра не выполняется условие подавления ККЭ, а со стороны стока для маленького диаметра оно выполняется.

Схема транзистора, выполненного по технологии КНИ, представлена на рис. 1. В данной конструкции достигается экранировка стока, что снижает влияние горячих носителей [10, 11]. В результате ток транзистора в открытом состоянии повышается. И в дополнение к этому данная конструкция отличается существенным подавлением ККЭ и пониженным значением емкости. Изменение геометрии рабочей области может улучшить производительность транзистора и нивелировать ограничения, связанные с масштабированием. При выполнении условия  $\Delta D \ll L_g$ , где  $\Delta D = D_{\max} - D_{\min}$ , осевую зависимость диаметра рабочей области можно представить в виде  $D(z) = D_{\max} - \frac{\Delta D}{L_g} z$ ,  $L_g$  — высота рабочей области.

Для минимизации емкостной связи затвор—исток и затвор—сток переход между ними выполнен также в виде усеченного конуса [11] (см. вставку рис. 1). При этом размеры областей стока и истока одинаковые. В данном случае зазор между затвором и истоком

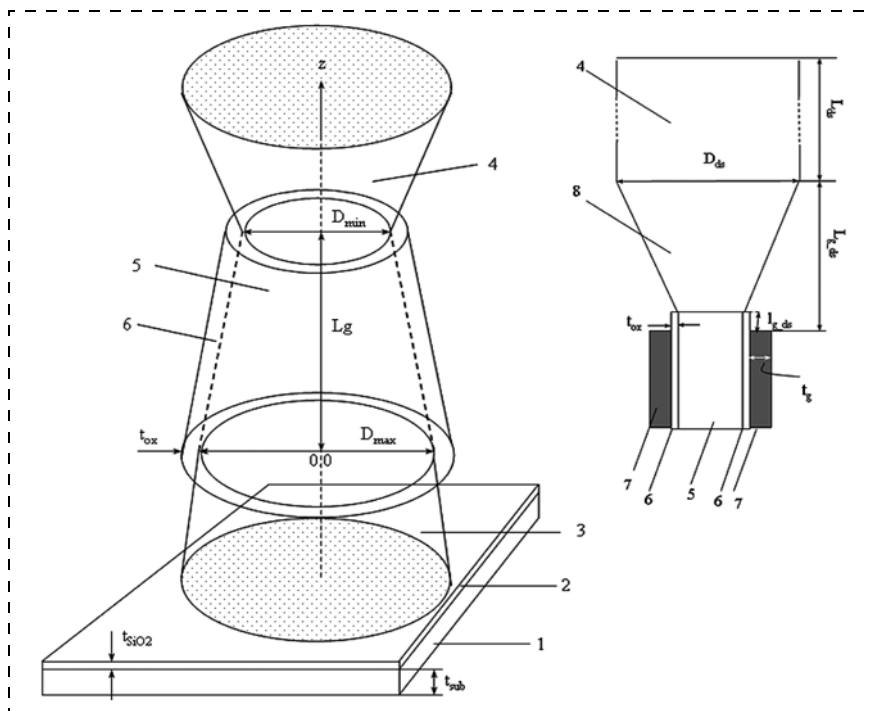


Рис. 1. Схема кремниевого с полностью охватывающим затвором КНИ КМОП-нанотранзистора с рабочей областью в виде усеченного конуса, где 1 — кремниевая подложка; 2 — пленка оксида кремния; 3 — исток; 4 — сток; 5 — рабочая область; 6 — подзатворный диэлектрик;  $L_g$  — высота рабочей области;  $D_{\max}$  — диаметр рабочей области со стороны истока;  $D_{\min}$  — диаметр рабочей области со стороны стока;  $t_{ox}$  — толщина подзатворного окисла;  $L_{ds}$  — длина стока (истока),  $t_{sub}$  — толщина кремниевой подложки,  $t_{SiO_2}$  — толщина пленки оксида кремния, ось  $z$  направлена от истока к стоку, начало координат на верхней грани истока.

На вставке. Структурная схема узла сток(исток)-затвор, где 8 — конический переход; 7 — поликремниевый затвор;  $L_{ds}$ ,  $D_{ds}$  — продольный размер и диаметр стока (истока), соответственно;  $L_{g,ds}$ ,  $l_{g,ds}$  — максимальное и минимальное расстояния между затвором и стоком(исток), соответственно;  $t_g$  — толщина затвора

(стоком) будет увеличиваться линейно вдоль оси  $z$ . Отношение  $L_{g,ds}/l_{g,ds}$ , где  $L_{g,ds}$  и  $l_{g,ds}$  — максимальное и минимальное расстояния между затвором и стоком (исток), является определяющим условием для уровня емкостной связи [13, 14].

В настоящей работе с помощью математического моделирования анализируется возможность применения предложенной конструкции нанотранзистора для синтеза низковольтных логических вентилей. В среде приборно-технологического моделирования TCAD [15] на основе разработанных здесь же 3D TCAD-моделей  $n$ - и  $p$ -типов нанотранзисторов оптимизируются их вольт-амперные характеристики (ВАХ) и на их основе синтезируются электрофизические характеристики базовых низковольтных логических вентилей, которые демонстрируют пикосекундные задержки и низкое энергопотребление.

## 1. Моделирование транзисторов

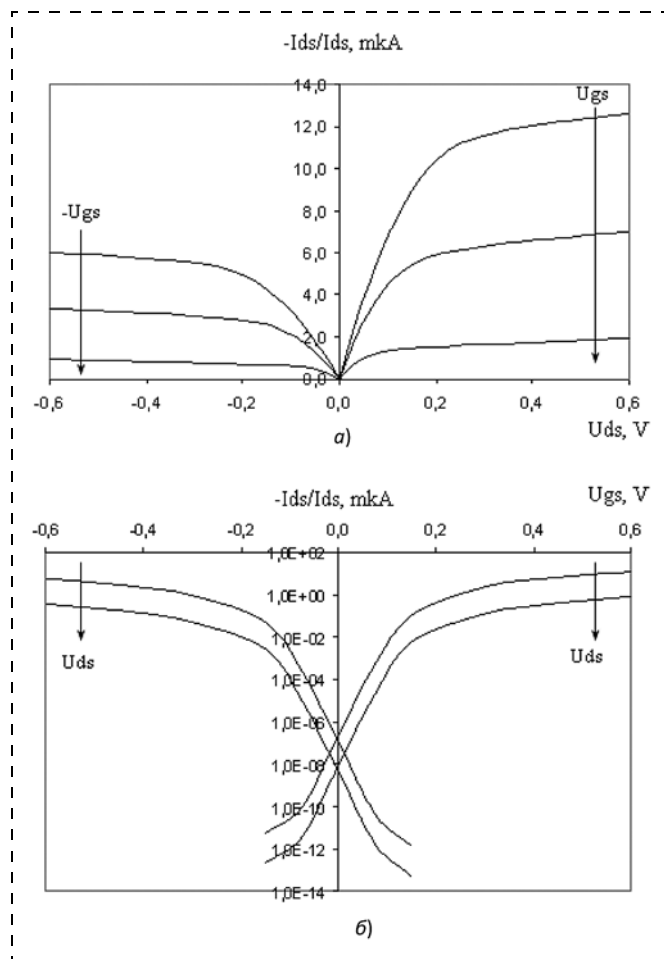
Моделирование ВАХ прототипов нанотранзистора с анализируемой архитектурой проводили в программе DESSIS пакета ISE TCAD в диапазоне управляю-

щих напряжений от 0 до 0,6 В [15]. Для моделирования использовали трехмерную структуру, схема которой представлена на рис. 1. Для данной архитектуры разработаны TCAD-модели  $n$ - и  $p$ -типов транзисторов с учетом поверхностной рекомбинации носителей заряда по механизму Шокли—Рида—Холла, высокой деградации полевой подвижности и без учета квантовых эффектов [16—18]. Опираясь на результаты предыдущих исследований [18—20], в настоящей работе было принято, что значения  $D_{\max}$  и  $L_g$  — фиксированы и равны 10 и 22 нм, соответственно, а параметр  $D_{\min}$  варьируется в диапазоне 6,5...10 нм. Уровень легирования истока и стока  $N_{ds}$  составляет  $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  вследствие ограничения прямого туннельного тока между ними [18, 21]. Толщина  $t_{ox} = 1,3$  нм выбрана так, чтобы исключить влияние постоянного туннельного тока затвора. Исходя из технологических требований для толщины поликремниевого затвора  $t_g = 20$  нм и диаметра стока/истока  $D_{ds} = 50$  нм, минимизированное значение параметра  $L_{g,ds}$  находим из следующих условий: 1)  $L_{g,ds} > (t_g + t_{ox})$ ; 2)  $L_{g,ds}/l_{g,ds} > 15$ ; 3)  $l_{g,ds} > 1,0$  нм. Выполнение этих условий обеспечивает очень слабую емкостную нагрузку [13, 14], что является хорошей компенсацией паразитных ем-

костей данного узла, влияющих на электрофизические характеристики транзистора.

В ходе численных экспериментов были проанализированы прототипы с различным отношением  $D_{\min}/D_{\max}$ . Из полученных результатов видна сильная зависимость характеристик транзистора от отношения  $D_{\min}/D_{\max}$ . Максимальное значение параметра  $I_{ds, \max}$  составляет 12,2 мкА при  $D_{\min}/D_{\max} = 0,84$ . По сравнению с цилиндрической рабочей областью (случай  $D_{\min}/D_{\max} = 1$ ) это на 2,3 мкА выше. Это увеличение тока стока обусловлено практическим отсутствием горячих носителей и высоким ускоряющим потенциалом, что определяет максимально эффективный перенос носителей [2, 12]. Также для исследуемых прототипов крутизна зависимости порогового напряжения от  $D_{\min}/D_{\max}$  становится меньше и отлична от классической *roll-off* [14]. Крутизна подпороговой характеристики SS улучшается по мере уменьшения отношения  $D_{\min}/D_{\max}$ . В общем случае значения ключевых параметров прототипов транзисторов будут зависеть от времени жизни основных носителей заряда в рабочей области и на интерфейсе Si/SiO<sub>2</sub> [16, 20].





**Рис. 2. ВАХ прототипов *n*- и *p*-типов:**

*a* — ВАХ  $I_{ds}(U_{ds})$ , *n*-тип  $U_{gs} = 0,6; 0,4; 0,2$  В, *p*-тип  $U_{gs} = -0,6; -0,4; -0,2$  В; *б* — ВАХ  $I_{ds}(U_{gs})$ , *n*-тип  $U_{ds} = 0,6$  и  $0,05$  В, *p*-тип  $U_{ds} = -0,6$  и  $-0,05$  В

Для дальнейших исследований выбраны прототипы с *n*- и *p*-проводимостями, технологические параметры которых соответствуют случаю  $D_{min}/D_{max} = 0,84$ . Среди всех исследованных прототипов они обладают максимальным значением тока при управляющих напряжениях 0,6 В, значением подпорогового наклона 65,5 дБ/дес, которое сопоставимо с другими прототипами, и близко к идеальному. Результаты моделирования ВАХ  $I_{ds}(U_{ds})$  и  $I_{ds}(U_{gs})$ , прототипов в диапазоне управляющих напряжений от 0 до 0,6 В представлены на рис. 2.

Следует отметить, что отношение токов  $I_{on}$  для транзисторов *n*- и *p*-типов составляет около 2 и отношение  $I_{on}/I_{off}$  одинаково для обоих типов транзисторов и составляет около  $10^6$ .

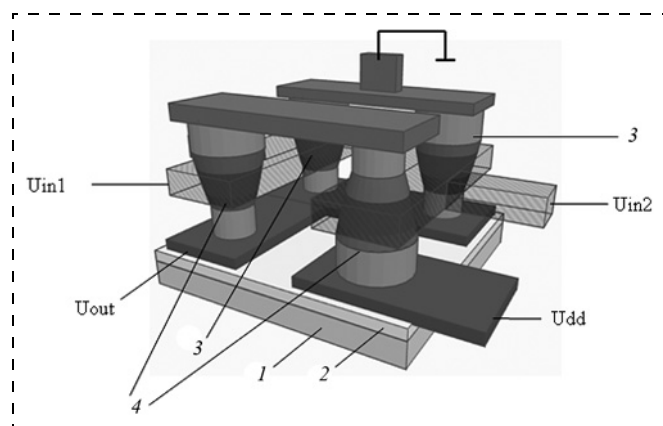
## 2. Синтез вентиля

С помощью программы TCAD с использованием разработанных выше моделей *n*- и *p*-типов транзисторных структур промоделировано распространение высокочастотного логического сигнала в отдельных

вентилях: инвертор, 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ. Эскиз возможной компоновки транзисторов вентиля 2ИЛИ-НЕ представлен на рис. 3. Аналогичная компоновка может быть использована для вентиля 2И-НЕ, а компоновку инвертора можно выполнить в одну линию.

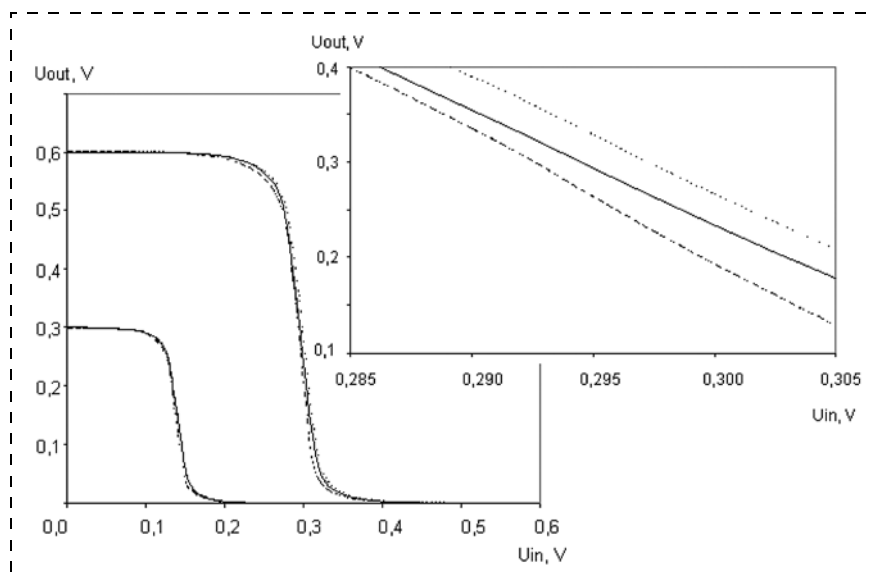
При моделировании характеристик вентиля в нашем случае использовали мультисессионный режим расчетов. Это связано с нарушением сходимости при решении системы нелинейных уравнений. В случае нарушения сходимости в некоторой точке пользователь прерывает процесс моделирования, добавляет эту точку как точку разбиения, задает скорректированные параметры расчета и заново запускает весь процесс моделирования. Общей методологии поиска точек разбиения нет. Сценарий последовательного поиска точек разбиения приводит к резкому росту времени за счет повторных вычислений. Общее время моделирования вследствие повторных вычислений при возрастании числа интервалов разбиения резко возрастает. При моделировании 3D-структур, где время расчетов на каждом интервале многократно увеличивается, время моделирования может превышать разумные пределы. Это противоречие можно разрешить следующим техническим приемом. Если нарушилась сходимость, то пользователь принудительно прерывает процесс вычислений, корректирует параметры итераций и запускает процесс вычислений заново. Это возможно, если сохранять решение на последнем шаге. Поскольку для продолжения расчетов необходима подробная информация только о результатах вычислений (значения напряжений и токов в других точках записываются в другой файл), то достаточно просто хранить решение на последнем "удачном" шаге в отдельном файле. Тогда для возобновления вычислений достаточно переименовать файл, в который записывается решение, и можно без каких-либо потерь данных и времени продолжить расчет структуры.

Результаты моделирования статических характеристик вентиля представлены на рис. 4. Представ-

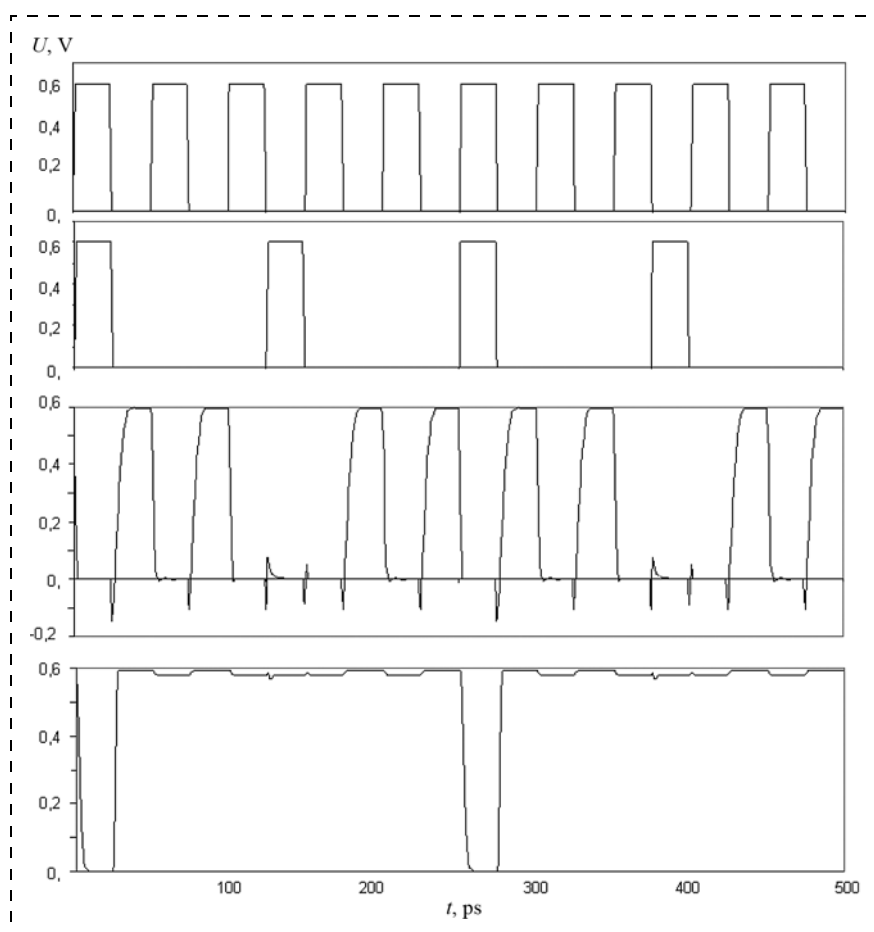


**Рис. 3. Эскиз вентиля 2ИЛИ-НЕ:**

1 — кремниевая подложка; 2 — изолирующий слой оксида кремния; 3 — *n*-КМОП; 4 — *p*-КМОП; черным и серым со штриховкой цветом обозначены проводящие области



**Рис. 4. Статические характеристики вентилях в диапазоне напряжений  $U_{in}$ : 0...0,6 В при разных  $U_{dd}$ : 0,3 (левое семейство) и 0,6 В (правое семейство), где сплошная линия — инвертор, пунктирная NAND2, штриховая NOR2, вставка иллюстрирует значение  $U_{out}$  при  $U_{dd}/2$**



**Рис. 5. Динамические характеристики вентилях в диапазоне напряжений  $U_{in} = 0...0,6$  В:**

две верхних — входные сигналы с разной частотой, ниже — отклик вентиля 2ИЛИ-НЕ и 2И-НЕ при  $U_{dd} = 0,6$  В

ленные данные получены для диапазона управляющих напряжений по входу  $U_{in}$  и по питанию  $U_{dd}$  от 0,3 до 0,6 В. При этом во всем диапазоне  $U_{dd}$  вентили сохраняют работоспособность.

Крутизна характеристики  $U_{out}(U_{in})$  для каждого вентиля составляет больше 10, что является мерой того, насколько хорошо данная цепь может выполнять цифровые операции [11]. Эта же крутизна сохраняется и при понижении питания до 0,3 В. Разброс напряжений  $U_{out}$  по уровню  $U_{dd}/2$  составляет ~30 мВ при  $U_{dd} = 0,6$  В и он постепенно уменьшается пропорционально снижению  $U_{dd}$ .

Результаты моделирования динамической характеристики вентилях 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ представлены на рис. 5. Представленные данные получены для диапазона управляющих напряжений по входам  $U_{in} = 0...0,6$  В и по питанию  $U_{dd} = 0,6$  В и тактовой частоте 20 ГГц. Для инвертора характеристика не приведена из соображений компактности изложения.

Экстрагированные значения задержки, активной и статической мощности вентилях при  $U_{dd} = 0,6$  В и тактовой частоте 20 ГГц приведены в таблице.

Отметим, что задержки  $\tau_{in}$  и  $\tau_{out}$  (нарастания и спада сигнала, соответственно) отличаются друг от друга вследствие разных уровней токов, протекающих в  $n$ - и  $p$ -прото-типах [22].

Предлагаемые компоновки в вертикальном направлении будут высоко интегрированными, поскольку современные технологии способны вертикально размещать несколько сотен слоев [3, 6, 23]. Превосходные характеристики предлагаемых устройств, такие как высокая интеграция, высокая производительность

#### Основные характеристики вентилях

Вентили	Параметры		
	$\tau_{in}/\tau_{out}$ , пс	$P$ , мкВт	$P_{стат}$ , нВт
Инвертор	1,4/0,72	0,2	7,6
2И-НЕ	2,6/1,31	0,8	12,0
2ИЛИ-НЕ	1,8/0,86	0,4	15,3



(высокая скорость и низкое энергопотребление) и низкая стоимость, могут быть имплементированы в схемах памяти и логики, что будет стимулировать как фундаментальные исследования, так и промышленное применение GAA транзисторов в 3D-интегральных схемах.

## Заключение

С помощью математического моделирования проанализированы возможности для синтеза трехмерных логических вентилях на базе вертикальных цилиндрических КМОП-нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором и с геометрией рабочей области в виде усеченного конуса. Разработаны TCAD-модели *n*- и *p*-типов проводимости конических нанотранзисторов. По результатам математического моделирования выявлено, что конические прототипы демонстрируют улучшенные электростатические характеристики. Коническая структура в диапазоне управляющих напряжений от 0 до 0,6 В отличается более высоким током транзистора, максимальным соотношением токов  $I_{on}/I_{off}$ , низким током утечки и наклоном подпороговой характеристики, близким к теоретическому приделу. Выбраны прототипы транзисторов с оптимальными параметрами для синтеза сложных логических вентилях с длиной затвора 22 нм, отношением диаметров рабочей области 8,4/100 нм, с низким напряжением питания 0,6 В.

Разработаны TCAD-модели вентилях — инвертора, 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ. Численно исследованы их электрофизические характеристики при управляющих напряжениях в диапазоне 0...0,6 В и тактовой частоте 20 ГГц. Модели вентилях предсказывают максимальную задержку переключения менее 3 пс, предельный уровень активной мощности менее 1 мВт и статической мощности менее 20 пВт.

Таким образом, коническая архитектура с оптимизированным отношением диаметров может стать полноправным членом семейства GAA, которое является приоритетным для современного технологического развития нанoeлектроники.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН "Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)" по теме № FNEF-2022-0022 "Математическое обеспечение и инструментальные средства для моделирования, проектирования и разработки элементов сложных технических систем, программных комплексов и телекоммуникационных сетей в различных проблемно-ориентированных областях".*

## Список литературы

1. Waldrop M. M. The chips are down for Moore's law // Nature. 2016. Vol. 530. N. 7589. P. 144–151.
2. Nanoelectronics: Devices, Circuits and Systems. Editor by Kaushik B.K. Elsevier, 2018. 476 p.

3. Масальский Н. В. Логические вентили на двухзатворных КНИ КМОП-нанотранзисторах с неравномерно легированным каналом // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 8. С. 481–490.
4. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунев В. А. и др. Моделирование передаточных характеристик двухзатворных полевых графеновых транзисторов // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 11. С. 643–650.
5. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) Interconnect, 2020 Edition. [Online]. Available: <https://irds.ieee.org/editions/2020>, access data 15.03.2021.
6. Tomar G., Barwari A. Fundamental of electronic devices and circuits. Singapore: Springer, 2019. 246 p.
7. Lu W. Nanowire transistor performance limits and applications // IEEE Trans. on Electron Dev. 2008. Vol. 55, N. 11. P. 2859–2876.
8. Savio A., Monfray S., Charbuillet C., Skotnicki T. On the limitations of silicon for I-MOS integration // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. Vol. 56, N. 5. P. 1110–1117.
9. Масальский Н. В. Моделирование ВАН ультра тонких КНИ КМОП нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором // Микроэлектроника. 2021. Т. 50, № 6. С. 383–393.
10. Ferain I., Colinge C. A., Colinge J. Multigate transistors as the future of classical metal-oxide-semiconductor field-effect transistors // Nature. 2011. Vol. 479. P. 310–316.
11. Jaeger R. C., Blalock T. N. Microelectronic circuit design. New York, McGraw-Hill, 2011. 1190 p.
12. Gao H.-W., Wang Y.-H., Chiang T.-K. A quasi-3-D scaling length model for trapezoidal FinFET and Its application to sub-threshold behavior analysis // IEEE Trans. on Nanotechnology. 2017. Vol. 16, N. 2. P. 281–289.
13. Sharma D., Vishvakarma S. K. Precise analytical model for short channel cylindrical gate (CylG) gate-all-around (GAA) MOSFET // Solid. State. Electron. 2013, Vol. 86, N. 1. P. 68–74.
14. Masal'skii N. V. Modeling the CMOS characteristics of a completely depleted surrounding-gate nanotransistor and an unevenly doped working region. Rus // Microelectronics. 2019. Vol. 48, N. 6. P. 394–398.
15. TCAD Sentaurus Device [Online]. Available: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/device-simulation/sentaurus-device.html>, access data 15.03.2021.
16. Samoju V. R., Mahapatra K., Tiwari P. K. Analytical modeling of subthreshold characteristics by considering quantum confinement effects in ultrathin dual-metal quadruple gate (DMQG) MOSFETs // Superlattices Microstruct. 2017. Vol. 111. P. 704–713.
17. Shin Y. H., Bae M., Park C. et al. Universal core model for multiple-gate field-effect transistors with short channel and quantum mechanical effects // Semiconductor Science and Technology. 2018. Vol. 33, N. 6. P. 065010.
18. IC STMICROELECTRONICS 28 nm Advanced CMOS FDSOI 8 ML. Available online: <https://mycmp.fr/datasheet/ic28nm-cmos28fdsoi>. (accessed on 12 June 2020).
19. Majzoub S., Taouil M., Hamdioui S. System-level sub-20 nm planar and FinFET CMOS delay modelling for supply and threshold voltage scaling under process variation // J. of Low Power Electron. 2019. Vol. 15, N. 1. P. 1–10.
20. Масальский Н. В. Синтез низковольтных логических вентилях на КНИ КМОП-нанотранзисторах с полностью охватывающим затвором // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 2. С. 75–82.
21. Yoon J. S., Jeong E. Y., Baek C. K. et al. Junction design strategy for Si bulk FinFETs for system-on-chip applications down to the 7-nm node // IEEE Trans. Electron Dev. Lett. 2015. Vol. 36, N. 10. P. 994–996.
21. Sachid A. B., Tosun, M., Desai S. B. et al. Monolithic 3D CMOS using layered semiconductors // Adv. Mater. 2016. Vol. 28. P. 2547–2554.
22. Yu Y. S., Panth S., Lim S. K. Electrical coupling of monolithic 3-D inverters // IEEE Trans. Electron Devices. 2016. Vol. 63. P. 3346–3349.
23. Ahn T. J., Perumal R., Lim S. K., Yu Y. S. Parameter extraction and power/performance analysis of monolithic 3-D inverter (M3INV) // IEEE Trans. Electron Devices. 2019. Vol. 66. P. 1006–1011.

## Low-Voltage Logic Gates based on Vertical GAA Nanotransistors

Received on April 24, 2023

Accepted on May 22, 2023

*The issues of numerical simulation of low-voltage logic gates based on silicon vertical surrounding gate CMOS nanotransistors with a conical working area circuits are discussed. Using the TCAD instrument process modeling program, numerical studies of conical prototypes have been performed. The electrophysical characteristics in the control voltage range from 0 to 0.6 V are characterized by a higher transistor current, a maximum  $I_{on}/I_{off}$  current ratio, a low leakage current and a slope of the subthreshold characteristic close to the theoretical aisle. 3D TCAD models of three basic logic gates on vertically arranged transistors of *n*- and *p*-types have been developed for an optimized ratio of the diameters of the working area of 8.4/10 nm and the length of the working area of 22 nm. Their electro-physical characteristics are numerically investigated at control voltages of 0.6 V and a frequency of 20 GHz. The gate models demonstrate picosecond delays and low power consumption. The promising characteristics of the proposed transistors and valves based on them, such as a high degree of integration, high performance and low cost, open the way to the development of 3D integrated circuits of the next generation.*

**Keywords:** "silicon on an insulator", conical CMOS nanotransistor with a surrounding gate, logic gate, low supply voltage, simulation

For citation:

**Masalsky N. V.** Low-Voltage Logic Gates based on Vertical GAA Nanotransistors, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 210–215.

DOI: 10.17587/nmst.25.210-215

### References

1. **Waldrop M. M.** The chips are down for Moore's law, *Nature*, 2016, vol. 530, no. 7589, pp. 144–151.
2. **Nanoelectronics:** Devices, Circuits and Systems. Editor by Kaushik BK, Elsevier, 2018, 476 p.
3. **Masalsky N. V.** Logical gates on double-gate SOI CMOS nanotransistors with a non-uniformly alloyed channel, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 8, pp. 481–490 (in Russian).
4. **Abramov I. I., Kolomeitseva N. V., Labunov V. A.** and el. Simulation of transfer characteristics of dual-gate graphene field-effect transistors. *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 11, pp. 643–650 (in Russian).
5. **International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)** Interconnect, 2020 Edition. [Online]. Available: <https://irds.ieee.org/editions/2020>, access data 15.03.2021.
6. **Tomar G., Barwari A.** Fundamental of electronic devices and circuits. Singapore, Springer, 2019, 246 p.
7. **Lu W.** Nanowire transistor performance limits and applications, *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2008, vol. 55, no. 11, pp. 2859–2876.
8. **Savio A., Monfray S., Charbuillet C., Skotnicki T.** On the limitations of silicon for I-MOS integration, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2009, v. 56, no. 5, pp. 1110–1117.
9. **Masalsky N. V.** Cvc simulation of ultrathin Soi-Cmos nanotransistors with a fully enclosed gate, *Rus. Microelectronics*, 2021, vol. 50, no. 6, pp. 383–393 (in Russian).
10. **Ferain I., Colinge C. A., Colinge J.** Multigate transistors as the future of classical metal–oxide–semiconductor field-effect transistors, *Nature*, 2011, vol. 479, pp. 310–316.
11. **Jaeger R. C., Blalock T. N.** Microelectronic circuit design. New York, McGraw-Hill, 2011, 1190 p.
12. **Gao H.-W., Wang Y.-H., Chiang T.-K.** A quasi-3-D scaling length model for trapezoidal FinFET and Its application to sub-threshold behavior analysis, *IEEE Trans. on Nanotechnology*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 281–289.
13. **Sharma D., Vishvakarma S. K.** Precise analytical model for short channel cylindrical gate (CylG) gate-all-around (GAA) MOSFET, *Solid. State. Electron.*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 68–74.
14. **Masal'skii N. V.** Modeling the CMOS characteristics of a completely depleted surrounding-gate nanotransistor and an unevenly doped working region, *Rus. Microelectronics*, 2019, vol. 48, no. 6, pp. 394–398.
15. **TCAD Sentaurus Device** [Online]. Available: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/device-simulation/sentaurus-device.html>, access data 15.03.2021.
16. **Samoju V. R., Mahapatra K., Tiwari P. K.** Analytical modeling of subthreshold characteristics by considering quantum confinement effects in ultrathin dual-metal quadruple gate (DMQG) MOSFETs, *Superlattices Microstruct.*, 2017, vol. 111, pp. 704–713.
17. **Shin Y. H., Bae M., Park C.** et al. Universal core model for multiple-gate field-effect transistors with short channel and quantum mechanical effects, *Semiconductor Science and Technology*, 2018, vol. 33, no. 6, pp. 065010.
18. **IC STMICROELECTRONICS** 28nm Advanced CMOS FDSOI 8 ML. Available online: <https://mycmp.fr/datasheet/ic28nm-cmos28fdsoi>. (accessed on 12 June 2020).
19. **Majzoub S., Taouil M., Hamdioui S.** System-level sub-20 nm planar and FinFET CMOS delay modelling for supply and threshold voltage scaling under process variation, *J. of Low Power Electron*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 1–10.
20. **Masalsky N. V.** Synthesis of low-voltage logic gates on surrounding gate SOI CMOS nanotransistors, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 75–82 (in Russian).
21. **Yoon J. S., Jeong E. Y., Baek C. K.** and el. Junction design strategy for Si bulk FinFETs for system-on-chip applications down to the 7-nm node, *IEEE Trans. Electron Dev. Lett.*, 2015, vol. 36, no. 10, pp. 994–996.
22. **Sachid A. B., Tosun, M., Desai S. B.** and el. Monolithic 3D CMOS using layered semiconductors. *Adv. Mater.* 2016, vol. 28, pp. 2547–2554.
23. **Yu Y. S., Panth S., Lim S. K.** Electrical coupling of monolithic 3-D inverters, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2016, vol. 63, pp. 3346–3349.
24. **Ahn T. J., Perumal R., Lim S. K., Yu Y. S.** Parameter extraction and power/performance analysis of monolithic 3-D inverter (M3INV). *IEEE Trans. Electron Devices*, 2019, vol. 66, pp. 1006–1011.

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

УДК 621.315.5

DOI: 10.17587/nmst.25.216-221

**И. В. Сухов**<sup>1</sup>, студент, suhoviwan2012@mail.ru, **А. С. Козин**<sup>1</sup>, студент, kozinlesha123@yandex.ru, **И. А. Пронин**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доц., зав. каф., pronin\_i90@mail.ru, **А. Н. Головяшкин**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, доц. каф., angpenza@gmail.com, **А. С. Комолов**<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук, профессор, проф. каф., **А. А. Карманов**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, доц. каф., starosta07km1@mail.ru, **Н. Д. Якушова**<sup>1</sup>, ст. преподаватель каф., yand93@mail.ru

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет", г. Пенза

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет", г. Санкт-Петербург

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ФОТО- И ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ ГИБКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Поступила в редакцию 26.04.2023 г.

*Исследовано влияние комбинированного термического и ультрафиолетового воздействия на тонкие золь-гель пленки оксида цинка на этапе их осаждения на подложку. Установлено, что с ростом времени обработки наблюдается уменьшение оптической ширины запрещенной зоны и рост размеров нанокристаллитов, имеющих фазовый состав типа "вюрцит".*

**Ключевые слова:** оксид цинка, гибкая электроника, золь-гель метод, ультрафиолетовый фотоотжиг

### Введение

В настоящее время исследования, направленные на разработку физико-технологических подходов получения изделий гибкой электроники, приобретают все большую актуальность. Под этим термином понимается совокупность всех технологических решений, которые могут обеспечить гибкость устройству, а именно, установка элементов на гибкую пластиковую подкладку, сделанную из полиимидов, полиэфирэфиркетона или прозрачной проводящей полиэфирной пленки [1].

Одним из направлений гибкой электроники является разработка гибких сенсоров, позволяющих детектировать газы в окружающей среде, биологические активные вещества, содержащиеся в поте человека и т. д. Как правило, в основе таких устройств лежит матрица полупроводниковых материалов, таких как ZnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnO<sub>2</sub> и т.д. [2, 3].

Данная матрица в случае использования в газоаналитическом оборудовании при воздействии газов меняет свое сопротивление, а в случае использова-

ния в биосенсорных устройствах является основной для иммобилизации ферментов. Как правило, для этих целей необходимо кристаллическое состояние полупроводников, что связано с высокотемпературными операциями при их синтезе. Например, для формирования пленок оксида цинка с кристаллической структурой и средним размером кристаллитов 20...50 нм золь-гель методом необходим термический отжиг, превышающий 500 °С [4]. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на разработку технологических подходов получения кристаллических пленок полупроводниковых оксидов с использованием низкотемпературных методов обработки.

В последнее время большой интерес проявляется к оксиду цинка, который является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 3,3 эВ (при 300 К). Оксид цинка является представителем группы A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> с большой энергией связи экситонов (60 мэВ), что позволяет ему проявлять эффективную экситонную люминесценцию в ближнем УФ диапа-



зоне при комнатной температуре и пропускать 80...90 % света в видимом диапазоне [5, 6]. По своим электрофизическим и оптическим свойствам ZnO считается перспективным материалом для применения в гибкой электронике.

Главным достоинством оксида цинка перед другими широкозонными полупроводниками является возможность получения наноразмерных структур различными методами. Одним из них является золь-гель-метод, простота реализации и низкая стоимость выделяют этот подход среди прочих. Для получения качественной проводящей наноструктурированной пленки необходимо провести термический отжиг при температуре ~550 °С, что неприемлемо для гибких подложек, которые имеют более низкие температуры плавления. Из разных источников известно, что комбинированные методы низкотемпературного нагрева с добавлением воздействия излучения УФ диапазона на золь-гель пленки приводит к формированию нанокристаллических оксидов со структурой, подходящей для использования в газовых сенсорах, биосенсорах и др. [7].

В настоящей работе нами проведено исследование влияния времени комбинированного термического и УФ воздействия на структурные и электрофизические пленки оксида цинка, осаждаемые из золя.

## 1. Материалы и методы

**Синтез.** Синтез золь оксида цинка проводили в соответствии с подходом, разработанным в работе [8]. На первом этапе 10 г дигидрата ацетата цинка  $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  смешивали с 20 мл 2-метоксиэтанола —  $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$  и 3,2 мл 2-аминоэтанола —  $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$  в круглодонной колбе и перемешивали в течение 15 мин с помощью магнитной мешалки при комнатной температуре (25 °С). На втором этапе раствор созрел в течение 60 мин при температуре 60 °С. Далее полученный золь созрел в течение 24 ч при комнатной температуре. На следующем этапе золь наносили на кремниевые и ситалловые подложки методом погружения с последующей сушкой в течение 1 ч при 90 °С.

Комбинированная термическая и УФ обработка происходила в течение 90, 180 и 270 мин под линейной ультрафиолетовой лампой мощностью 8 Вт с максимумами излучения 185 и 254 нм (WL 2001, тип лампы T5 G5, Camelion, Китай) (серия "фотоотжиг"). Расстояние от колбы лампы до поверхности образцов составляло 20 мм. Образцы располагали на плитке, обеспечивающей дополнительный нагрев до 180 °С на всем протяжении эксперимента.

Дополнительно для контроля была изготовлена серия образцов, полученных при тех же условиях, но без воздействия УФ лампы (серия "термоотжиг").

**Методы использования.** Структура поверхности образцов была исследована с помощью растрового электронного микроскопа VEGA 3 SBH (TESCAN, Чехия) в режиме отраженных электронов.

Фазовый состав образцов исследовали с использованием прибора D8 Discover (Bruker), оснащенного

источником возбуждения рентгеновского излучения  $\text{Cu K}\alpha$  (0,15406 нм).

Спектр оптического пропускания образцов был измерен на спектрофотометре СФ-56 (ЛОМО, г. Санкт-Петербург) в диапазоне длин волн 200...1100 нм.

## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены микрофотографии всех синтезированных образцов, полученные методом растровой электронной микроскопии.

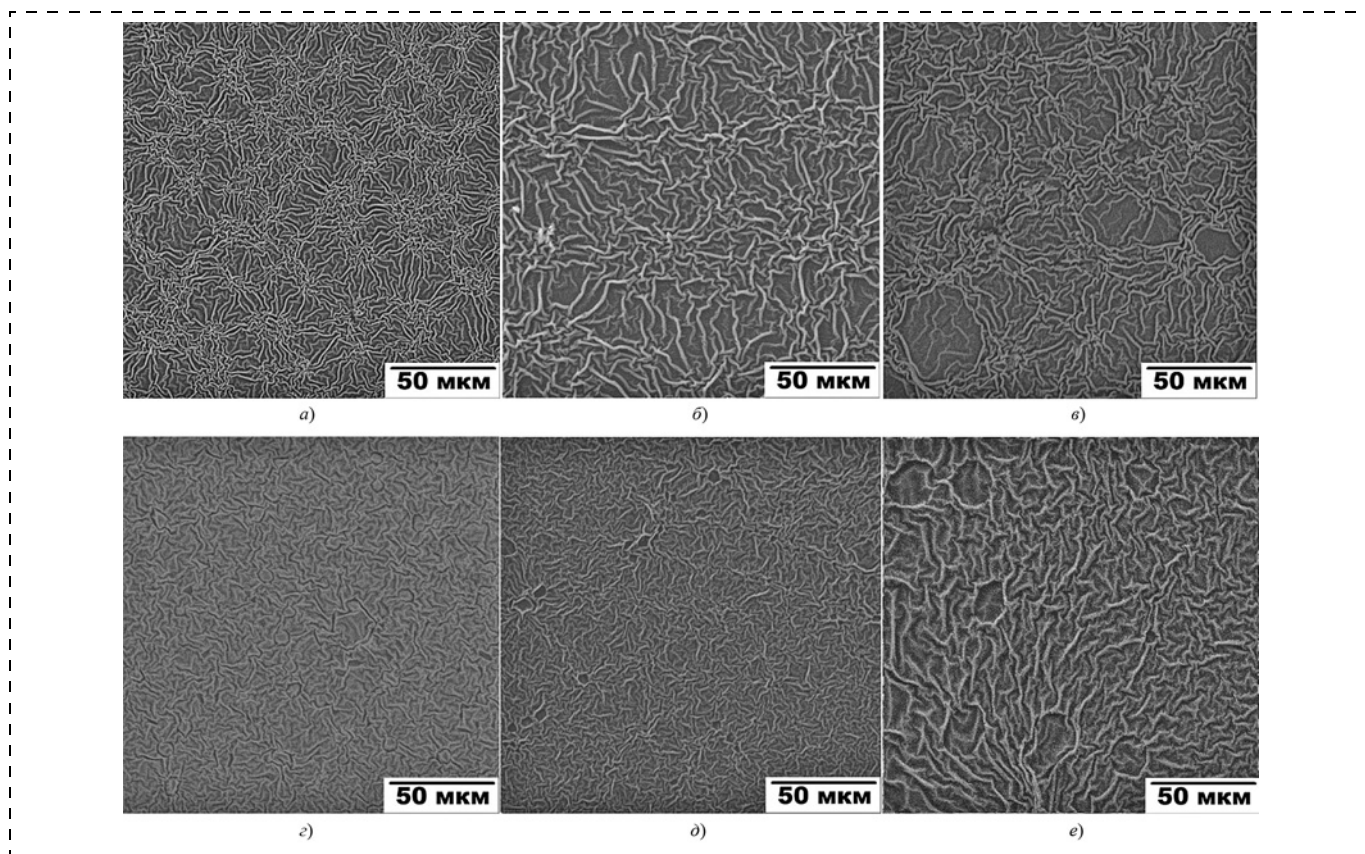
Анализ изображений говорит о разных механизмах сборки ветвей материала при использовании методик термической и добавочной ультрафиолетовой обработки. Остановимся подробнее на термической обработке тонкопленочного материала при 180 °С при различной ее продолжительности. Прежде всего стоит отметить, что структура материала представляет собой ветвистые агрегаты с плотной центральной областью, контактирующие друг с другом на периферии. Размер данных агрегатов при минимальном времени обработки 90 мин составляет 20...30 мкм и имеет тенденцию к увеличению с ростом времени нагрева: при его продолжительности 180...270 мин размер агрегата превышает 50 мкм. Все представленные агрегаты по своей структуре состоят из ветвей, средний диаметр которых возрастает с увеличением продолжительности термообработки. Механизм роста настоящих ветвей хорошо известен и связан с формированием лабиринтных структур из доперколяционных фрагментов, выросших в золе, претерпевшем спинальный распад. Более подробно с закономерностями формирования данных структур можно ознакомиться в работе [9].

Укрупнение ветвей и соответствующий ему рост агрегатов связаны вероятно с замедленной диффузией в конденсированной фазе и поглощением малых ветвей большими, приводящим к укрупнению.

Структура образцов, полученных с комбинированной термической и УФ обработками, существенно отличается от пленок, полученных без дополнительной УФ активации. Прежде всего, образцы имеют более однородную ветвистую структуру, в которой нет возможности выделить отдельные микроскопические агрегаты. Вероятно, это связано с блокированием процесса сборки агрегатов за счет разрушения химических связей, формирующихся вследствие самосборки жестким ультрафиолетовым излучением. Не исключен также распад ядер, собранных по механизмам диффузионно-лимитированной агрегации на ранних этапах созревания золя, предшествующих нанесению его на подложку.

Рассмотрим подробнее особенности фазового состава образцов. На рис. 2 представлен фрагмент дифрактограммы пленок в диапазоне углов  $2\theta = 31...35^\circ$ .

Указанные на изображении рефлексы соответствуют фазе ZnO типа вюрцит и отображают семейства плоскостей (100) и (002) [10]. Следов других фаз, кроме вюрцита, потенциально принадлежащих пленке, обнаружено не было.



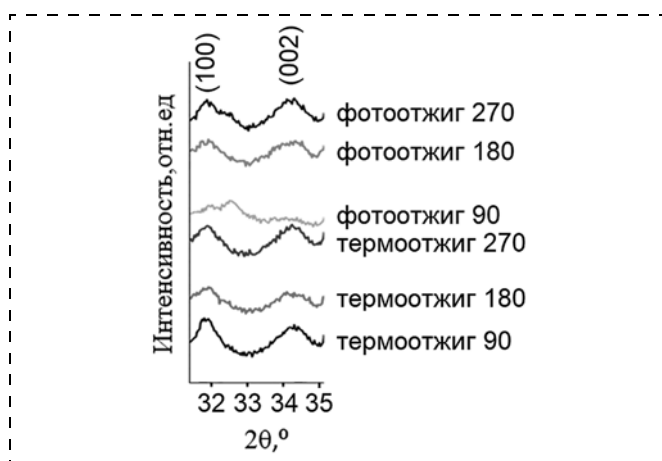
**Рис. 1. Микрофотографии, полученные методом растровой электронной микроскопии:**

*a* — термоотжиг 90 мин; *б* — термоотжиг 180 мин; *в* — термоотжиг 270 мин; *г* — фотоотжиг 90 мин; *д* — фотоотжиг 180 мин; *е* — фотоотжиг 270 мин

Анализ уширения рефлексов позволил рассчитать средний размер кристаллитов пленки по уравнению Шерера [11]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta},$$

где  $K$  — фактор формы ( $K \approx 0,9$ );  $\lambda$  — длина волны рентгеновского излучения;  $D$  — размер области когерентного рассеяния (ОКР);  $\theta$  — угол дифракции.



**Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы пленок в диапазоне углов  $2\theta = 31...35^\circ$**

В таблице приведены рассчитанные значения для всех образцов.

Из анализа таблицы видно, что для образцов, полученных посредством термического нагрева, средний размер кристаллита находится в диапазоне 8...10 нм и практически не зависит от времени обработки.

Из представлений о протекании золь-гель процессов хорошо известно, что рост ядер, являющихся базовой структурной единицей сборки материала на более высоких уровнях иерархии, происходит на ранних этапах созревания золь. Для перестройки структуры ядер необходима некоторая энергия, которой недостаточно при термическом нагреве  $180^\circ\text{C}$ . В связи с этим, несмотря на эволюцию структуры поверхности в ходе нагревания образца, которую видно на результатах растровой микроскопии, сборка агрегатов на высоком иерархическом уровне происходит из одних и тех же ядер, не претерпевающих изменение с течением времени. В связи с этим возникают практически идентичные картины дифракции рентгеновских лучей при всех трех временах термической обработки.

Иная картина возникает при комбинации термической и УФ обработок. Образцы, обработанные 90 мин, имеют рентгеноаморфную структуру, что указывает на размер кристаллитов, не превышающий 1 нм. С ростом времени обработки наблюдается формирование кристаллитов размером 7...8 нм. Рас-

смотрим эволюцию кристаллической структуры образцов более подробно.

Хорошо известно, что на этапе созревания агрегатов золь-гель процессов ядра представляют собой катионы цинка, связанные кислородными мостиками с другими группировками, в том числе органическими. Также на поверхности частицы присутствуют различные функциональные группы и фрагменты исходных веществ:  $-\text{CH}_3$ ;  $-\text{NH}_2$ ;  $-\text{COOH}$  и т. д.

При воздействии УФ излучения на материал с этой структурой происходит разрыв химических связей, за счет которого возможно удаление органических групп, разделение агрегатов, сформированных на ранних этапах созревания, на более мелкие, но имеющие достаточно совершенную кристаллическую структуру. Дифрактометрически они определяются как рентгеноаморфные, т. е. их размер не превышает 1 нм. Следует также отметить, что в этих кристаллитах малого размера могут происходить фотокаталитические процессы, приводящие к очистке поверхности последних и возможности ориентированного их объединения. Увеличение времени комбинированной обработки приводит к агломерации ядер и формированию более крупных монокристаллов: при временах

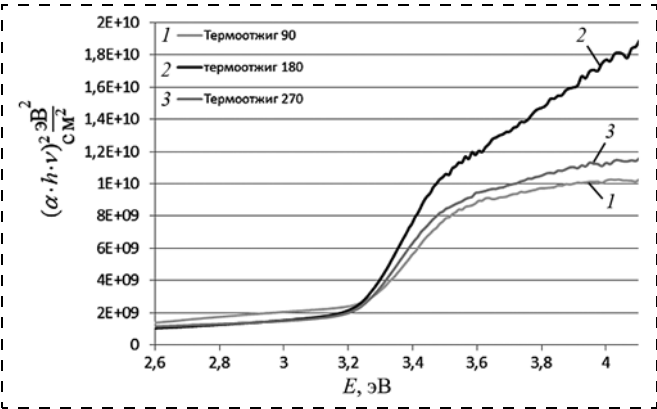


Рис. 3. Спектры поглощения образцов, полученных при термообработке

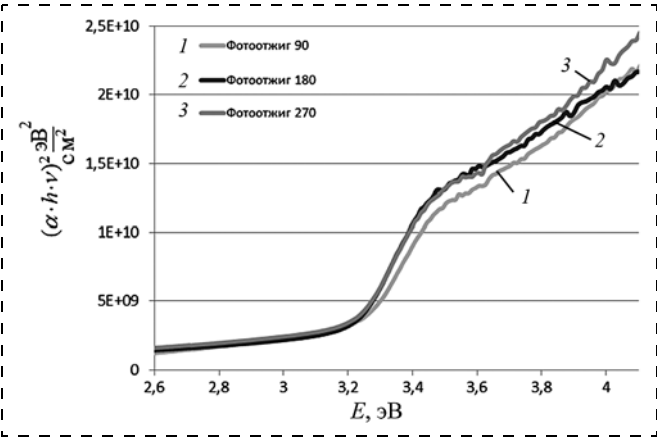


Рис. 4. Спектры поглощения образцов, полученных при комбинированной обработке

Результаты расчета параметров образцов

Параметры	Термоотжиг			Фотоотжиг		
	90 мин	180 мин	270 мин	90 мин	180 мин	270 мин
D, нм	10,5	9,5	9,6	—	6,7	8,0
ε, эВ	3,15	3,16	3,16	3,16	3,15	3,13

180 и 270 мин средний размер кристаллитов 7 и 8 нм соответственно.

Рассмотрим эволюцию оптической ширины запрещенной зоны ε в результате всех типов обработки. На рис. 3, 4 представлены спектры поглощения всех образцов, построенные в координатах Тауца. Подробнее с методикой расчета ε можно ознакомиться в работе [12]. Все рассчитанные результаты представлены выше в таблице.

Анализ результатов показывает, что продолжительность термического воздействия слабо влияет на оптическую ширину запрещенной зоны, ее значение составляет 3,15...3,16 эВ. Это коррелирует с нашими представлениями о формировании ядер нанокристаллов на этапах созревания золя, предшествующих нанесению его на подложку, и слабому влиянию на них при изменении времени термической обработки.

Рост времени комбинированной обработки, напротив, приводит к монотонному уменьшению оптической ширины запрещенной зоны от 3,16 до 3,13 эВ. При условии укрупнения монокристаллов это говорит о росте его дефектности и формировании разрешенных состояний в запрещенной зоне. Это вероятно происходит при укрупнении наночастиц и "зашивании" в их объем примесей и дефектов, содержащихся на поверхности их предшественников.

Заключение

В работе исследована эволюция структурных электрофизических параметров наноструктурированных пленок оксида цинка, полученных золь-гель методом, при термической обработке и комбинированной обработке, включающей термическое и УФ воздействия. Установлено, что использование термической обработки пленок приводит к формированию крупных агрегатов (20...30 мкм), имеющих тенденцию к укрупнению с увеличением продолжительности обработки, при этом структура материала на низком уровне иерархии, определяемая рентгеновским фазовым анализом, а также оптическая ширина запрещенной зоны практически не зависят от времени обработки. Вероятно это связано с формированием наночастиц материала, ответственных за эти свойства на этапах созревания золя, предшествующих его нанесению на подложки. Введение в систему дополнительного УФ облучения приводит к разрушению агрегатов, сформированных на ранних этапах, и формированию рентгеноаморфных частиц ZnO при обработке в течение 90 мин. Увеличение времени обработки приводит к



"сшиванию" частиц, увеличению размеров монокристаллов и одновременному росту концентрации точечных дефектов, приводящих к уменьшению оптической ширины запрещенной зоны. Таким образом, комбинированная УФ и термическая обработки пленок позволяют, с одной стороны, формировать материал с нанокристаллической структурой, а с другой стороны, управлять его дефектностью. Эти результаты имеют перспективу применения при изготовлении термоэлектрических батарей, газовых сенсоров, катализаторов и фотокатализаторов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00844, <https://rscf.ru/project/23-29-00844/>.*

### Список литературы

1. Gates B. D. Flexible electronics // Science. 2009. Vol. 323, N. 5921. P. 1566–1567.
2. Han S. T., Peng H., Sun Q. et al. An overview of the development of flexible sensors // Advanced materials. 2017. Vol. 29, N. 33. P. 1700375.
3. Iguchi S., Kudo H., Saito T. et al. A flexible and wearable biosensor for tear glucose measurement // Biomedical microdevices. 2007. Vol. 9. P. 603–609.

4. Pronin I. A., Kaneva N. V., Bozhinova A. S. et al. Photocatalytic oxidation of pharmaceuticals on thin nanostructured zinc oxide films // Kinetics and Catalysis. 2014. Vol. 55. P. 167–171.
5. Özgür Ü., Avrutin V., Cho S.-J., Morkoç H. A comprehensive review of ZnO materials and devices // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 041301.
6. Pimentel A., Fortunato E., Gonçalves A. et al. Polycrystalline intrinsic zinc oxide to be used in transparent electronic devices // Thin Solid Films. 2005. Vol. 487, N. 1–2. P. 212–215.
7. Kim Y. H., Heo J. S., Kim T. H. et al. Flexible metal-oxide devices made by room-temperature photochemical activation of sol-gel films // Nature. 2012. Vol. 489, N. 7414. P. 128–132. DOI: 10.1038/nature11434.
8. Pronin I. A., Averin I. A., Yakushova N. D., Dimitrov D. T., Krasteva L. K., Papazova K. I., Chanachev A. S., Bojinova A. S., Georgieva A. T., Moshnikov V. A. // Sensor Actuat. A-Phys. 2014. Vol. 206. P. 88–96. DOI: 10.1016/j.sna.2013.11.035
9. Pronin I. A., Goryacheva M. V. Principles of structure formation and synthesis models produced by the sol-gel method SiO<sub>2</sub>-MexOy nanocomposites // Surface and Coatings Technology. 2013. Vol. 235. P. 835–840.
10. Singh P., Kumar A., Kaushal A. et al. In situ high temperature XRD studies of ZnO nanopowder pre-pared via cost effective ultrasonic mist chemical vapour deposition // Bulletin of Materials Science. 2008. Vol. 31. P. 573–577.
11. Holzwarth U., Gibson N. The Scherrer equation versus the 'Debye-Scherrer equation' // Nature nanotechnology. 2011. Vol. 6, N. 9. P. 534–534.
12. Natsume Y., Sakata H. Zinc oxide films prepared by sol-gel spin-coating // Thin solid films. 2000. Vol. 372, N. 1–2. P. 30–36.

I. V. Sukhov<sup>1</sup>, Student, suhoviwan2012@mail.ru, A. S. Kozin<sup>1</sup>, student, kozinlesha123@yandex.ru, I. A. Pronin<sup>1</sup>, D. Sc., Associate Professor, Head of the Department, pronin\_i90@mail.ru, A. N. Golovyashkin<sup>1</sup>, Ph. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department, angpenza@gmail.com, A. S. Komolov<sup>2</sup>, D. F.-M.Sc., Professor, Professor of the Department, A. A. Karmanov<sup>1</sup>, Ph. D., Associate Professor of the Department, starosta07km1@mail.ru, N. D. Yakushova<sup>1</sup>, Senior Lecturer of the Department, yand93@mail.ru

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, 440026, Russian Federation,

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russian Federation,

*Corresponding author:*

Igor A. Pronin, D. Sc., Associate Professor, Head of the Department, Penza State University, Penza, 440026, Russian Federation  
e-mail: pronin\_i90@mail.ru

## Investigation of the Effect of Combined Photo- and Thermal Annealing on the Structure and Properties of Zinc Oxide Films for Flexible Electronics

Received on April 26, 2023

Accepted on May 29, 2023

*In this work, the evolution of the structural electrophysical parameters of nanostructured zinc oxide films, the preparation of a sol-gel by thermal treatment and combined treatment, including thermal exposure and UV exposure, were studied. It has been established that the use of thermal treatment of films leads to the formation of large aggregates (20–30 μm), density to enlargement with the duration of processing, while the structure of the material at a low level of the hierarchy, determined by the sensitivity of the sensitivity to analysis, as well as the optical band gap is practically independent from processing time. This is probably due to the formation of nanoparticles of the material responsible for the properties associated with the accumulation of the sol prior to its formation on the substrates. The introduction of additional UV irradiation into the system leads to the destruction of aggregates formed during heart failure and the formation of X-ray amorphous ZnO particles during treatment for 90 minutes. Increasing the processing time of the issuance to "crosslinking" the selection, the number of sizes of single crystals and the simultaneous increase in the concentration of point defects, leading to a decrease in the optical revealed band gap. Thus, the combined UV and heat treatment of the film makes it possible, on the one hand, to form a material with a nanocrystalline structure, and, on the other hand, to control its defectiveness. These results are promising for application in the manufacture of thermoelectric batteries, gas, catalysts and photocatalysts.*

**Keywords:** zinc oxide, flexible electronics, sol-gel method, UV photo-annealing

For citation:

Sukhov I. V., Kozin A. S., Pronin I. A., Golovyashkin A. N., Komolov A. S., Karmanov A. A., Yakushova N. D.

Investigation of the Effect of Combined Photo- and Thermal Annealing on the Structure and Properties of Zinc Oxide Films for Flexible Electronics, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 216–221.

DOI: 10.17587/nmst.25.216-221

## References

1. Gates B. D. Flexible electronics, *Science*, 2009, vol. 323, no. 5921, pp. 1566–1567.
2. Han S. T., Peng H., Sun Q. et al. An overview of the development of flexible sensors, *Advanced materials*, 2017, vol. 29, no. 33, pp. 1700375.
3. Iguchi S., Kudo H., Saito T. et al. A flexible and wearable biosensor for tear glucose measurement, *Biomedical microdevices*, 2007, vol. 9, pp. 603–609.
4. Pronin I. A., Kaneva N. V., Bozhinova A. S. et al. Photocatalytic oxidation of pharmaceuticals on thin nanostructured zinc oxide films, *Kinetics and Catalysis*, 2014, vol. 55, pp. 167–171.
5. Özgür Ü. V., Avrutin, Cho S.-J., and Morkoç H. A comprehensive review of ZnO materials and devices, *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 98, pp. 041301.
6. Pimentel A., Fortunato E., Gonçalves A. et al. Polycrystalline intrinsic zinc oxide to be used in transparent electronic devices, *Thin Solid Films*, 2005, vol. 487, no. 1–2, pp. 212–215.
7. Kim Y. H., Heo J. S., Kim T. H. et al. Flexible metal-oxide devices made by room-temperature photochemical activation of sol-

gel films, *Nature*, 2012, vol. 489, no. 7414, pp. 128–132. DOI: 10.1038/nature11434.

8. Pronin I. A., Averin I. A., Yakushova N. D., Dimitrov D. T., Krasteva L. K., Papazova K. I., Chanachev A. S., Bojinova A. S., Georgieva A. T., Moshnikov V. A., *Sensor Actuat. A-Phys.* 2014. Vol. 206. P. 88–96. DOI: 10.1016/j.sna.2013.11.035

9. Pronin I. A., Goryacheva M. V. Principles of structure formation and synthesis models produced by the sol–gel method SiO<sub>2</sub>–MexOy nanocomposites, *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 235, pp. 835–840.

10. Singh P., Kumar A., Kaushal A. et al. In situ high temperature XRD studies of ZnO nanopowder pre-prepared via cost effective ultrasonic mist chemical vapour deposition, *Bulletin of Materials Science*, 2008, vol. 31, pp. 573–577.

11. Holzwarth U., Gibson N. The Scherrer equation versus the "Debye-Scherrer equation", *Nature nanotechnology*, 2011, vol. 6, no. 9, pp. 534–534.

12. Natsume Y., Sakata H. Zinc oxide films prepared by sol-gel spin-coating, *Thin solid films*, 2000, vol. 372, no. 1–2, pp. 30–36.

УДК 629.05

DOI: 10.17587/nmst.25.221-228

С. А. Жукова, канд. техн. наук, зам. нач. центра, Д. Ю. Обижаев, канд. техн. наук, нач. отдела, С. Ю. Суздальцев, канд. техн. наук, нач. лаб., e-mail: suzdtaltsevsy@rambler.ru

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

## ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ГЕРМЕТИЗАЦИИ НА УРОВНЕ ПЛАСТИН ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Поступила в редакцию 11.05.2023 г.

Рассмотрены ключевые проблемы технологии КНП ("кремний над полостью") при изготовлении чувствительных элементов микромеханических акселерометров маятникового и компенсационного типов со сборкой и герметизацией на уровне пластин: этап высокоанизотропного вакуумно-плазменного травления тонкой пластины кремния; этап анодного срачивания КНП с герметизирующей стеклянной крышкой; этап изготовления герметичных контактов.

**Ключевые слова:** МЭМС, высокоанизотропное травление, микроабразивная обработка, прямое срачивание, анодное срачивание, корпусирование на уровне пластин

### Введение

В настоящее время большое внимание уделяется созданию малогабаритных бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Принцип функционирования таких систем предполагает наличие акселерометров, обеспечивающих измерение линейных ускорений объекта. В отличие от крупногабаритных акселерометров, которые функционируют в условиях газового заполнения при атмосферном давлении,

чувствительные элементы МЭМС имеют зазоры между подвижными и неподвижными электродами в единицы микрометров и требуют пониженного давления газового заполнения. Для обеспечения технологичности производства чувствительных элементов (ЧЭ) МЭМС и сохранения миниатюрности вакуумирование неизбежно должно осуществляться с применением методов сборки на уровне пластины (*Wafer Level Packaging, WLP*) [1, 2]. Причем используемые материалы не должны приводить к формированию темпера-

турных деформаций конструкции в диапазоне рабочих температур. В настоящей работе представлены результаты решения некоторых практических задач, поставленных при разработке технологии изготовления чувствительного элемента для микромеханического акселерометра маятникового и компенсационного типов со сборкой и герметизацией на уровне пластин. Изготовление образцов в полном объеме проведено на базе технологической линии, созданной в ФГУП "ЦНИИХМ".

### Маятниковый акселерометр

Изменение геометрических размеров сенсора при изменении температуры окружающей среды наилучшим образом минимизируется при изготовлении единого монокристаллического материала, например кремния. В своей работе при изготовлении микромеханического акселерометра (ММА) маятникового типа были использованы ЧЭ, которые состоят из трех кремниевых электродов: одного подвижного маятникового и двух неподвижных (рис. 1). Электроды формировали методом анизотропного жидкостного травления кремния. Изготовленные электроды монтировали один над другим методом прямого сращивания (*direct bonding*) [3] при пониженном давлении, формируя в каждом из ЧЭ замкнутый объем, тем самым, осуществляли герметизацию на уровне пластин. Датчики с чувствительным элементом маятникового типа, выполненные по технологии объемной микрообработки, представляют собой дифференциальный переменный конденсатор и обладают практически линейными рабочими характеристиками с высокой чувствительностью, временной стабильностью, прочностью и стойкостью к внешним воздействующим факторам.

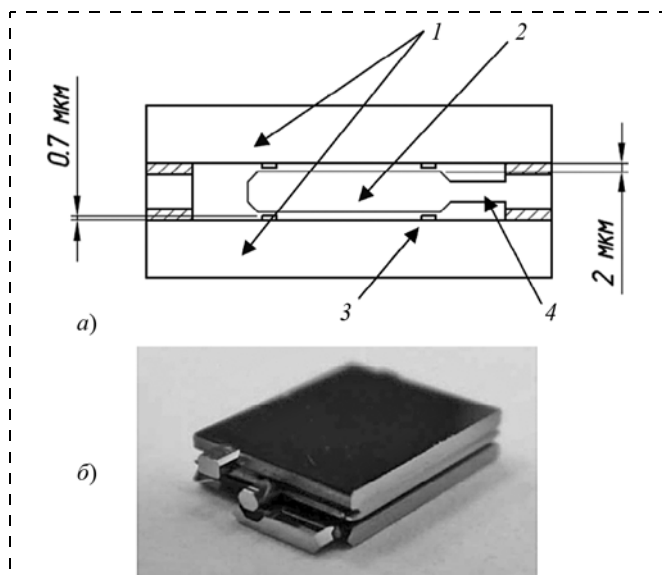


Рис. 1. Чувствительный элемент:

а — схематическое изображение ЧЭ (1 — верхний и нижний электроды; 2 — маятник; 3 — стопперы; 4 — подвес маятника); б — общий вид

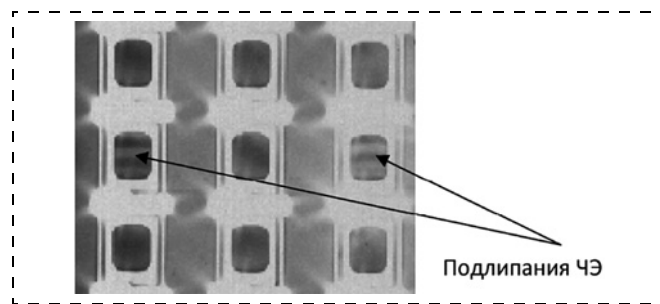


Рис. 2. Эффект "подлипания" маятников ЧЭ после WLP сборки пластин. Изображение с ИК микроскопа в проходящем свете

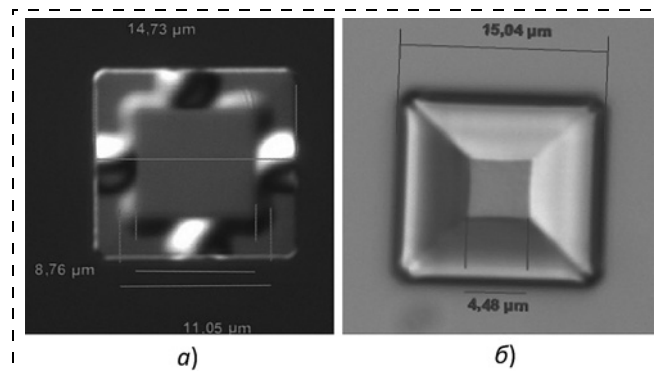


Рис. 3. Внешний вид пирамидальных стопперов ЧЭ после травления  $\text{SiO}_2$  до (а) и после (б) снятия металлической маски (оптический микроскоп)

Изготовленные во ФГУП "ЦНИИХМ" ЧЭ (рис. 1) маятникового типа на диапазон измеряемых ускорений  $\pm 2 \text{ g}$  — "МА-2" и на диапазон ускорений  $\pm 10 \text{ g}$  — "МА-10" имеют размеры  $3,1 \times 4 \times 1,2 \text{ мм}$ , технология изготовления защищена патентом РФ 2580910.

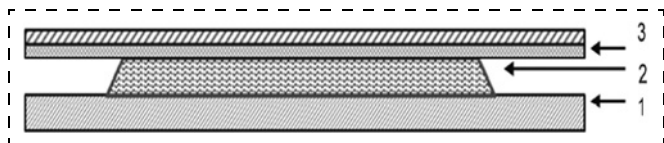
Для того чтобы маятник при максимальных отклонениях не замыкался на стенки верхнего и нижнего электродов, на их плоскостях необходимо изготовить электроизолированные ограничительные стопперы [4]. Однако маятник ЧЭ для работы в диапазоне ускорений  $1...2 \text{ g}$  должен быть изготовлен на тонком подвесе с очень малой жесткостью. В этом случае маятник существенно отклоняется уже при незначительных ускорениях. Столь малая жесткость подвеса ЧЭ приводит к тому, что при соприкосновении стопперов и маятника между их поверхностями возникают силы Ван-дер-Ваальса, сопоставимые с силой упругости подвеса. В этом случае маятник может не возвратиться в исходное нулевое положение между электродами — происходит "подлипание" ЧЭ (рис. 2).

В целях устранения влияния этого эффекта была уменьшена площадь каждого из четырех стопперов до  $12...25 \text{ мкм}^2$ , причем стопперы формировали в виде усеченной пирамиды с углом у основания около  $20^\circ$  (рис. 3). Необходимость такой формы стопперов связана с тем, что пирамида с наклонными стенками обладает большей прочностью на сжатие, поэтому ЧЭ способен переносить многократные существенные перегрузки без разрушения.

Для изготовления стопперов пирамидальной формы из  $\text{SiO}_2$  было использовано жидкостное химическое травление и травление в парах плавиковой кислоты. В качестве кислотоустойчивой маски для травления  $\text{SiO}_2$  были выбраны Ti, V, Al (рис. 4). Известно, что с помощью магнетронного напыления тонкие пленки металлов осаждаются на подложку из  $\text{SiO}_2$  в напряженном состоянии. Нам удалось подобрать толщину покрытия и условия осаждения так, чтобы отслаивание напряженной металлической маски обеспечило быстрое травление на границе раздела металл —  $\text{SiO}_2$  по сравнению с травлением открытой поверхности. Предложенная технология формирования диэлектрических стопперов позволяет увеличить выход годных за счет устранения эффекта "подлипания", причем практически не снижает устойчивость к перегрузкам и не влияет на выходные характеристики ММА.

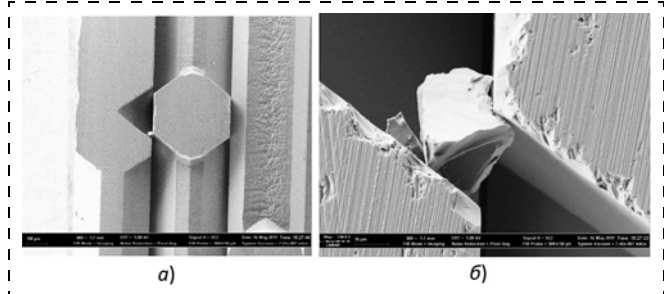
Проблемным моментом предложенной технологии является процесс разделения собранной пластины на отдельные ЧЭ. Это связано с тем, что при алмазной дисковой резке выделяется большое количество шлама — кремниевых частиц различного размера. Трехмерное расположение контактов и наличие зазоров между контактными площадками критически повышает вероятность попадания крупных частиц кремния между электродами и приводит к возникновению короткого замыкания (рис. 5).

Нам удалось устранить появление короткого замыкания за счет подбора условий подготовки пластин, параметров дисковой резки (частота вращения диска, скорость подачи пластины, интенсивность подачи охлаждающей жидкости с ПАВ) и условий отмывки порезанных элементов.



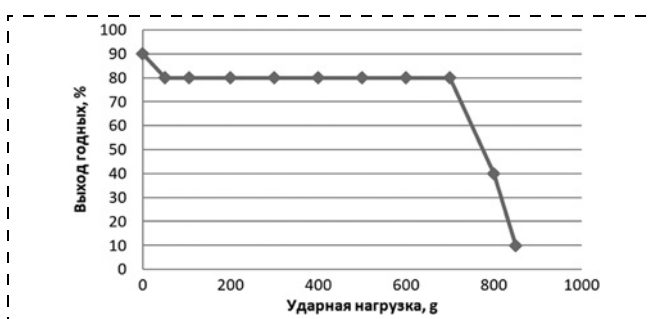
**Рис. 4.** Схема нанесения слоев тонкой металлической маски для пирамидального травления стопперов ЧЭ из оксида кремния:

1 — Si; 2 —  $\text{SiO}_2$ ; 3 — Ti/V (100 нм/300 нм) для жидкостного травления или Al (100 нм) для травления в парах HF



**Рис. 5.** Короткое замыкание электродов ЧЭ ММА частицей кремния после дисковой резки пластины на кристаллы:

а — общий вид; б — место замыкания. Изображение с СЭМ



**Рис. 6.** Устойчивость ЧЭ ММА на диапазон измерений  $\pm 2$  г к ударным нагрузкам. Удары наносились по оси чувствительности ММА (перпендикулярно плоскости маятника) в направлении и верхнего, и нижнего электродов

По представленной выше технологии изготовления партия ЧЭ ММА маятникового типа со стопперами пирамидальной формы, рассчитанных на диапазон измерений  $\pm 2$  г. ЧЭ испытаны на устойчивость к ударным нагрузкам. Выяснено, что такие ЧЭ выдерживают многократные перегрузки вплоть до 700 г без потери потребительских характеристик (рис. 6). При дальнейшем увеличении силы ударов происходит короткое замыкание электродов вследствие разрушения стопперов.

ЧЭ монтировали на эластичный клей в керамический герметичный корпус вместе с преобразователем емкости — напряжением (рис. 7). Использование эластичного клея способствует значительному повышению устойчивости ЧЭ к ударным перегрузкам и, кроме того, снижает температурную зависимость выходных параметров, которая связана с несовпадением коэффициентов линейного температурного расширения ЧЭ и корпуса.

За счет относительной простоты конструкции ЧЭ, большой массы подвижного маятника и использования лишь двух конструкционных материалов — монокристаллического кремния и оксида кремния, изготовленные нами ММА с ЧЭ маятникового типа демонстрируют очень высокие и стабильные потребительские характеристики [5]. Нелинейность передаточной характеристики (максимальное отклонение выходного сигнала акселерометра от наилучшей прямой в процентах от полного диапазона измерения) составляет менее 0,5 %, а для лучших образцов менее 0,25 % (рис. 8, а, см. вторую сторону обложки). Изменение масштабного коэффициента от температуры коррелирует с температурной зависимостью модуля Юнга для монокристаллического кремния. Форма зависимости близка к линейной и легко учитывается при калибровке (рис. 8, б). Температурная зависимость нулевого сигнала менее 250 мкВ/°С до калибровки, определяется особенностями изготовления ЧЭ, и, главное, качеством его монтажа в корпус. Этот параметр воспроизводим и с хорошей точностью компенсируется по показаниям внутреннего датчика температуры при калибровке образца (рис. 8, в). Полоса пропускания (по уровню  $-3$  дБ) — не менее 250 Гц, степень демпфирования регулируется давлением га-



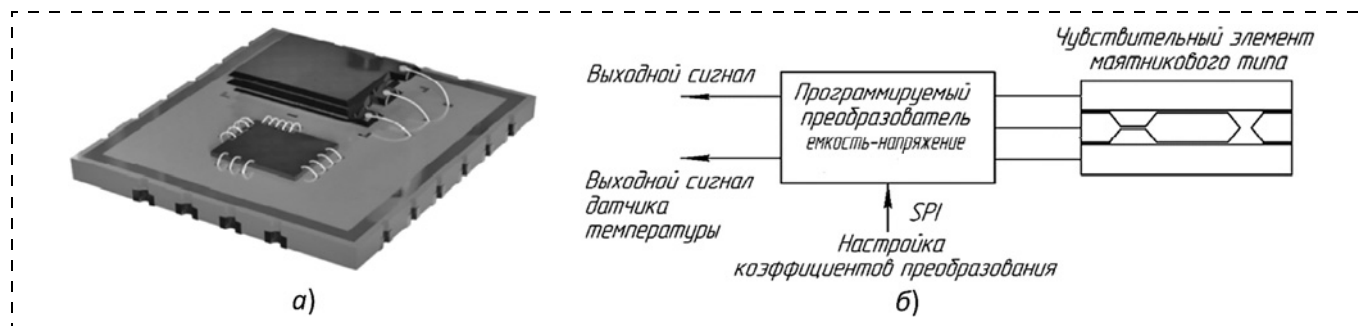


Рис. 7. Размещение ЧЭ ММА маятникового типа в корпусе:

а — общий вид; б — схема

зового заполнения в процессе герметизации ЧЭ на уровне пластины (рис. 8, з).

Основные характеристики изготовленных нами ММА маятникового типа на диапазон измеряемых ускорений  $\pm 2 \text{ g}$  — "МА-2" и на диапазон ускорений  $\pm 10 \text{ g}$  — "МА-10" приведены в табл. 1 в сравнении с характеристиками зарубежных аналогов.

### Компенсационный акселерометр

В отличие от акселерометров на ЧЭ из трех кремниевых пластин, рассмотренных выше, ММА датчики с ЧЭ компенсационного типа существенно менее чувствительны к температурным деформациям. Такие ЧЭ допускают использование для герметизации вакуумных крышек из стекла, но имеют более сложную конструкцию подвижного элемента (маятника) и требуют большего числа герметичных электровыводов. Такой тип акселерометров имеет цепь обратной преобразования, которая обеспечивает силовую разгрузку подвеса за счет создания электростатической силы, пропорциональной действующему ускорению. В акселерометрах компенсационного типа характер перемещения ЧЭ не оказывает существенного влияния на выходные метрологические характеристики. Эти характеристики определяются преимущественно параметрами цепи обратной связи. Кроме того, появляется возможность изменения динамического диа-

пазона и полосы пропускания акселерометра без изменения параметров ЧЭ.

Мы изготовили ЧЭ ММА компенсационного типа на основе системы "кремний над полостью" (КНП) [6, 7]. В приборном слое ЧЭ выполнена гребенчатая структура с изменяемым расстоянием между обкладками. Структура содержит емкостные детекторы и электростатические актюаторы для реализации режима обратной связи. Герметизация выполнена на уровне пластины методом анодного сращивания с применением капсулы на основе боросиликатного стекла (рис. 9).

Маршрут изготовления включает следующие этапы: изготовление подложки с полостями заданной формы; прямое сращивание этой подложки с пластиной кремния через слой  $\text{SiO}_2$ ; формирование тонкой пластины КНП, за счет утонения и прецизионной химико-механической полировки; глубокое реактивное ионное травление тонкой пластины кремния; анодное сращивание КНП с герметизирующей стеклянной крышкой; изготовление герметичных контактов через стеклянную крышку.

Последовательность выполнения основных этапов изготовления образцов МЭМС акселерометра показана на рис. 10.

Вырезание подвижного ЧЭ из кремниевой пластины толщиной 60 мкм проводили (рис. 10, б) с помощью вакуумно-плазменного травления кремния

Таблица 1

Параметр	МА-2 (ФГУП ЦНИИХМ)	МА-10 (ФГУП ЦНИИХМ)	MS9001.D (Safran Colibrys)	ADXL-103 (Analog Devices)	SCA3100 (Murata)
Диапазон измерения, g	$-2...+2$	$-10...+10$	$-1...+1$	$-1...+1$	$-2...+2$
Чувствительность, мВ/g	675 (VCC + 3,3 В) 1000 (VCC + 5,0 В)	135 (VCC + 3,3 В) 200 (VCC + 5,0 В)	2000 (VCC + 5,0 В)	1024 LSB/g	900 LSB/g
Нелинейность, %	< 0,5	< 0,5	< 1	< 0,5	< 1,5
Частотный диапазон, Гц	> 250	> 250	100	1600	< 55
Смещение нуля при температуре, мкг/°C	< 500	< 2500	< 50 (тип) < 200 (макс)	500	150
Шум, мкг/Гц <sup>1/2</sup>	50	250	18	150	700 (350 для $\pm 1 \text{ g}$ )
Тип выходного сигнала	аналоговый	аналоговый	аналоговый	цифровой	цифровой
Ток потребления, мА	0,9 (VCC + 3,3 В) 1,2 (VCC + 5,0 В)	0,9 (VCC + 3,3 В) 1,2 (VCC + 5,0 В)	0,4 (VCC + 5,0 В)	0,3 (VCC + 3,3 В)	3,0 (VCC + 3,3 В)
Диапазон рабочих температур, °C	$-40...+85$ (возможно расширение)	$-40...+85$ (возможно расширение)	$-55...+125$	$-40...+105$	$-40...+125$

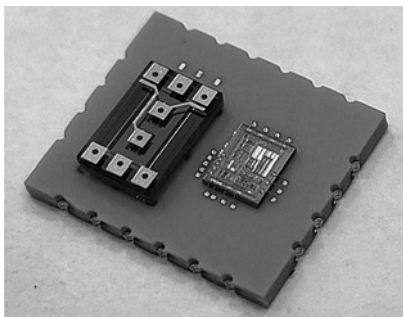


Рис. 9. Схема размещения ЧЭ ММА компенсационного типа в корпусе

(*Bosch*-процесс). Известно, что поочередное проведение трех основных стадий *Bosch*-процесса — пассивации, вскрытия пассиватора и собственно травления кремния приводит не только к возможности высокоанизотропного глубокого травления, но и к формированию на стенках травимого кремния периодической неравномерности (скалопин) [8]. Вертикальность получаемых стенок в предельном случае ограничивается размером скалопины. Особенностью *Bosch*-процесса является то, что если глубина травления много больше линейного размера элемента, то по мере возрастания глубины обработки существенно, но не одновременно, снижаются скорости трех основных стадий процесса. Это приводит к необходимости постоянной корректировки продолжительности и интенсивности проведения каждой из них.

Нам удалось подобрать такие условия проведения *Bosch*-процесса, которые учитывают изменения скоростей протекания стадий с ростом глубины травления. При использовании подобранных режимов *Bosch*-процесса с периодической коррекцией достигнуто отклонение от вертикальности, сопоставимое со средним размером скалопин, и получена анизотропия травления 400 ед. (отношение глубины травления к значению подтравки под маску). Экспериментально изготовлены образцы ЧЭ со стенками травления, которые имеют отклонение от вертикали всего  $\pm 0,15$  мкм на глубине 60 мкм в канавках шириной 4 мкм, причем как для маятниковой, так и для неподвижной части акселерометра (рис. 11).

Давление и неизменность состава атмосферы внутри МЭМС-устройств определяет характеристики демпфирования и амплитудно-частотные характеристики рабочих движущихся элементов, поэтому для сохранения герметичности в течение всего срока жизни МЭМС крайне

важно высокое качество соединения вакуумной крышки и корпуса [9]. К преимуществам метода анодного сращивания (см. рис. 10, в) относятся его простота, надежность, совместимость с Al металлизацией, возможность сборки и вакууммирования акселерометров групповым методом непосредственно на пластине. Нами в качестве крышки было использовано боросиликатное стекло толщиной 380 мкм с полостями, изготовленными методом химического травления в растворе HF. Полости на пластине-носителе и в стеклянной крышке позволяют ЧЭ свободно колебаться на пружинных подвесах вдоль одной координатной оси (рис. 12).

Выяснено, что для увеличения качества соединения пластин, но без разрушения ограничительных упоров на ЧЭ, необходимо проводить процесс с поэтапным увеличением напряжения. С этой целью необходимо проводить сборку при напряжении не более 300 В и продолжительностью не менее 10 мин, затем необходимо увеличить напряжение до 500 В и поддерживать его вплоть до окончания процесса.

При реализации этапа изготовления герметичных контактов (см. рис. 10, г) использована абразивно-струйная обработка (*abrasive jet machining — AJM*) или микроабразивная обработка — многообещающая технология обработки стеклянных и кремниевые подложек для МЭМС. По этой технологии на подложку воздействует поток абразивных частиц, причем часть поверхности подложки экранирована износостойкой маской со сформированным на ней рисунком [10].

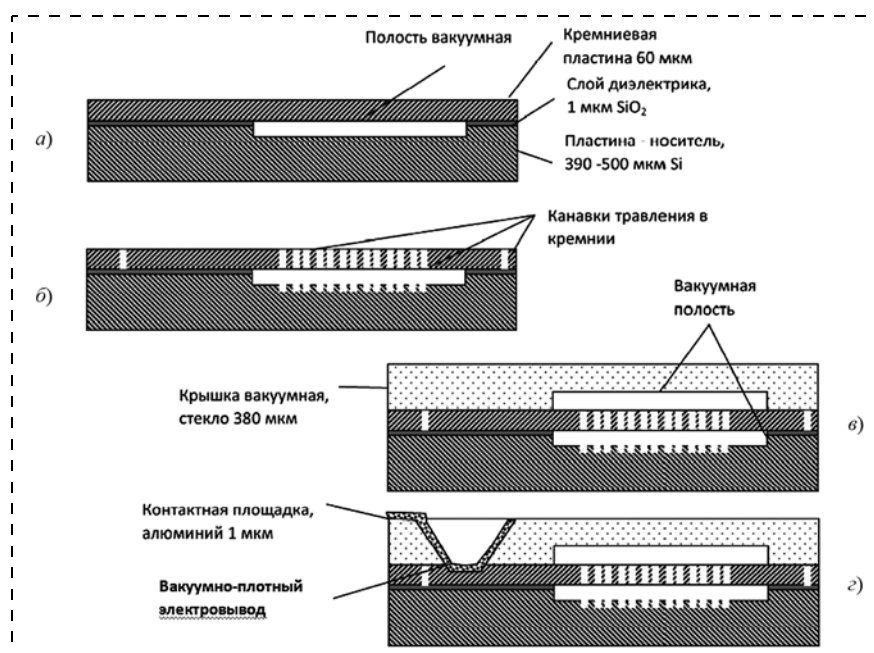


Рис. 10. Последовательность выполнения основных этапов изготовления МЭМС акселерометра с ЧЭ, изготовленным по технологии "кремний над полостью" с применением стеклянной крышки:

а — этап формирования тонкой пластины КНП, за счет прямого сращивания пластин кремния через слой  $\text{SiO}_2$  и последующего утонения; б — этап высокоанизотропного вакуумно-плазменного травления тонкой пластины кремния; в — этап анодного сращивания КНП с герметизирующей стеклянной крышкой; г — этап изготовления герметичных контактов

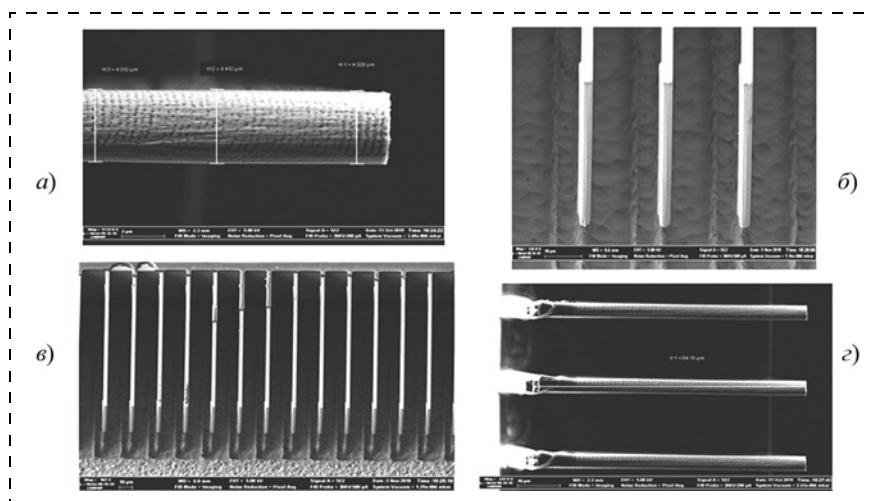


Рис. 11. СЭМ изображение балок ЧЭ после Bosch-процесса с однородностью толщины  $\pm 0,15$  мкм:

а — фрагмент единичной балки; б — неподвижные балки (увеличение 3620 крат); в — неподвижные балки (увеличение 1000 крат); г — балки маятниковой части ЧЭ

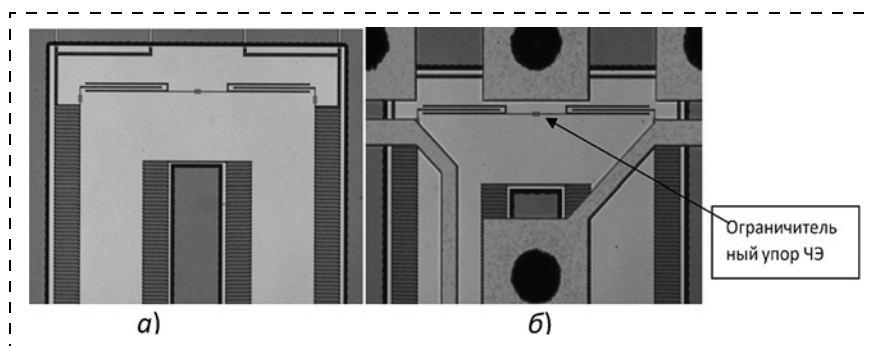


Рис. 12. Один из вариантов топологии ЧЭ акселерометра КНП, размещенного в вакуумной полости под крышкой из боросиликатного стекла до (а) и после (б) изготовления герметичных контактов с площадками из Al, нанесенными на поверхность прозрачной крышки. Фотография с оптического микроскопа

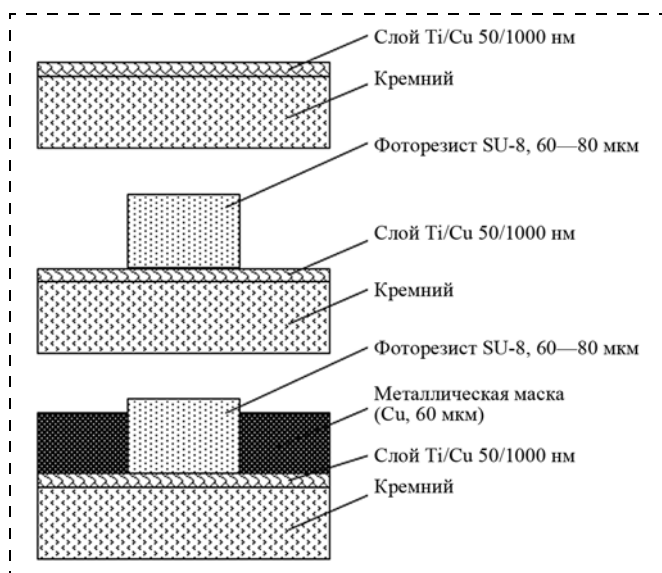


Рис. 13. Последовательность операций изготовления медной маски, устойчивой к микроабразивной обработке частицами электрокорунда

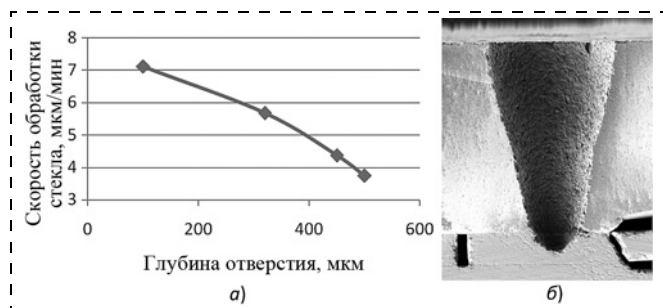
Абразивные частицы разгоняются в потоке газа и раз за разом ударяют в твердую, но хрупкую подложку из стекла или кремния, постепенно выкалывая из подложки мелкие фрагменты, тем самым постепенно формируя полости или отверстия. Цель изготовления глухих отверстий через стеклянную крышку состоит в создании электрических вакуумно-плотных контактов к центральной пластине кремния, т. е. к чувствительным элементам МЭМС из кремния.

Для получения глухих отверстий глубиной до 700 мкм при микроабразивной обработке стекла и кремния в работе были изготовлены медные маски толщиной 50 мкм (рис. 13). Для этого на поверхность стеклянной крышки наносили металлический электропроводный слой Ti/Cu 50/1000 нм, затем с помощью фотолитографии формировалась маска из фоторезиста SU-8 в виде столбиков высотой 60...80 мкм и диаметром 250 мкм. После этого проводили гальваническое наращивание слоя из меди до толщины 50...60 мкм так, чтобы слой меди покрывал всю поверхность стеклянной крышки, кроме участков со столбиками. После изготовления медной маски столбики из SU-8 не удаляли.

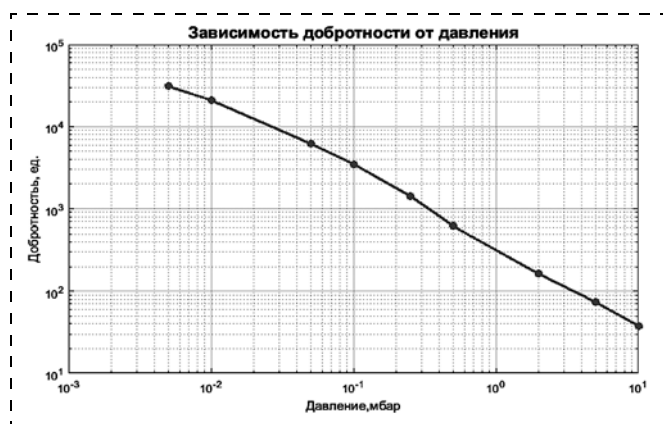
Порошок  $Al_2O_3$  (электрокорунд) со средним размером частиц 27 мкм подавали на пластину в струе сжатого воздуха 100 Psi через сопло диаметром 0,75 мм. Расстояние между соплом и обрабатываемой пластиной составляло 45 мм.

Обнаружено, что при этих режимах микроабразивной обработки скорость удаления меди в 38 раз ниже скорости удаления фоторезиста SU-8. Поэтому столбики из SU-8 способствовали формированию резких границ на отверстиях диаметром 250 мкм в медной маске. Известно, что по мере возрастания глубины отверстий скорость обработки ощутимо падает в случае, если диаметр получаемых отверстий сопоставим с размером абразивных частиц [11]. Экспериментально определены скорости удаления стекла и кремния в отверстиях различной глубины (рис. 14) и диаметра, при заданных режимах микроабразивной обработки. Определено, что толщина медной маски должна составлять не менее 20 мкм для надежной защиты поверхности стеклянной крышки, устранения дефектообразования и сохранения четких границ отверстия.

На основании полученных результатов разработан процесс формирования глухих отверстий диаметрами 250 и 500 мкм с глубиной до 700 мкм через стеклянную крышку для создания электрических вакуумно-плотных контактов к чувствительным элементам



**Рис. 14.** Изменение скорости удаления стекла и кремния в отверстиях диаметром 250 мкм в зависимости от глубины проделанного отверстия при микроабразивной обработке частицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (а), СЭМ изображение профиля отверстия диаметром 250 мкм через стекло толщиной 380 мкм до середины центральной пластины кремния толщиной 60 мкм (б)



**Рис. 15.** Добротность резонанса колебания маятника ЧЭ ММА компенсационного типа при различном вакууме в капсуле

МЭМС из кремния, корпусированных на уровне пластины WLP.

Уровень вакуума в полости с ЧЭ определяет эффективность демпфирования колебаний маятника ЧЭ. Нами экспериментально получена калибровочная кривая [6], позволяющая оценивать уровень вакуума в ЧЭ ММА по значению добротности резонанса колебания маятника ЧЭ (рис. 15).

## Заключение

Результаты измерения характеристик изготовленных ЧЭ компенсационного типа подтверждают возможность их использования для изготовления высокочувствительных акселерометров. Технология изготовления ЧЭ акселерометров КНП компенсационного типа существенно сложнее, чем технология ЧЭ маятникового типа, но имеет лучший выход годных с высокой повторяемостью характеристик. Кроме того, самое главное, что технология КНП позволяет изготавливать чувствительные элементы не только ММА, но и микромеханических гироскопов. Гироскопы такого типа требуют не только еще более сложной конструкции ЧЭ с множеством вакуумно-плотных электровыводов, не только более сложной системы обработки выходного сигнала, но и в отличие от ММА, нуждаются не в демпфировании, а в предельно вы-

соком вакууме. Добиться поддержания высокого вакуума должны газопоглощающие материалы (геттеры) тонкопленочного типа, нанесенные на элементы внутри вакуумного объема ЧЭ. Причем использование стеклянной крышки в составе ЧЭ не допускает применения геттеров с высокими температурами активации. Поэтому перед нами поставлена задача разработки технологии осаждения эффективных тонкопленочных геттерных покрытий с температурой активации ниже 500 °С. Задача нанесения и активации высокоэффективной пленки геттера внутри гироскопа, в первую очередь, требует корректной оценки газопоглотительной способности материала пленки. Для этого необходимы измерители вакуума, например, представленный выше ЧЭ ММА компенсационного типа с калиброванной добротностью (см. рис. 15). Разработка способа получения пленочных геттеров на базе имеющегося в НИЦ НТ технологического оборудования является одной из основных задач по дальнейшему развитию технологии КНП для гироскопов.

## Список литературы

1. Сысоева С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. 2014. № 6. С. 40–46.
2. Vierinen K. Microsystems, MEMS-applications, manufacturing methods for MEMS [Электронный ресурс]. Metropolia University of Applied Sciences, 2015. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/323069589\\_Microsystems\\_MEMS-applications\\_manufacturing\\_methods\\_for\\_MEMS](https://www.researchgate.net/publication/323069589_Microsystems_MEMS-applications_manufacturing_methods_for_MEMS).
3. Суздальцев С. Ю., Обижаев Д. Ю., Иванов С. Ю., Жукова С. А., Турков В. Е. Применение прямого сращивания кремниевых пластин для формирования вакуумноплотных электрических выводов чувствительных элементов МЭМС // Наноиндустрия. 2019. Т. 5 (89). С. 502–505.
4. Обижаев Д. Ю., Жукова С. А., Суздальцев С. Ю., Сальникова Т. В., Иванов С. Ю. Особенности технологии изготовления чувствительных элементов маятникового акселерометра для инерциальных модулей перспективных систем технического контроля // Наноиндустрия, 2021. Т. 57 (107). С. 481–483.
5. Иванов С. Ю., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Турков В. Е., Ульянов С. А. Чувствительный элемент микромеханического акселерометра компенсационного типа // Наноиндустрия. 2020. Т. 54 (99). С. 478–480.
6. Жукова С. А., Новичков Е. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю., Турков В. Е., Ромахин П. А., Ульянов С. А., Иванов С. Ю. Особенности технологии формирования чувствительных элементов инерциальных датчиков на основе структур "кремний над полостью", герметизируемых на уровне пластин // Наноиндустрия. 2021. Т. 57 (107). С. 492–494.
7. Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Рискин Д. Д., Суздальцев С. Ю., Турков В. Е. Устойчивость чувствительного элемента микромеханического акселерометра маятникового типа к ударным нагрузкам. Российский форум "Микроэлектроника-2022", Сборник тезисов, 2022. С. 428–429.
8. Rangelow I. W. Critical tasks in high aspect ratio silicon dry etching for microelectromechanical systems // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2003. Vol. 21, N. 4. P. 1550–1562.
9. Cozma A., Puers B. Characterization of the electrostatic bonding of silicon and Pyrex // J. Micromech. Microeng. 1995. Vol. 5, N. 2. P. 98–102.
10. Achtsnick M., Drabbe J., Hoogstrate A. M., Karpuschewski B. Erosion behaviour and pattern transfer accuracy of protecting masks for micro-abrasive blasting // J. Mater. Proc. Tech. 2004. Vol. 149 (1–3).
11. Wensink H., Berenschot J. W., Jansen H. V., Elwenspoek M. C. Mask Materials in Powderblasting // 10th Workshop on Micromachining, Micromechanics and Microsystems (MME 99), 1999, September 27–28, Gif-sur-Yvette, France. P. 199–202.



**Zhukova S. A.**, Ph. D., Head of Complex, **Obizhaev D. Yu.**, Ph. D., Chief of Dept., **Suzdal'cev S. Yu.**, Ph. D., Chief of Lab, e-mail: suzdtsevsy@rambler.ru  
State Research Centre of Russian Federation "Central Scientific Research Institute of Chemistry and Mechanics", Moscow

Corresponding author:

**S. A. Zhukova**, Ph. D., State Research Centre of Russian Federation, Central Scientific Research Institute of Chemistry and Mechanics, Moscow, 115487, Russian Federation, e-mail: suzdtsevsy@rambler.ru

## Problems of Wafer Level Packaging of Sensitive Elements for MEMS

Received on May 11, 2023

Accepted on August 01, 2023

The key problems of technological processes used in the manufacture of sensitive elements (SE) of micromechanical accelerometers (MMA) of pendulum and compensation types with assembly and sealing at the level of plates are considered. A technology for the formation of dielectric stoppers has been proposed, which made it possible to increase the yield of suitable ones by eliminating the effect of "sticking" without affecting the output characteristics of MMA. It was found that such SE can withstand multiple impact overloads up to 700 g. The characteristics of the pendulum SE are given for the range of measured accelerations  $\pm 1$  g and for the acceleration range  $\pm 10$  g. It is shown that the silicon-over-cavity (SOC) technology used for the manufacture of compensating-type SE accelerometers is much more complicated than the pendulum-type SE technology, but has a better yield with high repeatability of characteristics. The main stages of SOC technology are shown: the stage of highly anisotropic vacuum-plasma etching of a thin silicon wafer; stage of anode bonding with a sealing glass cover; the stage of manufacturing hermetic contacts. Modes have been determined that make it possible to carry out highly anisotropic vacuum-plasma etching of the SE with etching walls that have a deviation from the vertical of only  $\pm 0.15 \mu\text{m}$  at a depth of  $60 \mu\text{m}$  in grooves  $4 \mu\text{m}$  wide, both for the pendulum and for the fixed part of the accelerometer. The SOC technology makes it possible to manufacture sensitive elements not only for MMA, but also for micromechanical gyroscopes. It is shown that SE accelerometers of compensation type can serve as micro-sized vacuum sensors when testing the efficiency of the getter coating in small-sized vacuum volumes.

**Keywords:** MEMS, highly anisotropic etching, abrasive jet machining, direct bonding, anodic bonding, vacuum level packaging

For citation:

**Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Suzdal'cev S. Yu.** Problems of Wafer Level Packaging of Sensitive Elements for MEMS, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 221–228.

DOI: 10.17587/nmst.25.221-228

### References

1. **Sysoeva S.** Tendencii rynka High-end MEMS-datchikov inercii. Novye urovni harakteristik i ispolneniya, *Komponenty i tekhnologii*, 2014, vol. 6. (in Russian).
2. **Vierinen K.** Microsystems, MEMS-applications, manufacturing methods for MEMS, *Metropolia University of Applied Sciences*. 2015. <https://www.researchgate.net/publication/323069589> Microsystems MEMS-applications manufacturing methods for MEMS
3. **Suzdal'cev S. Yu., Obizhaev D. Yu., Ivanov S. Yu., Zhukova S. A., Turkov V. E.** Primenenie pryamogo srashchivaniya kremnievyykh plastin dlya formirovaniya vakuumnoplottykh elektricheskikh vyvodov chuvstvitel'nykh elementov MEMS. *Nanoindustrialiya*, 2019, vol. 8 (9), pp. 502–505 (in Russian).
4. **Obizhaev D. Yu., Zhukova S. A., Suzdal'cev S. Yu., Sal'nikova T. V., Ivanov S. Yu.** Osobennosti tekhnologii izgotovleniya chuvstvitel'nykh elementov mayatnikovogo akselerometra dlya inercial'nykh module perspektivnykh sistem tekhnicheskogo kontrolya, *Nanoindustrialiya*, 2021, vol. S7 (107), pp. 481–483 (in Russian).
5. **Ivanov S. Yu., Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Turkov V. E., Ul'yanov S. A.** Chuvstvitel'nyy element mikromekhanicheskogo akselerometra kompensatsionnogo tipa, *Nanoindustrialiya*, 2020, vol. S4 (99), pp. 478–480 (in Russian).
6. **Zhukova S. A., Novichkov E. A., Obizhaev D. Yu., Suzdal'cev S. Yu., Turkov V. E., Romahin P. A., Ul'yanov S. A., Ivanov S. Yu.** Osobennosti tekhnologii formirovaniya chuvstvitel'nykh elementov inercial'nykh datchikov na osnove struktur "kremnij nad polost'yu", germetiziruemykh na urovne plastin. *Nanoindustrialiya*, 2021, vol. S7 (107), pp. 492–494 (in Russian).
7. **Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Riskin D. D., Suzdal'cev S. Yu., Turkov V. E.** Ustoichivost' chuvstvitel'nogo elementa mikromekhanicheskogo akselerometra mayatnikovogo tipa k udarnym nagruzkam, *Sbornik tezisev, Rossijskij forum "Mikroelektronika-2022"*, 2022, pp. 428–429 (in Russian).
8. **Rangelow I. W.** Critical tasks in high aspect ratio silicon dry etching for microelectromechanical systems, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2003, vol. 21, no. 4, pp. 1550–1562.
9. **Cozma A., Puers B.** Characterization of the electrostatic bonding of silicon and Pyrex, *J. Micromech., Microeng.*, 1995, vol. 5, no. 2, pp. 98–102.
10. **Achtsnick M., Drabbe J., Hoogstrate A. M., Karpuschewski B.** Erosion behaviour and pattern transfer accuracy of protecting masks for micro-abrasive blasting, *J. Mater. Proc. Tech.*, 2004, vol. 149 (1–3).
11. **Wensink H., Berenschot J. W., Jansen H. V., Elwenspoek M. C.** Mask Materials in Powderblasting, *10th Workshop on Micromachining, Micromechanics and Microsystems (MME 99)*, 1999, September 27–28, Gif-sur-Yvette, France, pp. 199–202.

**Ю. А. Чаплыгин**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, **В. В. Лосев**, д-р техн. наук, проф., dsd@miee.ru, **А. И. Хлыбов**, канд. техн. наук, вед. инженер, alex1818@yandex.ru, **Д. В. Родионов**, вед. инженер, denis.rodionov@gmail.com, **Е. Ю. Котляров**, аспирант, ekotlyarov86@gmail.com, **Н. В. Гуминов**, вед. инженер, gummi.qdn@gmail.com

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет МИЭТ"

## МЕТОДИКА ЭКСТРАКЦИИ ВХОДНОЙ ЕМКОСТИ ЗАТВОРА GaN ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА В ГИГАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Поступила в редакцию 04.05.2023 г.

*Предложена новая методика экстракции входной емкости затвора GaN полевого транзистора на основе высокочастотных измерений  $S$ -параметров и теории линии передач. На основе экспериментальных исследований GaN полевого транзистора ( $L_g = 0,25$  мкм,  $W = 160$  мкм) по предложенной методике определена входная емкость затвора для различных режимов его работы в гигагерцовом диапазоне. Приведена зависимость входной емкости от напряжения на стоке в диапазоне 1,0...20,0 В на частоте 15,0 ГГц при напряжении на затворе  $-3,0$  В. Отмечено, что входная емкость уменьшается от 460 до 340 фФ. Проведены измерения входной емкости в аналогичных режимах методом времязаимпульсной рефлектометрии. Получены хорошие совпадения результатов экстракции по предложенной методике с результатами измерений.*

**Ключевые слова:** GaN; HEMT;  $S$ -параметры, времязаимпульсная рефлектометрия, максимальная частота усиления, входная емкость транзистора, емкость затвор-исток, емкость затвор-сток, гигагерцовый диапазон

### Введение

Определение зависимости входной емкости полевого GaN транзистора от режима работы в сантиметровом и миллиметровом диапазонах имеет важное значение для получения физического представления о его работе, а также для разработки моделей большого и малого сигналов. Обычные методы определения емкости затвора транзистора заключаются в использовании квазистатических или высокочастотных измерений емкости  $C-V$ -методом. Однако даже при так называемых "высокочастотных"  $C-V$ -измерениях, обычно используется общепринятая частота не более 5 МГц. Значение емкости, измеренное этими традиционными методами, может отличаться от значения емкости на гигагерцовых частотах, что приведет к некорректному описанию работы транзистора, когда устройство работает на высоких частотах (например, выше 1 ГГц). Существуют методы определения параметров транзисторов на рабочих частотах,

лежащих в гигагерцовом диапазоне, такие как рефлектометрический метод [1], основанный на анализе воздействия пикосекундных импульсов на объект исследования или экстракция характеристик транзистора из измеренных значений  $S$ -параметров [2, 3]. В данной работе авторы предложили методику определения входной емкости GaN полевого транзистора на основе теории линии передач и данных высокочастотных измерений, экстрагированных из матрицы рассеяния. Проведено сравнение полученных результатов с результатами измерений входной емкости методом времязаимпульсной рефлектометрии.

### Теоретические исследования

Схема включения транзистора при проведении исследований показана на рис. 1. Здесь транзистор включен по схеме с общим истоком. На затвор транзистора по согласованному с источником 50-омному волновому тракту подается гармонический сигнал с одного

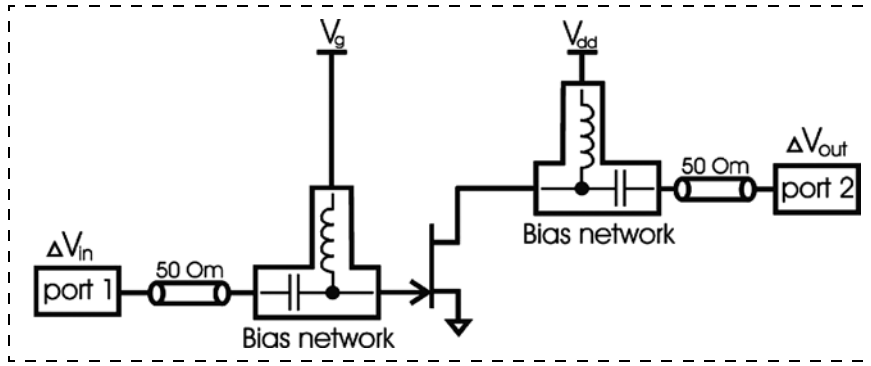


Рис. 1. Схема включения транзистора при исследовании на векторном анализаторе цепей, где  $V_g$  — напряжение на затворе;  $V_{dd}$  — напряжение питания

из портов измерителя. Другой порт по 50-омному волновому тракту подключен к стоку транзистора.

Эквивалентная схема для анализа входного и выходного сигналов в соответствии с правилом эквивалентной волны показана на рис. 2. Рабочая точка транзистора выбрана на пологом участке выходной ВАХ.

Изменение входного тока  $\Delta I_{in}$  в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, определяется выражением:

$$\Delta I_{in} = \frac{2\Delta V_{in}}{R_L + Z_{in}}, \quad (1)$$

где  $\Delta V_{in}$  — изменение напряжения на источнике сигнала;  $R_L = 50$  Ом — импеданс СВЧ тракта;  $Z_{in}$  — входной импеданс транзистора, определяемый следующим выражением:

$$Z_{in} = R_g + \frac{Z_{gs}Z_{gd}}{Z_{gs} + Z_{gd}}, \quad Z_{gs} = R_s + \frac{1}{j\omega C_{gs}},$$

$$Z_{gd} = R_d + R_L + \frac{1}{j\omega C'_{gd}}, \quad (2)$$

где  $R_s$ ,  $R_d$ ,  $R_g$  — сопротивление истока, стока и затвора соответственно;  $C_{gs}$  — емкость затвор—исток;  $C'_{gd}$  — эффективная емкость затвор—сток.

Эффективная (вследствие эффекта Миллера) емкость затвор—сток  $C'_{gd}$  для схемы, приведенной на рис. 1, определена как

$$C'_{gd} = C_{gd}(1 + K_V), \quad (3)$$

где  $K_V$  — коэффициент усиления по напряжению;  $C_{gd}$  — емкость затвор—сток.

Принимая во внимание, что  $\frac{1}{j\omega C_{gs}} \gg R_s$ ,  $R_g$ ;  $\frac{1}{j\omega C'_{gd}} \gg R_s$ ,  $R_g$ ,  $R_L$ ;  $R_{out} = \frac{1}{g_d} \gg R_d$ ,  $R_L$ , выражение для входного импеданса принимает следующий вид:

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega(C_{gs} + C'_{gd})}. \quad (4)$$

Таким образом, изменение тока в цепи затвор—исток можно выразить следующим образом:

$$\Delta I_{gs} = \frac{\Delta I_{in} C_{gs}}{(C_{gs} + C'_{gd})}, \quad (5)$$

а изменение напряжения в цепи затвор—исток

$$\Delta V_{gs} = \frac{\Delta I_{gs}}{j\omega C_{gs}} = \Delta I_{in} \frac{\left(\frac{C_{gs}}{C_{gs} + C'_{gd}}\right)}{j\omega C_{gs}} =$$

$$= \frac{\Delta I_{in}}{j\omega(C_{gs} + C'_{gd})}. \quad (6)$$

С учетом соотношений (1) и (6) получаем значение изменения выходного тока:

$$\Delta I_{out} = g\Delta V_{gs} = \frac{g\Delta I_{in}}{j\omega(C_{gs} + C'_{gd})} =$$

$$= \frac{g}{j\omega(C_{gs} + C'_{gd})} \frac{2\Delta V_{in}}{R_L + Z_{in}}, \quad (7)$$

где  $g$  — передаточная проводимость транзистора.

Подставляя в выражение (7) значение  $Z_{in}$  из (4), получаем

$$\Delta I_{out} = \frac{2g\Delta V_{in}}{j\omega R_L(C_{gs} + C'_{gd}) + 1}. \quad (8)$$

Тогда коэффициент усиления по напряжению может быть записан следующим образом:

$$K_V = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{\Delta I_{out} R_L}{\Delta V_{in}} = \frac{2gR_L}{j\omega R_L(C_{gs} + C'_{gd}) + 1}. \quad (9)$$

Далее следует определить модуль коэффициента усиления по напряжению  $|K_V|$ . Для этого числитель и знаменатель в уравнении (9) необходимо умножить на комплексно-сопряженное выражение:

$$K_V = \frac{2gR_L(1 - j\omega R_L(C_{gs} + C'_{gd}))}{(1 + j\omega R_L(C_{gs} + C'_{gd}))(1 - j\omega R_L(C_{gs} + C'_{gd}))} =$$

$$= \frac{2gR_L(1 - j\omega R_L(C_{gs} + C'_{gd}))}{1 + [\omega R_L(C_{gs} + C'_{gd})]^2}. \quad (10)$$

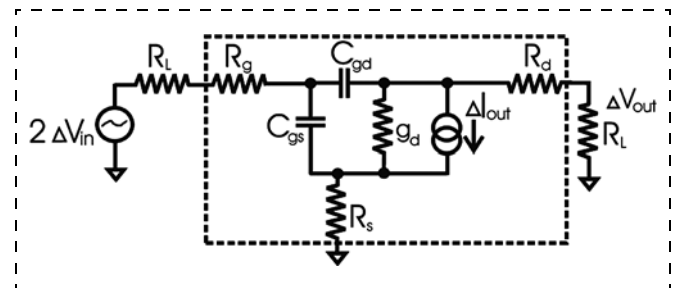


Рис. 2. Малосигнальная эквивалентная схема для анализа входного и выходного сигналов;  $R_L = 50$  Ом — входной импеданс порта и импеданс линии передач

Теперь уравнение для коэффициента усиления по напряжению можно записать в виде комплексного числа с разделением действительной и мнимой частей:

$$K_V = \frac{2gR_L}{1 + \omega^2 R_L^2 (C_{gs} + C'_{gd})^2} - j \frac{2gR_L^2 \omega (C_{gs} + C'_{gd})}{1 + \omega^2 R_L^2 (C_{gs} + C'_{gd})^2}. \quad (11)$$

После этого модуль коэффициента усиления по напряжению можно записать в виде:

$$\begin{aligned} |K_V| &= \sqrt{[\operatorname{Re}(K_V)]^2 + [\operatorname{Im}(K_V)]^2} = \\ &= \frac{1}{1 + \omega^2 R_L^2 (C_{gs} + C'_{gd})^2} \times \\ &\times \sqrt{(2gR_L)^2 + [2g\omega R_L^2 (C_{gs} + C'_{gd})]^2} = \\ &= \frac{2gR_L}{\sqrt{1 + \omega^2 R_L^2 (C_{gs} + C'_{gd})^2}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Учитывая, что входная мощность  $P_{in} = \frac{(\Delta V_{in})^2}{R_L}$ ,

выходная мощность  $P_{out} = \frac{(\Delta V_{out})^2}{R_L} = (\Delta I_{out})^2 R_L$ , находим коэффициент усиления по мощности:

$$\begin{aligned} K_P &= \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(V_{out})^2}{(V_{in})^2} = |K_V|^2 = \\ &= \left( \frac{2gR_L}{\sqrt{1 + \omega^2 R_L^2 (C_{gs} + C'_{gd})^2}} \right)^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда параметр  $S_{21}$  (коэффициент усиления по мощности в децибелах) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} S_{21} &= 10 \lg(K_P) = 20 \lg(|K_V|) = \\ &= 20 \lg \left( \frac{2gR_L}{\sqrt{1 + \omega^2 R_L^2 (C_{gs} + C'_{gd})^2}} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Из выражения (14) определяем входную емкость как функцию от параметра  $S_{21}$ :

$$\begin{aligned} C_{in} = C_{gs} + C'_{gd} &= \frac{1}{\omega R_L} \sqrt{\left( \frac{2gR_L}{10^{S_{21}/20}} \right)^2 - 1} = \\ &= \frac{1}{2\pi f R_L} \sqrt{\left( \frac{2gR_L}{10^{S_{21}/20}} \right)^2 - 1}. \end{aligned} \quad (15)$$

Предлагаемая методика также позволяет определить каждую из емкостей затвора  $C_{gs}$  и  $C_{gd}$ . Принимая во внимание, что

$$\begin{aligned} C_{in} &= C_{gs} + C'_{gd} = C_{gs} + C_{gd}(1 + K_V) = \\ &= C_{gs} + C_{gd}(1 + 10^{S_{21}/20}) \end{aligned} \quad (16)$$

и проводя измерение параметра  $S_{21}$  на двух близких частотах ( $f_1$  и  $f_2$ ), получаем два значения входной емкости  $C_{in}(f_1)$  и  $C_{in}(f_2)$ :

$$\begin{cases} C_{in}(f_1) = C_{gs} + C_{gd}(1 + K_V(f_1)); \\ C_{in}(f_2) = C_{gs} + C_{gd}(1 + K_V(f_2)). \end{cases} \quad (17)$$

Выразим емкость  $C_{gs}$  из первого уравнения в системе (17):

$$C_{gs} = C_{in}(f_1) - C_{gd}(1 + K_V(f_1)). \quad (18)$$

Полученное уравнение подставлено во второе уравнение в системе (17). Получаем уравнение для емкости затвор—сток ( $C_{gd}$ ) в виде:

$$C_{gd} = \frac{C_{in}(f_2) - C_{in}(f_1)}{K_V(f_2) - K_V(f_1)}. \quad (19)$$

Затем уравнение (19) необходимо подставить в уравнение (18) для определения емкости затвор—исток ( $C_{gs}$ ). Ниже приведены полученные уравнения для емкостей  $C_{gs}$  и  $C_{gd}$ :

$$\begin{cases} C_{gd} = \frac{C_{in}(f_2) - C_{in}(f_1)}{K_V(f_2) - K_V(f_1)}; \\ C_{gs} = C_{in}(f_1) - \frac{C_{in}(f_2) - C_{in}(f_1)}{K_V(f_2) - K_V(f_1)}(1 + K_V(f_1)). \end{cases} \quad (20)$$

### Экспериментальные исследования тестового образца

В данной работе проведено исследование GaN полевого транзистора, изготовленного на кремниевой подложке, с длиной и шириной затвора  $L_g = 0,25$  мкм,  $W = 160$  мкм ( $2 \times 80$  мкм) соответственно (рис. 3).

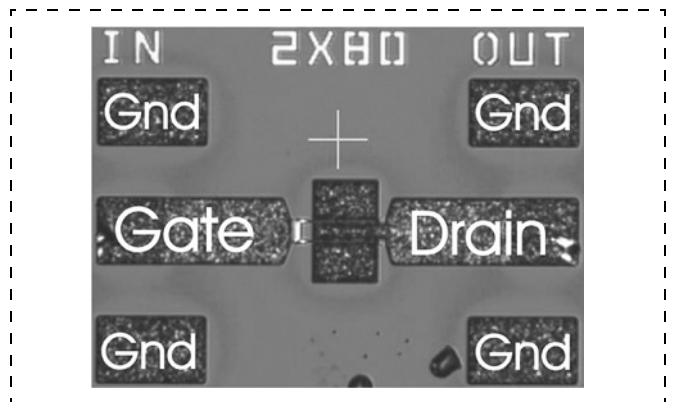


Рис. 3. Топология GaN полевого транзистора ( $L_g = 0,25$  мкм,  $W = 160$  мкм ( $2 \times 80$  мкм),  $L_{gs} = 2,0$  мкм,  $L_{gd} = 4,0$  мкм)



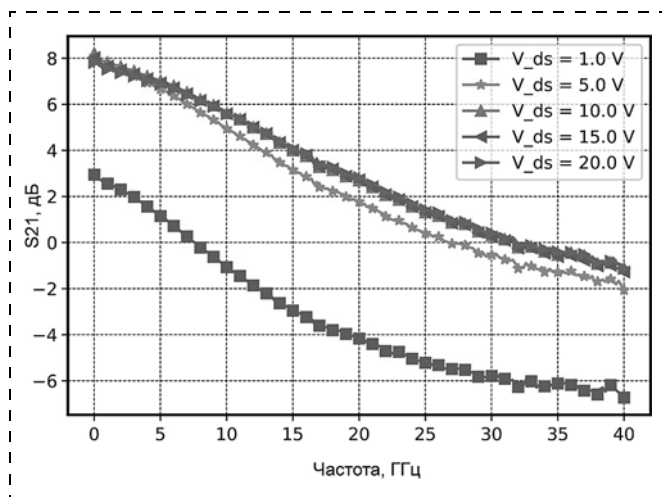


Рис. 4. Зависимости параметра  $S_{21}$  от частоты при напряжении на затворе  $V_{gs} = -3,0$  В

Для проведения экспериментальных исследований кристалл с транзистором смонтирован на печатную плату (см. рис. 5). На первом этапе проводили измерения  $S$ -параметров. Геометрия контактных площадок позволяет проводить измерения  $S$ -параметров непосредственно на кристалле с использованием СВЧ зондов (см. рис. 3). После этого исток и сток транзистора соединяли проволоочными выводами с копланарными линиями передачи для проведения измерений методом время-импульсной рефлектометрии. Все измерения выполняли при работе транзистора в непрерывном режиме. Зависимости параметра  $S_{21}$  от частоты для различных значений напряжения на стоке транзистора приведена на рис. 4.

Как отмечалось выше, кристалл с транзистором смонтирован на печатную плату и располагается между двумя 50-омными копланарными линиями (рис. 5).

На указанной печатной плате затвор и сток транзистора соединены проволоочками с копланарными линиями. Затвор соединен с нижней линией, сток — с верхней. Методика измерений, примененная в данной работе, описана в работах [1–4]. Параметры транзистора измерены для рабочих точек в пологой области:  $V_{ds} = 1,0 \dots 20,0$  В,  $V_{gs} = -3,0$  В. Длительность фронта входного импульса на затворе транзистора составляла 23 пс, что позволяло проводить измерения входной емкости в гигагерцовом диапазоне.

На рис. 6 приведена схема включения транзистора с элементами из-

мерительного оборудования, обеспечивающими необходимый режим работы транзистора, гальваническую развязку и защиту от перегрузок входов рефлектометра при измерении входной емкости.

Входная емкость, определяемая по отраженному сигналу, включает следующие величины:

$$C_{in} = C_{gs} + (1 + K_V) C_{gd}, \quad (21)$$

где  $C_{gs}$  — емкость затвор—исток;  $C_{gd}$  — емкость затвор—сток;  $K_V$  — коэффициент усиления по напряжению на нагрузке  $R_L/2 = 25$  Ом.

На рис. 7 приведены рефлектограммы отраженного и проходного сигналов при измерении входной емкости  $C_{in}$  и передаточной проводимости транзистора  $g$ .

Значение входной емкости определено с помощью выражения

$$C_{in} = -\frac{2}{R_L V_{in}} \int_{T_1}^{T_2} V_{refl} dt, \quad (22)$$

где  $T_1$ – $T_2$  — временной интервал интегрирования (серая область на рис. 7),  $V_{in}$  — амплитуда входного сигнала,  $V_{in} = 200$  мВ;  $V_{refl}$  — отраженный сигнал;  $R_L = 50$  Ом.

Передаточную проводимость транзистора в выбранной рабочей точке можно определить, зная амплитуды выходного и входного сигналов. Для исследуемого транзистора  $V_{out} = 126,5$  мВ и  $V_{in} = 200$  мВ. Для схемы включения транзистора, приведенной на

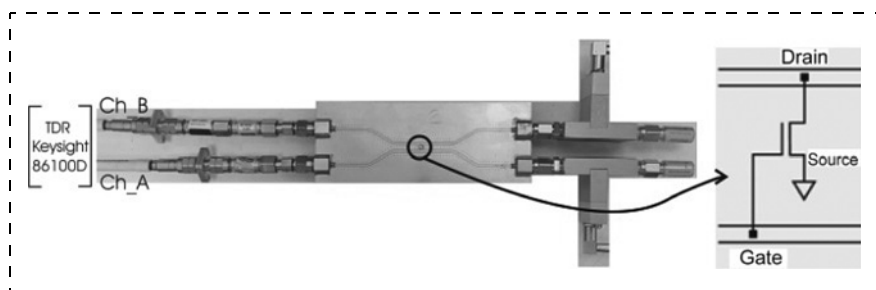


Рис. 5. Печатная плата и схема включения транзистора при измерении входной емкости  $C_{in}$  методом времяимпульсной рефлектометрии

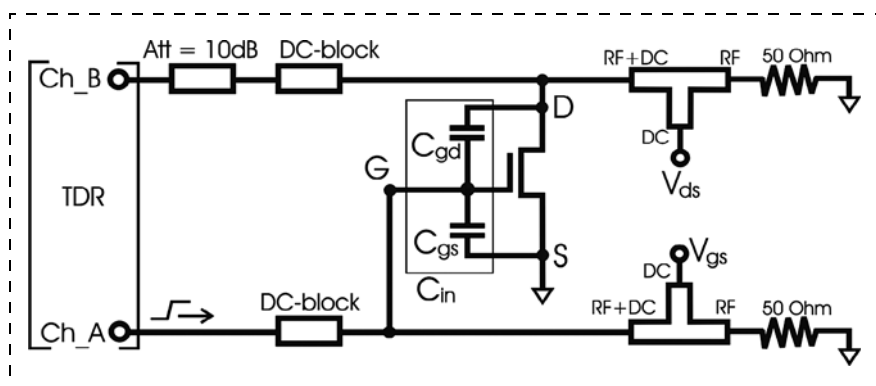


Рис. 6. Схема включения транзистора при измерении входной емкости методом времяимпульсной рефлектометрии

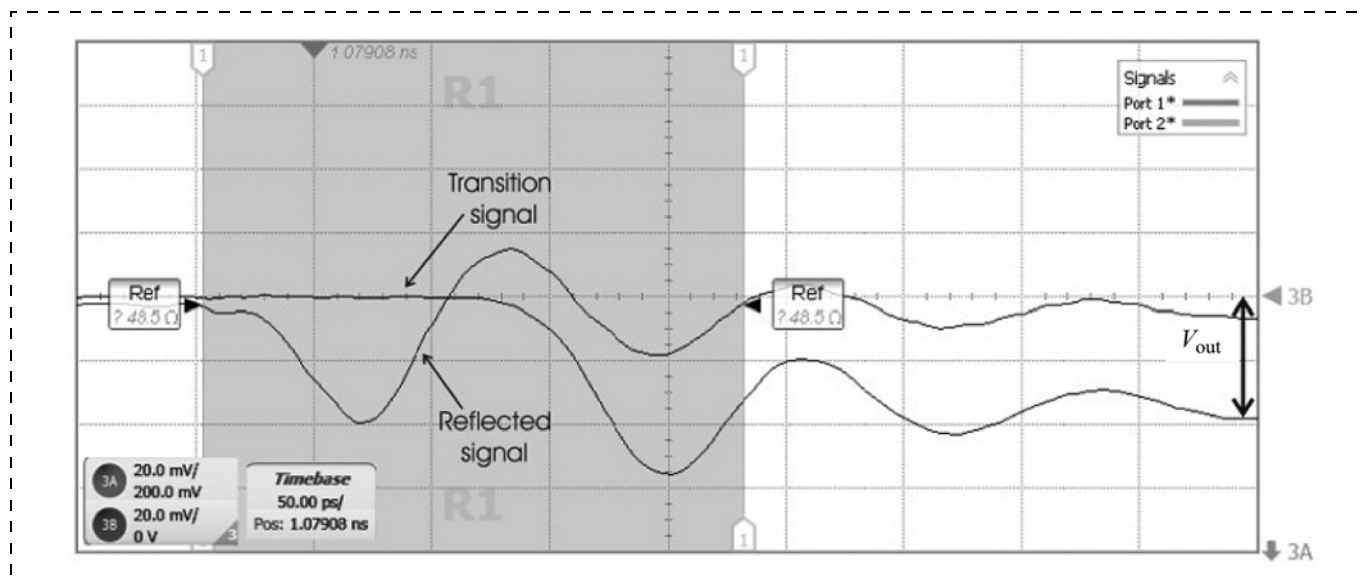


Рис. 7. Рефлектограммы отраженного и проходного сигналов при измерении входной емкости  $C_{in}$  и передаточной проводимости  $g$  исследуемого транзистора

рис. 6, передаточная проводимость определяется с помощью следующего аналитического выражения:

$$g = \frac{V_{out}}{\left(\frac{R_L}{2}\right) V_{in}}. \quad (23)$$

Измеренное значение для передаточной проводимости применено в выражении (15) для определения входной емкости на основе измеренных  $S$ -параметров. Входная емкость как функция от напряжения сток—исток, рассчитанная с использованием измеренного параметра  $S_{21}$  (на частоте 15 ГГц), и измеренная с помощью метода времяимпульсной рефлектометрии приведены на рис. 8.

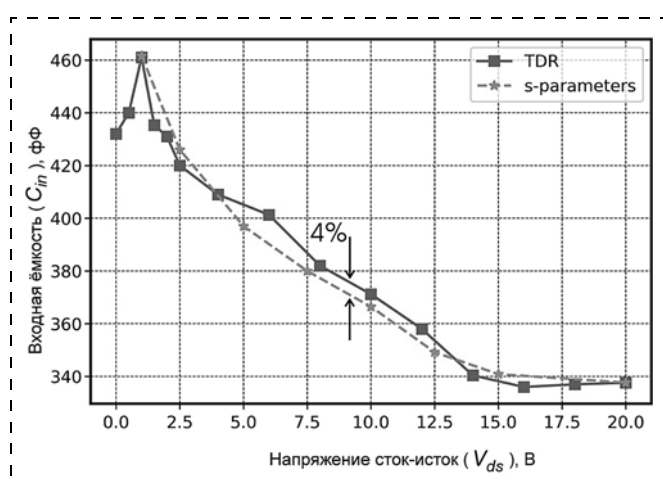


Рис. 8. Зависимость входной емкости от напряжения на стоке ( $V_{ds}$ ), рассчитанная с использованием измеренного параметра  $S_{21}$  (на частоте 15 ГГц) и метода времяимпульсной рефлектометрии (напряжение на затворе  $V_{gs} = -3,0$  В)

Из рис. 8 видно, что результаты, полученные разными методами, показывают хорошее совпадение (расхождение не превышает 4 %). Необходимо отметить, что с увеличением напряжения на стоке примерно до 15 В входная емкость существенно уменьшается от 460 до 340 фФ, далее до 20,0 В практически не меняется.

## Заключение

Авторы предложили оригинальную методику для экстракции значения емкости затвора полевого транзистора на основе измерения  $S$ -параметров. В данной работе приведены аналитические выражения для входной емкости, емкостей затвор—сток и затвор—исток как функций передаточной характеристики матрицы рассеяния —  $S_{21}$ .

В соответствии с предложенной методикой проведены экспериментальные исследования полевого GaN транзистора. Представлена зависимость входной емкости как функции от напряжения сток—исток (1,0...20,0 В) на частоте 15,0 ГГц.

Установлено, что с увеличением напряжения на стоке примерно до 15 В входная емкость существенно уменьшается от 460 до 340 фФ, затем, с увеличением напряжения до 20,0 В, изменения значения емкости практически не наблюдается.

Проведено сравнение результатов, полученных с применением предложенной методики и с помощью метода экспериментального исследования времяимпульсной рефлектометрии. Отмечено хорошее совпадение результатов (расхождение не превышает 4 %).

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00521-П).*

## Список литературы

1. Уолкер Дж., Фармикоун Г., Боуери Ф., Баталья Бр. Д. GaN-транзистор Integra Technologies с выходной мощностью 1 кВт для радарных применений S-диапазона (Пер.: С. Дидилев) // Компоненты и технологии. № 1. 2014. С. 84–87.
2. Тимошенко В. П., Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Пантелеев А. И. Исследования влияния элементов конструкции мощных СВЧ GaN-транзисторов на их тепловой режим // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 8. С. 415–421.

3. Belkacemi K., Hocine R. Efficient 3D-Modeling and Simulation for the Thermal Management of Microwave AlGaIn/GaN HEMT Used in High Power Amplifiers SSPA // Journal of Low Power Electronics and Applications. 2018. Vol. 23. N. 8. P. 1–19. DOI: 10.3390/jlpea8030023.

4. Шелудяк Ю., Кашпоров Л., Малинин Л., Цалков В. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник. М.: НПО информ, 1992. 29 с.

5. Timoshenkov V., Khlybov A., Rodionov D., Panteleev A. Thermal Phenomena Research in RF GaN Dies // Proc. of the 2020 IEEE Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2020 ElConRus), 27–30 Jan., 2020. P. 2327–2330.

**Yu. A. Chaplygin**, Professor, Academician RAS, **V. V. Losev**, Professor, dsd@miee.ru, **A. I. Khlybov**, Ph. D., Senior Engineer, alex1818@yandex.ru, **D. V. Rodionov**, Senior Engineer, denis.rodionov@gmail.com, **E. Yu. Kotlyarov**, Graduate Student, ekotlyarov86@gmail.com, **N. V. Guminov**, Senior Engineer, gummi.qdn@gmail.com, National Research University of Electronic Technology, Moscow

*Corresponding author:*

**Denis V. Rodionov**, Senior Engineer, National Research University of Electronic Technology, Moscow  
E-mail: denis.rodionov@gmail.com

## The Extraction Methodic for GaN Field Transistor input Gate Capacitance in GHz Band

Received on May 04, 2023

Accepted on June 02, 2023

*Authors propose new methodic for GaN field transistor input gate capacitance extraction based high-frequency S-parameters measurement and transmission line theory. Input gate capacitance was determined for GaN device ( $L_g = 0.25 \text{ mkm}$ ,  $W = 160 \text{ mkm}$ ) using proposed methodic for different operating modes at GHz band. This paper contains the dependences of the input capacitance as function of drain voltage (1.0–20.0 V) at 15.0 GHz for  $V_{gs} = -3.0 \text{ V}$ . It was pointed that input capacitance is decreasing: 460 fF to 340 fF. This capacitance was measured using time-domain reflectometry approach in the same operating modes. Measured results were compared.*

**Keywords:** RF, GaN, HEMT, S-parameters, time-domain reflectometry, GHz, transistor input capacitance, gate-source capacitance, gate-drain capacitance

*For citation:*

**Chaplygin Yu. A., Losev V. V., Khlybov A. I., Rodionov D. V., Kotlyarov E. Yu., Guminov N. V.** The Extraction Methodic for GaN Field Transistor input Gate Capacitance in GHz Band, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 229–234.

DOI: 10.17587/nmst.25.229-234

## References

1. Walkker J., Formicome G., Boueri F., Battaglia B. D. GaN-transistor Integra Technologies s vyhodnoy moshnost'yu 1 kVt dlya radarnyh primeneniye S-diapazona, *Komponenty i tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 84–87 (in Russian).
2. Timoshenkov V. P., Khlybov A. I., Rodionov D. V., Panteleev A. I. Issledovaniya vliyaniya elementov konstruktssii moshnykh SVCh GaN-transistorov na ih templovoy regim, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 8, pp. 415–421 (in Russian).
3. Belkacemi K., Hocine R. Efficient 3D-Modeling and Simulation for the Thermal Management of Microwave AlGaIn/GaN

HEMT Used in High Power Amplifiers SSPA, *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 2018, vol. 8, no. 23, pp. 1–19; doi: 10.3390/jlpea8030023.

4. Sheludyk U. E., Kashporov L. Ya. Teplofizicheskie svoystva komponentov goruchih sistem. Spravochnik. Moscow, NPO Inform TEI, 1992, 29 p. (in Russian).

5. Timoshenkov V. P., Khlybov A. I., Rodionov D. V., Panteleev A. I. Thermal Phenomena Research in RF GaN Dies, *Proceedings of the 2020 IEEE Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2020 ElConRus)*, 27–30 Jan., 2020, pp. 2327–2330.

**А. А. Галкин**<sup>1, 2</sup>, аспирант, инженер, e-mail: alexgalkin.jr@gmail.com,  
**Е. С. Кочурина**<sup>1, 2</sup>, канд. техн. наук, гл. метролог, e-mail: ekochurina@mp-lab.ru,  
**С. П. Тимошенко**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор, e-mail: spt@miee.ru, **П. В. Еркин**<sup>1, 2</sup>, аспирант, инженер, e-mail: erkin.p.99@gmail.com, **А. С. Тимошенко**<sup>1, 2</sup>, д-р техн. наук, ген. директор, e-mail: at@mp-lab.ru, **А. В. Михеев**<sup>2</sup>, технический директор, e-mail: am@mp-lab.ru,  
**А. М. Родин**<sup>2</sup>, инженер, e-mail: arodin@mp-lab.ru,

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", Москва,

<sup>2</sup> ООО "Лаборатория Микроприборов", Москва

## КАЛИБРОВКА ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ МЭМС

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

*Рассмотрен метод калибровки инерциального модуля на МЭМС-датчиках промышленного класса точности. Рассмотрены погрешности инерциальных датчиков, приведены грубые и точные методы калибровки инерциальных МЭМС, показаны результаты калибровки инерциального измерительного модуля на основе МЭМС ГКВ-1 OEM.*

**Ключевые слова:** инерциальный измерительный модуль, МЭМС, ускорение, угловая скорость, испытательный стенд, калибровка, погрешности инерциальных измерительных модулей

Инерциальные датчики, такие как гироскопы и акселерометры, уже более ста лет применяют при разработке устройств и систем, связанных с определением положения объектов в пространстве, управлением движением, стабилизацией и навигацией.

Естественно, как и любые измерительные устройства, инерциальные датчики имеют погрешность измеряемой величины. Эти погрешности подразделяют на случайные и систематические.

Случайные погрешности возникают вследствие механических и электрических шумов датчика и определяют случайный дрейф сигнала датчика.

По уровню случайной погрешности инерциальные датчики подразделяют на несколько классов точности (табл. 1) [1–3].

Что касается систематической погрешности, она определяется неидеальностью изготовления датчика и изменением свойств материалов чувствительных элементов под воздействием внешних факторов (например, при изменении температуры).

К систематическим погрешностям инерциальных датчиков можно отнести:

- перекрестные влияния;
- смещение нуля;
- нелинейность передаточной характеристики;
- изменение нулевого сигнала и масштабного коэффициента в диапазоне температур;
- неортогональность чувствительных осей (для двух- и трехосевых датчиков).

Систематические погрешности предсказуемы, они могут быть скомпенсированы с помощью калибровки.

Многолетние исследования и разработки в области инерциальных сенсоров привели к созданию мно-

жества разнообразных конструкций датчиков [4]. Работа некоторых из них, таких как кольцевые лазерные или волоконно-оптические гироскопы, основана на эффекте Саньяка. Другие используют инерционные свойства подвижной массы. Этот подход используется как в классических гироскопах, так и в МЭМС, получивших распространение с развитием технологий микроэлектроники и микросистемной техники. Основными преимуществами МЭМС являются их миниатюрность, стойкость к внешним воздействиям, а также технологическая масштабируемость, позволяющая снизить стоимость одного датчика.

Современный уровень развития технологий позволяет изготавливать серийные микромеханические датчики потребительского, промышленного и тактического классов точности [1].

Погрешности инерциальных МЭМС зависят от используемых материалов, погрешности технологий изготовления, а также конструктивных особенностей чувствительного элемента [5]. Уменьшить значение

Таблица 1  
Классы точности инерциальных датчиков [1–3]

Класс точности	Дрейф гироскопа, °/ч	Дрейф акселерометра, mg
Потребительский	> 1°/с	> 50
Автомобильный	1...10	1...3
Промышленный	0,01...1	~1
Тактический	0,01	25 µg
Навигационный	0,001	1 µg
Стратегический		

систематической ошибки можно, сопоставив серию эталонных инерциальных воздействий в диапазоне измерений датчика с его показаниями, а затем скомпенсировав расхождение программными методами.

По соотношению эталонных значений и показаний датчика можно составить зависимость:

$$X_{\text{эталон}} = f(X_{\text{датч}}). \quad (1)$$

Данную зависимость можно представить в виде полинома  $n$ -й степени, в общем виде имеющего следующий вид:

$$X_{\text{эталон}} = bX_{\text{датч}}^0 + kX_{\text{датч}}^1 + k_{x2}X_{\text{датч}}^2 + \dots + k_{xn}X_{\text{датч}}^n, \quad (2)$$

где  $b$  — смещение нуля;  $k$  — масштабный коэффициент;  $k_{x2} \dots k_{xn}$  — коэффициенты нелинейности передаточной характеристики. Определение данных коэффициентов является задачей калибровки.

Калибровку инерциальных систем можно условно разделить на калибровку с использованием грубых и использованием точных стендов [6].

Простейшими способами определения масштабных коэффициентов и значений смещения нуля акселерометров (диапазоном измерения от  $\pm 1$  g до  $\pm 10$  g) является калибровка в поле тяжести Земли. Для определения этих величин при калибровке одноосевого акселерометра достаточно измерить показания датчика в двух положениях: при оси прибора, сонаправленной с вектором силы тяжести, и при оси прибора, противоположно направленной с вектором силы тяжести. Отсюда получаем простую систему уравнений, из которой вычисляем значения масштабного коэффициента и смещения нуля.

$$\begin{aligned} kX_{\text{датч}} + b &= 1g; \\ kX_{\text{датч}} + b &= -1g. \end{aligned} \quad (3)$$

Что касается датчиков угловой скорости (ДУС), использование для их калибровки поля вектора вращения Земли нецелесообразно, поскольку диапазон измерения большинства ДУС превосходит данное значение на несколько порядков. Поэтому простейшим методом калибровки одноосевого ДУС является списание смещения нуля  $b$  по записи в статическом положении при оси чувствительности, перпендикулярной вектору вращения Земли.

После чего проводим запись показаний прибора в процессе поворота его на известный угол, например  $\alpha = 90^\circ$ . По записи вычисляем интеграл, который показывает значение угла поворота  $\Omega$  в единицах показаний прибора:

$$\Omega = \int_0^b (\omega - b) dt. \quad (4)$$

Отсюда масштабный коэффициент ДУС равняется:

$$K = \frac{\Omega}{\alpha}. \quad (5)$$

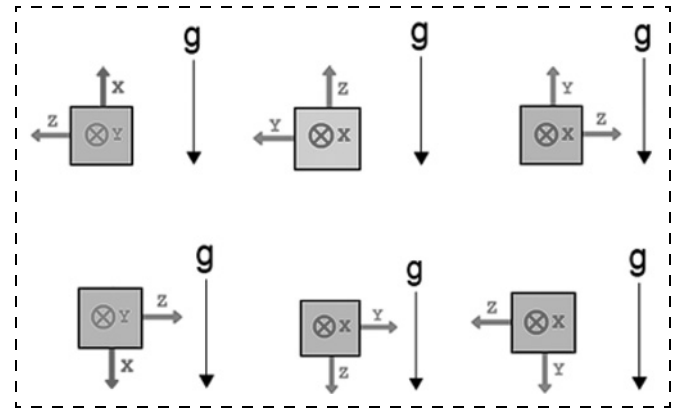


Рис. 1. Положения для калибровки акселерометра по шести точкам

Данный метод является грубым и позволяет вычислить только смещение нуля и масштабный коэффициент.

Для трехосевых акселерометров простейшая калибровка в поле тяжести Земли заключается в задании шести положений — сонаправленное и противоположно направленное вектору  $g$  для каждой оси измерения (рис. 1).

В этом случае необходимо вычислить матрицу приведения осей к ортонормированному базису  $4 \times 4$ , включающую матрицу направляющих косинусов  $3 \times 3$  и вектор смещений нуля  $3 \times 1$ .

Таким образом для шести положений имеем следующие вводные:

$$r = \begin{bmatrix} rx1 & rx2 & rx3 & rx4 & rx5 & rx6 \\ ry1 & ry2 & ry3 & ry4 & ry5 & ry6 \\ rz1 & rz2 & rz3 & rz4 & rz5 & rz6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ — матрица измеренных значений по осям XYZ для шести положений; } \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ — матрица эталонных значений для каждого из шести положений. } \quad (7)$$

Отсюда калибровочная матрица вычисляется как

$$A = R \cdot r^+. \quad (8)$$

И имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} a11 & a12 & a13 & b1 \\ a21 & a22 & a23 & b2 \\ a31 & a32 & a33 & b3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Этот же принцип применим для любого числа измерений при известных эталонных значениях ускорения.

Для компенсации перекрестных воздействий и нелинейности передаточной характеристики использу-



ют прецизионные стенды, способные задавать точные положения в пространстве и эталонные значения угловых скоростей. Наиболее совершенные из таких стендов позволяют проводить калибровку в нескольких температурных точках. В этом случае калибровка в каждой температурной точке, как ДУС, так и акселерометров проводят с использованием матриц  $\Gamma$  и  $R$ .

Прямые измерения с датчиков обычно передаются в цифровые устройства в формате кодов АЦП. Матрица  $A$  описывает переход от кодов АЦП к единицам измерения.

По вычисленной матрице  $A$  можно проводить программную обработку сигналов датчиков в режиме реального времени. Цепь преобразования сигнала представлена на рис. 2.

В данной схеме учитывается компенсация неортогональности осей, смещения нуля, нелинейности передаточной характеристики, а также влияние температуры на эти параметры (матрицы калибровки канала датчиков угловых скоростей  $A_\omega$  и канала измерения ускорения  $A_a$  являются функциями температуры).

Рассмотрим перевод данных из кодов АЦП в единицы измерения.

Соотношение истинного входного значения и выходного сигнала датчика в целочисленном формате можно представить в виде:

$$X_{ADC} = b_x + K_x a_x + K_y a_y + K_z a_z + K_{x2} a_x^2 + K_{x3} a_x^3; \quad (10)$$

$$Y_{ADC} = b_y + K'_x a_x + K'_y a_y + K'_z a_z + K_{y2} a_y^2 + K_{y3} a_y^3; \quad (11)$$

$$Z_{ADC} = b_z + K''_x a_x + K''_y a_y + K''_z a_z + K_{z2} a_z^2 + K_{z3} a_z^3. \quad (12)$$

В матричном виде уравнение имеет вид:

$$\bar{a}_{ADC} = \bar{b} + \bar{K} \bar{a} + \bar{K}_2 \bar{a}_2 + \bar{K}_3 \bar{a}_3. \quad (13)$$

Здесь входные воздействия и выходные значения представлены в векторном виде:

$$\bar{a}_{ADC} = \begin{bmatrix} X_{ADC} \\ Y_{ADC} \\ Z_{ADC} \end{bmatrix} \text{ — вектор прямых измерений с датчика}$$

в кодах АЦП;

$$\bar{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \text{ — вектор смещений нулевого сигнала в едини-$$

цах измерения датчика;

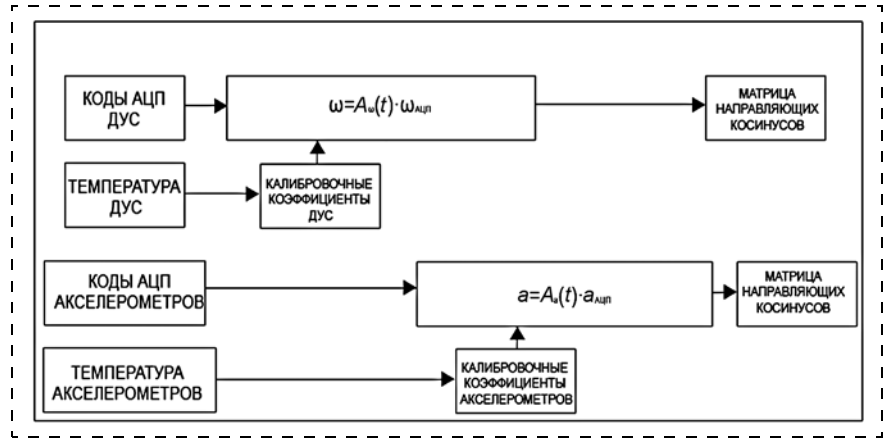


Рис. 2. Схема обработки сигналов датчиков для получения калиброванных значений

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \text{ — вектор эталонных значений инерциальных}$$

воздействий;

$$\bar{a}_2 = \begin{bmatrix} a_x^2 \\ a_y^2 \\ a_z^2 \end{bmatrix} \text{ — вектор квадратов эталонных значений}$$

инерциальных воздействий;

$$\bar{a}_3 = \begin{bmatrix} a_x^3 \\ a_y^3 \\ a_z^3 \end{bmatrix} \text{ — вектор 3-й степени эталонных значений}$$

инерциальных воздействий;

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_x & K'_x & K''_x \\ K_y & K'_y & K''_y \\ K_z & K'_z & K''_z \end{bmatrix} \text{ — матрица нормирования и доворота}$$

от эталонных осей прибора к осям датчиков;

$\bar{K}_2 = [K_{x2} \ K_{y2} \ K_{z2}]$  — вектор коэффициентов для квадратичной составляющей;

$\bar{K}_3 = [K_{x3} \ K_{y3} \ K_{z3}]$  — вектор коэффициентов для кубической составляющей.

Из этого уравнения можно выразить вектор эталонных значений:

$$\bar{a} = \bar{K}^{-1} (\bar{a}_{ADC} - \bar{b} - \bar{K}_2 \bar{a}_2 - \bar{K}_3 \bar{a}_3). \quad (14)$$

Таким образом, задача калибровки сводится к нахождению матрицы  $\bar{K}^{-1}$ , а также векторов  $\bar{b}$ ,  $\bar{K}_2$  и  $\bar{K}_3$ .

Эти переменные также имеют зависимость от температуры, которую, аппроксимируя полиномом четвертой степени, можно представить в виде:

$$K_x(T) = K_{x00} + K_{x01}T + K_{x02}T^2 + K_{x03}T^3 + K_{x04}T^4; \quad (15)$$

$$K_y(T) = K_{y00} + K_{y01}T + K_{y02}T^2 + K_{y03}T^3 + K_{y04}T^4; \quad (16)$$

$$K_z(T) = K_{z00} + K_{z01}T + K_{z02}T^2 + K_{z03}T^3 + K_{z04}T^4; \quad (17)$$

$$K'_x(T) = K_{x10} + K_{x11}T + K_{x12}T^2 + K_{x13}T^3 + K_{x14}T^4; \quad (18)$$

$$K'_y(T) = K_{y10} + K_{y11}T + K_{y12}T^2 + K_{y13}T^3 + K_{y14}T^4; \quad (19)$$

$$K'_z(T) = K_{z10} + K_{z11}T + K_{z12}T^2 + K_{z13}T^3 + K_{z14}T^4; \quad (20)$$

$$K''_x(t) = K_{x20} + K_{x21}T + K_{x22}T^2 + K_{x23}T^3 + K_{x24}T^4; \quad (21)$$

$$K''_y(t) = K_{y20} + K_{y21}T + K_{y22}T^2 + K_{y23}T^3 + K_{y24}T^4; \quad (22)$$

$$K''_z(t) = K_{z20} + K_{z21}T + K_{z22}T^2 + K_{z23}T^3 + K_{z24}T^4; \quad (23)$$

где  $T$  — значение температуры;  $K$  — температурные коэффициенты.

Аналогичным образом задаются температурные зависимости для векторов  $\vec{b}$ ,  $\vec{K}_2$  и  $\vec{K}_3$ .

Для получения температурных коэффициентов необходимо задать идентичные эталонные инерциальные воздействия на устройство в нескольких температурных точках.

Рассмотрим процесс калибровки инерциального модуля ГКВ-1 OEM, разработанного ООО "ЛМП" (рис. 3), на трехосном поворотном стенде. Модуль включает в себя три оси канала измерения угловых скоростей (диапазон измерения  $\pm 200$  °/с) и три оси канала измерения ускорения (диапазон измерения  $\pm 10$  g) промышленного класса точности с номинальным дрейфом нуля  $10$  °/ч для ДУС и  $1$  mg для акселерометров.

В состав стенда для проведения калибровки входят (рис. 4):

- трехосный поворотный стол с камерой тепла/холода для задания эталонных инерциальных воздействий при различных температурах;
- плата с контактирующим устройством для установки инерциального модуля;
- преобразователь интерфейсов UART-USB;
- источник питания;
- ПК для управления поворотным столом и записи данных с инерциального модуля.

Калибровку по каналу ускорений в поле тяжести Земли проводят в соответствии со значением  $g$  в точке установки поворотного стола. Это значение составля-

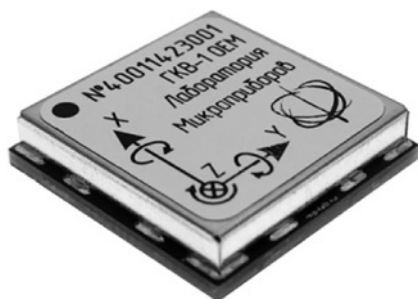


Рис. 3. Инерциальный модуль ГКВ-1 OEM

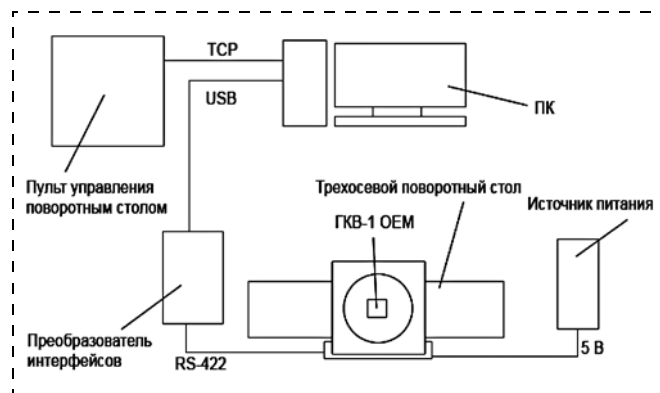


Рис. 4. Схема стенда калибровки инерциального модуля



Рис. 5. Фотография типового трехосного стенда с указанием осей поворотного стола

ет  $9,81523 \text{ м/с}^2$ . Калибровочные данные записываются при наклоне поворотного стола на фиксированные углы по осям  $X$  и  $Y$  для задания проекции ускорения свободного падения на оси чувствительности акселерометра.

Для компенсации нелинейности на данном отрезке были выбраны углы наклона  $[45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ]$  по каждой из осей (с исключением дублирующих положений), что позволяет задать для каждой оси чувствительности 26 положений в диапазоне  $\pm 1$  g. Такое число положений, распределенное по диапазону, позволяет аппроксимировать передаточную характеристику полиномом третьей степени. Типовой трехосный поворотный стенд с указанием осей изображен на рис. 5.

Перечисленные положения могут быть использованы и для калибровки по каналу угловых скоростей. В этом случае внешняя ось поворотного стола задает фиксированную угловую скорость, равную диапазону измерений ДУС. Средняя и внутренняя оси меняют положения от  $0$  до  $360^\circ$  с шагом  $45^\circ$ . Таким образом

даже при одной скорости вращения, равной диапазону измерения ДУС, можно получить 26 проекций на каждую ось ДУС, распределенных по диапазону измерения.

Для температурной динамической калибровки необходимо провести запись данных для перечисленных положений и вращений в нескольких температурных точках во всем диапазоне температур. Для калибровки температурных отклонений удобно выбрать температурные точки в диапазоне от  $-50$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  с шагом в  $20^{\circ}\text{C}$ .

Согласно описанной методике, была проведена калибровка инерциального модуля ГKB-1 OEM.

Рассмотрим изменения характеристик канала измерений угловой скорости и канала измерений ускорений до и после калибровки. На рис. 6 (см. третью сторону обложки) показаны нелинейности передаточной характеристики канала измерений угловой скорости и канала измерений ускорений до и после калибровки.

По графикам видно, что нелинейность характеристики датчиков канала измерения угловых скоростей уменьшилась в 20 раз, датчиков канала измерения ускорений — в 4 раза.

После калибровки была проведена запись статического сигнала датчиков в диапазоне рабочих температур. На рис. 7 (см. третью сторону обложки) показаны изменения нулевого сигнала датчиков канала измерения угловых скоростей и датчиков канала измерения ускорений (для удобства из графика оси Z вычтено значение 1 g) в диапазоне температур от  $-40$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ .

По графикам на рис. 7 видно, что дрейф смещения нуля канала измерения угловых скоростей в диапазоне температур  $-40...+85^{\circ}\text{C}$  до калибровки составляет  $\pm 1300^{\circ}/\text{ч}$ , после калибровки —  $\pm 45^{\circ}/\text{ч}$ ; смещение нуля датчиков канала измерения ускорений в диапазоне температур  $-40...+85^{\circ}\text{C}$  до калибровки составляет  $\pm 13\text{ mg}$ , после —  $\pm 1\text{ mg}$ . Таким образом, введение калибровки позволяет повысить стабильность сигналов датчиков инерциального модуля.

Изменение уровня погрешности в результате калибровки показано в табл. 2.

По табл. 2 видно, что отклонение передаточной характеристики датчиков канала измерений угловой скорости от линейной аппроксимации в НКУ после калибровки уменьшилось в 15–20 раз; отклонение передаточной характеристики датчиков канала измерений ускорений от линейной аппроксимации в НКУ после калибровки — в 4–6 раз; изменение нулевого сигнала датчиков канала измерений угловой скорости в диапазоне температур — в 20–50 раз; изменение нулевого сигнала датчиков канала измерений ускорений в диапазоне температур — в 10–80 раз.

Заключение

Погрешности МЭМС-датчиков, на основе которых разрабатывают инерциальные измерительные модули, зависят от используемых материалов и погрешностей технологий изготовления. Калибровка позволяет скомпенсировать систематические погрешности датчиков. В работе предлагается методика калибровки инерциального измерительного модуля на трехосном поворотном стенде. Приведена схема стенда и дано описание процесса проведения калибровки в нормальных условиях и в диапазоне температур. Показаны результаты измерений канала угловой скорости и канала ускорений до и после калибровки. Установлено, что отклонение передаточной характеристики датчиков канала измерений угловой скорости от линейной аппроксимации в НКУ после калибровки уменьшилось в ~20 раз; отклонение передаточной характеристики датчиков канала измерений ускорений от линейной аппроксимации в НКУ после калибровки — в ~6 раз; изменение нулевого сигнала канала измерений угловой скорости в диапазоне температур — в ~50 раз; изменение нулевого сигнала канала измерений ускорений в диапазоне температур — в ~80 раз. Таким образом, предложенная методика позволила значительно изменить уровень погрешностей канала измерения угловых скоростей и канала измерения ускорений инерциального измерительного модуля ГKB-1 OEM.

Список литературы

1. Сысоева С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. 2014. № 6. С. 40–46.  
2. Сысоева С. С. Введение в High-End сегменты применений МЭМС-технологии. Ч. 1 // Компоненты и технологии. 2010. № 10. С. 15–22.

Таблица 2  
Изменение характеристик инерциального измерительного модуля ГKB-1 OEM в результате калибровки

Характеристика		Значения до калибровки	Значения после калибровки
Отклонение передаточной характеристики датчиков канала измерений угловой скорости от линейной аппроксимации в нормальных климатических условиях (НКУ), $^{\circ}/\text{ч}$	x	120	7
	y	180	9
	z	150	10
Отклонение передаточной характеристики датчиков канала измерений ускорений от линейной аппроксимации в НКУ, mg	x	3	0,7
	y	3	0,7
	z	0,2	0,03
Изменение нулевого сигнала датчиков канала измерений угловой скорости в диапазоне температур, $^{\circ}/\text{ч}$	x	600	40
	y	1300	25
	z	1200	45
Изменение сигнала датчиков канала измерений ускорений в покое в диапазоне температур, mg	x	9	0,9
	y	1	0,15
	z	12	0,15

3. Сысоева С. С. Введение в High-End сегменты применений МЭМС-технологии. Ч. 2 // Компоненты и технологии. 2010. № 11. С. 24—30.

4. Малеев П. И. Гироскопические чувствительные элементы: классификация и уровень развития // Навигация и гидрография. 2014. № 37. С. 18—28.

5. Вавилов В. Д., Тимошенко С. П., Тимошенко А. С. Микросистемные датчики физических величин. М.: Техносфера, 2018. 550 с.

6. Вавилова Н. Б., Васинева И. А., Голован А. А., и др. Калибровка в инерциальной навигации // Фундаментальная и прикладная математика. 2018. Т. 22, вып. 2, С. 89—115.

**A. A. Galkin**<sup>1, 2</sup>, Engineer, e-mail: alexgalkin.jr@gmail.com, **E. S. Kochurina**<sup>1, 2</sup>, Ph. D., Chief Metrologist, e-mail: ekochurina@mplab.ru, **S. P. Timoshenkov**<sup>1</sup>, D. Sc., Professor, e-mail: spt@miec.ru, **P. V. Erkin**<sup>2</sup>, Engineer, e-mail: erkin.p.99@gmail.com, **A. S. Timoshenkov**<sup>1, 2</sup>, D. Sc., General Director, e-mail: at@mp-lab.ru, **A. V. Miheev**<sup>2</sup>, Technical Director, e-mail: am@mp-lab.ru, **A. M. Rodin**<sup>2</sup>, Engineer, e-mail: arodin@mp-lab.ru

<sup>1</sup>National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, 1244298, Russian Federation

<sup>2</sup>LMD Ltd., Zelenograd, Moscow, 124527, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Aleksandr A. Galkin**, Engineer, LMD Ltd., Zelenograd, Moscow, 124527, Russian Federation, e-mail: alexgalkin.jr@gmail.com

## Industrial-grade MEMS IMU Calibration

*Received on March 20, 2023*

*Accepted on April 10, 2023*

*The paper is devoted to the development of the calibration method for MEMS-sensors based inertial measurement unit (IMU). The general purpose of this work was to create the industrial-grade MEMS IMU calibration method. The method was supposed to reduce the temperature instability of inertial sensors static signal to a level of 100 °/h for rate sensors and 1 mg of accelerometers.*

*The article provides a general description of the error types and accuracy classes of inertial sensors. The inertial sensors calibration principle using a known inertial impact series and the obtained dependence approximation by the  $n$ -th power polynomial is described too.*

*The calibration methods for single axis and triaxial accelerometers and rate sensors using low and high precision stands are considered.*

*Based on the considered materials, the digital inertial sensors calibration method using a triaxial high precision stand was developed. The method includes the ARS calibration over the entire measurement range and accelerometers calibration within the  $\pm 1$  g range.*

*The inertial module calibration experiment showed that the developed method allows achieving the required output signal stability level of the calibrated product over the temperature range.*

**Keywords:** IMU, MEMS, acceleration, rate, test bench, calibration, MEMS IMU errors

*For citation:*

**Galkin A. A., Kochurina E. S., Timoshenkov S. P., Erkin P. V., Timoshenkov A. S., Miheev A. V., Rodin A. M.** Industrial-Grade MEMS IMU Calibration, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 235—240.

DOI: 10.17587/nmst.25.235-240

## References

1. Sysoeva S. Tendencii rynka High-end MEMS-datchikov inercii. Noveye urovni harakteristik i ispolneniya, *Komponenty i tekhnologii*, 2014. vol. 6, pp. 40—46 (in Russian).

2. Sysoeva S. S. Vvedenie v High-End segmenty primeneniya MEMS-tekhnologii. Ch. 1, *Komponenty i tekhnologii*, 2010, vol. 10, pp. 15—22 (in Russian).

3. Sysoeva S. S. Vvedenie v High-End segmenty primeneniya MEMS-tekhnologii. Ch. 2, *Komponenty i tekhnologii*, 2010, vol. 11, pp. 24—30 (in Russian).

4. Maleev P. I. Giroskopicheskie chuvstvitel'nye elementy: klassifikatsiya i uroven' razvitiya, *Navigatsiya i gidrografiya*, 2014, vol. 37, pp. 18—28 (in Russian).

5. Vavilov V. D., Timoshenkov S. P., Timoshenkov A. S. Mikrosistemnye datchiki fizicheskikh velichin, Moscow, Tekhnosfera, 2018, 550 p. (in Russian).

6. Vavilova N. B., Vasilyova I. A., Golovan A. A., i dr. Kalibrovka v inercial'noy navigatsii, *Fundamental'naya i prikladnaya matematika*, 2018, vol. 22, is. 2, pp. 89—115 (in Russian).

**А. Н. Алёшин**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, a.n.aleshin@mail.ru,  
**К. Ю. Харитонов**<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент, kharitonova\_k@mirea.ru,  
**Н. В. Зенченко**<sup>1, 2</sup>, науч. сотрудник, zenchenko.nikolay@yandex.ru,  
**О. А. Рубан**<sup>1, 2</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, mux.05@mail.ru

<sup>1</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова  
 Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва

<sup>2</sup> МИРЭА — Российский технологический университет, Москва

## МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ В БИПОЛЯРНЫХ МЕМРИСТОРАХ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Поступила в редакцию 27.04.2023 г.

*Описаны различные механизмы формирования токопроводящего канала в биполярных мемристорах вакансионного и ионного типов: в первом случае благодаря зарождению и росту токопроводящих нитей, а во втором случае благодаря сегрегационным процессам с образованием пространственных ассоциаций ионов из материала активного электрода. Приведены вольт-амперные характеристики для мемристоров обоих типов и проведено сравнение особенностей конструкций этих мемристоров.*

**Ключевые слова:** мемристор, твердый электролит, аморфная матрица, агломерационные скопления, нанополости, оксиды переходных металлов

### Введение

Одним из возможных путей реализации искусственного интеллекта является воссоздание принципов работы биологического мозга с помощью электротехнических компонентов. Как в биологическом мозге основным элементом является синапс, так основным элементом нейроморфной платформы является мемристор. Это двухполюсник, способный изменять свое сопротивление в зависимости от протекшего через него электрического заряда [1–3]. Конструкция мемристора подразумевает широкую вариативность за счет материалов контактов и активного слоя. При этом изменение материала слоев приводит к значительным изменениям в электрофизических параметрах. В связи с этим выбор оптимальной конструкции мемристора является одной из приоритетных задач на пути реализации нейроморфной платформы. Одним из вариантов реализации подобной системы может явиться массив мемристоров. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) биполярного мемристора образует петлю гистерезиса, что лежит в основе использования данного электротехнического устройства в качестве ячейки с резистивной памятью. Разные ветви ВАХ соответствуют двум разным режимам работы мемристора: низкоомному состоянию (*Low resistance state* — *LRS*) и высокоомному (*High resistance state* *HRS*).

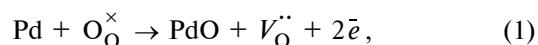
Поскольку нейроморфные системы на основе мемристоров все еще развиваются, то на сегодняшний день нет четких требований к характеристикам таких мемристоров и к материалам, из которых их изготавливают. В настоящее время есть как минимум два ос-

новных направления в технологии изготовления мемристоров: на основе твердых электролитов [4–6] и на основе оксидов переходных металлов [7–9].

Цель работы — сравнение механизма образования токопроводящих каналов (ТК) на основе твердых электролитов и оксидов переходных металлов.

### Исследование мемристоров на основе оксида гафния

Принцип работы мемристоров на основе оксида гафния заключается в образовании токопроводящего канала, образующегося за счет фазового превращения ( $\text{HfO}_2 \rightarrow \text{HfO}_{2-x}$ ). При протекании реакции окисления на аноде из палладия (Pd) формируются заряженные кислородные вакансии:



где  $\text{O}_\text{O}^\times$  — узловый анион кислорода (согласно представлениям Крёгера [10] изначально узловые катионы и анионы в решетке ионного кристалла находятся в нейтральном состоянии);  $V_\text{O}^\ddot{+}$  — положительно заряженная кислородная вакансия. Продукты этой реакции используются для формирования токопроводящей фазы  $\text{HfO}_{2-x}$ :



Кроме способности к окислению палладий обладает также способностью проявлять свойства катализатора, разлагая в силу хемосорбции молекулы ад-



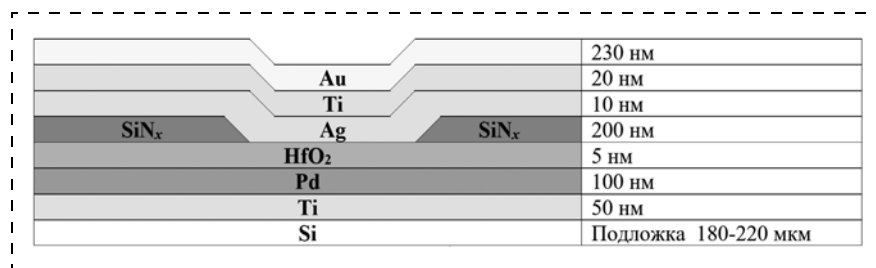
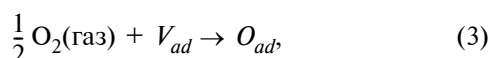
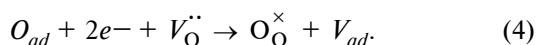


Рис. 1. Схема строения мемристоров на основе оксида гафния, изготовленных в ИСВЧПЭ РАН

сорбированного на ее поверхности газа. Согласно [11] хемосорбция молекул кислорода, находящихся в воздухе, протекает в соответствии со следующей реакцией:



где  $V_{ad}$  и  $O_{ad}$  — вакантное адсорбционное место в палладии и адсорбированный нейтральный атом (адатом) кислорода соответственно. В результате диффузии адатома кислорода в глубь электрода (происходящей преимущественно по границам зерен) на поверхности палладия остается вакантное адсорбционное место, а адатом кислорода, захватывая на своем пути электроны из зоны проводимости палладия, приобретает отрицательный заряд и далее путем рекомбинации с имеющейся в приповерхностной области положительно заряженной кислородной вакансией превращается в нейтральный узловой анион. В обозначениях Крёгера и Винка соответствующая реакция имеет следующий вид:



Таким образом, каталитические способности палладия приводят к вторичному окислению оксида гафния, т. е. к процессу замещения образованных в результате протекания реакции (2) кислородных вакансий ионами кислорода, резервуаром для которых является окружающая среда. При приложении к Pd электроду отрицательного напряжения скорость обмена адатома кислорода, имеющего два захваченных электрона с положительно заряженной кислородной вакансией, в силу законов электростатики возрастает.

Мемристоры на основе оксида гафния были изготовлены в ИСВЧПЭ РАН. Схема строения мемристоров приведена на рис. 1. Для исследования мемристоров предварительно была проведена электроформовка, которая заключалась в приложении кратковременного ( $\approx 10$  мс) отрицательного импульса (3 В) к верхнему электроду.

Для поиска оптимального режима работы мемристора проводили измерения ВАХ при различных частотах переключения. Был обнаружен необычный порядок переключения мемристора (рис. 2, см. четвертую сторону обложки), который можно объяснить тем, что при положительном напряжении на верх-

нем электроде токопроводящая фаза растет от нижнего электрода в направлении верхнего электрода, а при отрицательном напряжении на верхнем электроде рост токопроводящей фазы происходит от верхнего к нижнему электроду. Вероятнее всего это связано с высокой химической активностью элементов верхнего (Ag—Ti) и нижнего (Pd) электродов. Из симметричной формы ВАХ следует, что при положительном и при отрицательном напряже-

нии образуется одна и та же токопроводящая фаза.

При частотном эксперименте ВАХ мемристора снимали в диапазоне частот 0,6...20 кГц, полученные ВАХ приведены на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки). Из измеренных ВАХ было определено, что рабочий режим мемристора лежит в диапазоне частот 1...10 кГц. По ВАХ были определены значения HRS и LRS во всем диапазоне частот сопротивлений, значения представлены в таблице.

Из представленных результатов видно, что имеется зависимость HRS от частоты (рис. 4), при этом значение LRS меняется слабо. Слабое изменение LRS с частотой можно объяснить тем, что когда токопроводящий канал замкнут его сопротивление заметно меньше реактивного сопротивления емкостной части мемристора. Из рис. 1 видно, что помимо области с каналом проводимости существует также область, представляющая из себя конденсатор. В таком случае при подаче треугольного двухполярного сигнала будет присутствовать не только сопротивление самого канала мемристора, но и реактивное сопротивление емкостной части мемристора  $X$ , которое можно описать выражением:

$$X = \frac{1}{2\pi fC}, \quad (5)$$

где  $f$  — частота двухполярного треугольного сигнала;  $C$  — емкость мемристора. Очевидно, что представленный на рис. 4 график зависимости сопротивления HRS от частоты хорошо описывается выражением (5).

Можно сделать вывод, что наличие паразитной емкости крайне негативно сказывается на рабочих режимах мемристора на основе оксида гафния. Для расширения частотного диапазона работы мемристора не-

Значения сопротивлений LRS и HRS для мемристора на основе оксида гафния всего диапазона частот

Сопротивление, МОм	Частота, Гц							
	600	800	1k	2,5k	5k	7,5k	10k	20k
R LRS	3,35	2,1	2,17	3,17	2,68	3,17	2,91	3,10
R HRS	9,29	9,29	9,66	7,03	5,65	4,93	4,93	4,51

обходимо уменьшить область, создавшую паразитную емкость, за счет изменения топологии мемристора.

**Исследование мемристоров на основе твердых электролитов**

Были исследованы единственные на сегодняшний день промышленно изготавливаемые мемристоры (мемристоры на основе  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$  с самоформирующимся токопроводящим каналом (СФК) [4–6]) путем измерения ВАХ при различных частотах переключения. Конструкция такого мемристора представляет собой многослойную тонкопленочную композицию, состоящую из активного и вспомогательного слоев (рис. 5). В СФК-мемристоре токопроводящий канал (ТК), образующийся при подаче на серебряный анод положительного напряжения, состоит из перекрывающихся между собой агломераций ионов серебра, плотность которых в агломерации при дальнейшей работе мемристора изменяется, разрывая или вновь создавая устойчивые связывающие ионы серебра мостики. Агломерации ионов серебра (рис. 6) образуются вокруг изначально существующих в аморфной матрице димеров  $\text{Ge-Ge}$  двух атомов  $\text{Ge}$ , образующих устойчивую пространственную связь, повторяющуюся в пространстве кристалла. Процессу образования агломераций ионов серебра способствуют два обстоятельства: 1) способность к быстрой миграции  $\text{Ag}^+$  в аморфной матрице  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$  за счет определенной дефектности ее строения, что приближает механизм диффузии  $\text{Ag}^+$  к межузельному механизму диффузии в кристаллической решетке; 2) наличие в активном слое ионов  $\text{Sn}^+$  (попадающих благодаря создаваемому в мемристоре дополнительному слою  $\text{SnSe}$ ). При приложении положительного потенциала к верхнему серебряному электроду ионы  $\text{Sn}^+$  в силу законов дрейфа ионов в электрическом поле перемещаются из слоя  $\text{SnSe}$  в активный слой  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$ , в котором происходит их нейтрализация электронами, попадающими в твердый электролит из катода. При этом атомы  $\text{Sn}$ , располагающиеся в межатомных позициях аморфной матрицы, способствуют энергетически выгодной реакции замещения  $\text{Ge}$  на  $\text{Ag}$  в димере  $\text{Ge-Ge}$  (рис. 6, а) (при этом  $\text{Sn}$  выступает в качестве катализатора). Во время этой реакции аморфная структура  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$  искажается вследствие больших размеров атомов  $\text{Ag}$  ( $\text{Ag}$  уже находится в узле, а связь не является ионной), создавая в аморфной матрице нанополости (рис. 6, б). Эти нанополости можно рассматривать как центры агломерационных областей. Нанополости обеспечивают доступ других ионов  $\text{Ag}^+$  к участку  $\text{Ag-Ge}$ , что способствует образованию ряда агломерационных областей, из которых состоит ТК (рис. 6, в). Таким образом, добавление или удаление ионов  $\text{Ag}^+$  из мест агломерации изменяет сопротивление устройства [4, 5]. Полностью сформированный ТК соединяет верхний и нижний электроды, позволяя протекать электрическому току. Сопротивление ТК будет прямо зависеть от количества ионов серебра, перене-

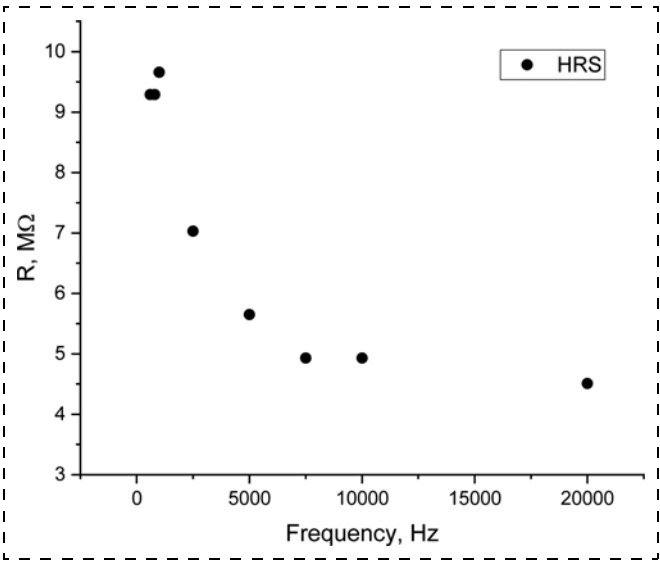


Рис. 4. Зависимость сопротивления HRS от частоты переключения

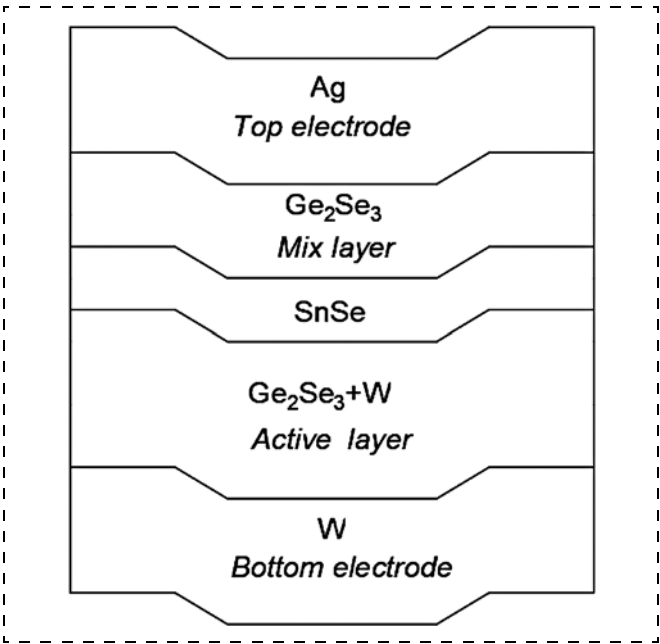
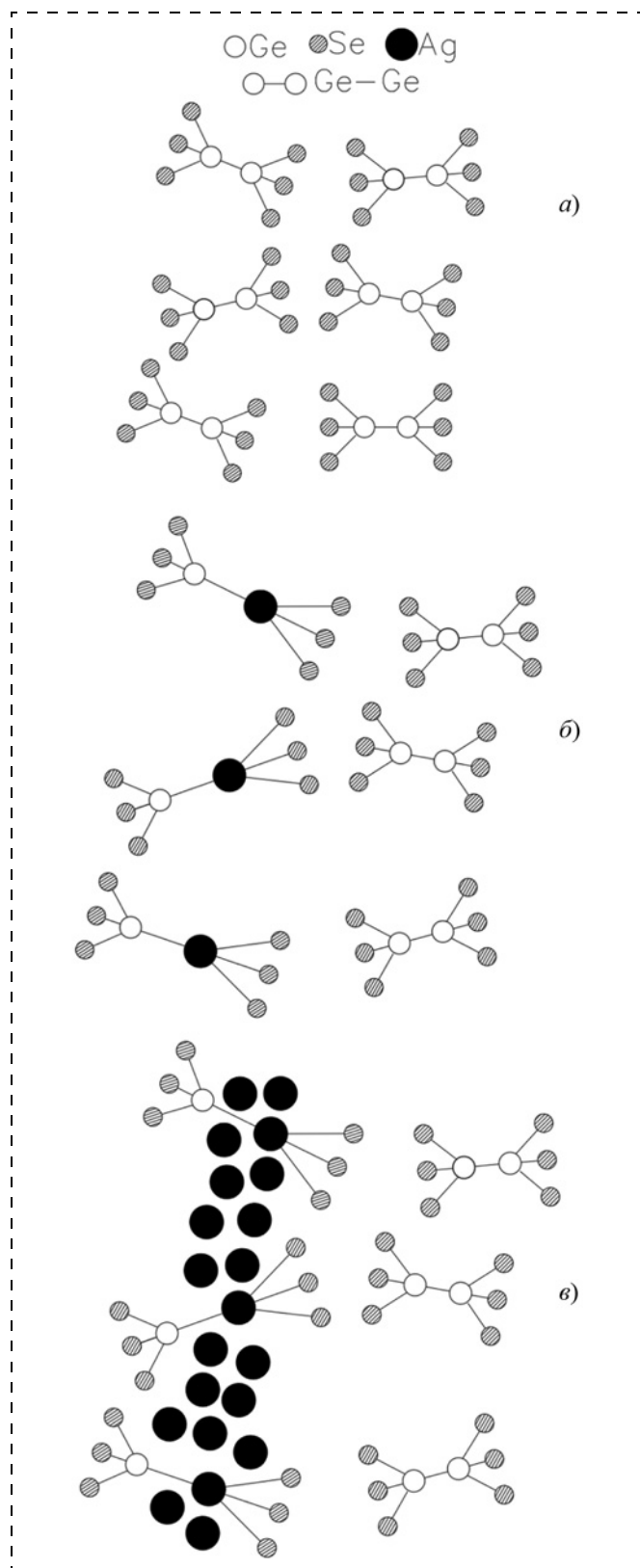


Рис. 5. Последовательность слоев и их функциональное назначение в мемристоре на основе  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$  с самоформирующимся токопроводящим каналом

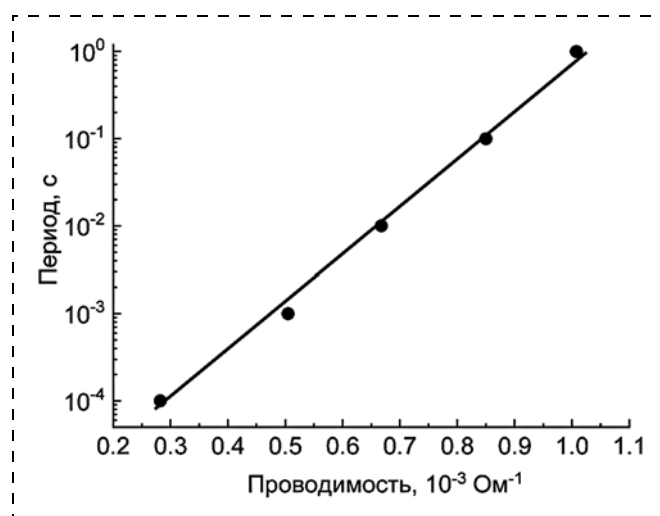
сенных в нанополости аморфной матрицы из верхнего (активного) электрода.

На рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) приведены ВАХ (зависимости тока  $I$  от напряжения  $U$ ), полученные при комнатной температуре с рабочими частотами 1, 100 и 10000 Гц. Видно, что с увеличением частоты форма ВАХ меняется: ветвь ВАХ, соответствующая нахождению мемристора в низкоомном режиме LRS, становится более полой, что указывает на увеличение сопротивления ТК мемристора, зависимость проводимости ТК от периода переключения приведена на рис. 8. Такая зависимость объясняется



**Рис. 6. Эволюционные ступени развития процесса агломерации ионов  $\text{Ag}^+$  в аморфной матрице  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$ :**

*a* — невозмущенный ближний порядок аморфной матрицы; *b* — образование нанополости вследствие замещения атома Ge на атом Ag в одном из димеров Ge-Ge; *c* — скопление ионов  $\text{Ag}^+$  вокруг нанополости. Рисунок был создан авторами статьи на основании работы [4]



**Рис. 8. Полулогарифмическая зависимость электропроводности СФК-мемристора от времени рабочего цикла мемристора**

количеством ионов серебра, образующих токопроводящий канал, зависящим от времени приложения напряжения.

### Заключение

В настоящей работе были изучены механизмы формирования токопроводящих каналов в мемристорах различных конструкций. Проведенные измерения ВАХ мемристоров показали зависимость формы ВАХ от частоты переключения. Было выявлено, что в мемристорах на основе оксидов переходных металлов значение LRS слабо зависит от частоты переключения, что можно объяснить низким сопротивлением токопроводящего канала. Значение HRS сильно зависит от частоты переключения, это объясняется наличием реактивного сопротивления мемристорной структуры. В мемристорах на основе твердых электролитов была выявлена зависимость LRS от частоты переключения, так как количество ионов серебра, формирующих токопроводящий канал, прямо пропорционально времени приложения напряжения. Значение HRS в таких мемристорах меняется слабо, что можно объяснить низкой емкостью самой мемристорной структуры.

Сравнение мемристоров различных типов позволяет выявить особенности различных конструкций. К "положительным" качествам мемристоров на основе оксида гафния можно отнести:

- меньший ток;
- больший рабочий диапазон частот переключения;
- симметричную ВАХ;
- больший рабочий диапазон напряжений.

Основными "положительными" особенностями мемристоров на основе твердых электролитов можно назвать:

- отношение HRS/ LRS;
- высокую стабильность токопроводящего канала;
- малую емкость мемристорной структуры.

## Список литературы

1. Chua L. O. Memristor — missing circuit element // IEEE Trans. Circuit Theory CT-18. 1971. P. 507—519.
2. Chua L. O., Kang S. M. Memristive devices and systems // Proceedings of the IEEE. 1976. Vol. 64. P. 209—223.
3. Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R. Memristive devices for computing // Nature Nanotechnology. 2013. Vol. 8, N. 1. P. 13—24.
4. Campbell K. A. Self-directed channel memristor for high temperature operation // Microelectronics Journal. 2017. Vol. 59. P. 10—14.
5. Campbell K. A., Anderson C. M. Phase-change memory devices with stacked Ge-chalcogenide/Sn-chalcogenide layers // Microelectronics Journal. 2007. Vol. 38. P. 52—59.
5. Edwards A. H., Campbell K. A., Pineda A. C. Self-trapping of single and paired electrons in  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$  // J. Phys.: Condens. Matter. 2012. Vol. 24, N. 19. P. 195801.

6. Devasia A., Kurinec S., Campbell K. A., Raoux S. Influence of Sn migration on phase transition in GeTe and  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$  thin films // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96. P. 141908.
7. Bersuker G., Gilmer D. C., Veksler D., Kirsch P., Vandelli L., Padovani A., Larcher L., McKenna K., Shluger A., Iglesias V., Porti M., Nafria M. Metal oxide resistive memory switching mechanism based on conductive filament properties // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. P. 124518.
8. Kim K. M., Jeong D. S., Hwang C. S. Nanofilamentary resistive switching in binary oxide system; a review on the present status and outlook // Nanotechnology. 2011. Vol. 22. P. 254002.
9. Waser R., Aono M. Nanoionics-based resistive switching memories // Nature Materials. 2007. Vol. 6, N. 11. P. 833—840.
10. Кререр Ф. А. Химия несовершенных кристаллов. М.: Мир, 1969. [F. A. Kröger. The chemistry of imperfect crystals. Amsterdam: North-Holland Publ. Co, 1964.
11. Jeong D. S., Schroeder H., Breuer U., Waser R. Characteristic electroforming behavior in Pt/TiO<sub>2</sub>/Pt resistive switching cells depending on atmosphere // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. P. 123716.

A. N. Aleshin<sup>1</sup>, D. Sc., Chief Researcher, analeshin@mail.ru, K. Y. Kharitonova<sup>2</sup>, Associate Professor, xenyakharitonova@yandex.ru, N. V. Zenchenko<sup>1, 2</sup>, Researcher, zenchenko.nikolay@yandex.ru, O. A. Ruban<sup>1, 2</sup>, Ph. D., Senior Researcher, myx.05@mail.ru

<sup>1</sup> V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105 Russia

<sup>2</sup> MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

Corresponding author:

Oleg A. Ruban, Ph. D., Senior Researcher, myx.05@mail.ru

## Mechanisms of Formation of Current-Conducting Channels in Bipolar Memristors of Various Designs

Received on April 24, 2023

Accepted on May 22, 2023

*The paper shows and describes various mechanisms for the formation of a conductive channel in bipolar memristors of the vacancy and ion types: in the first case, due to the nucleation and growth of conductive filaments, and in the second, due to segregation processes with the formation of spatial associations of ions from the active electrode material. The volt-ampere characteristics for memristors of both types are given and a comparison is made of the design features of these memristors.*

**Keywords:** memristor, solid electrolyte, amorphous matrix, agglomeration clusters, nanocavities, transition metal oxides

For citation:

Aleshin A. N., Kharitonova K. Y., Zenchenko N. V., Ruban O. A. Mechanisms of Formation of Current-Conducting Channels in Bipolar Memristors of Various Designs, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 241—245.

DOI: 10.17587/nmst.25.241-245

## References

1. Chua L. O. Memristor — missing circuit element, *IEEE Trans. Circuit Theory* CT-18, 1971, pp. 507—519.
2. Chua L. O., Kang S. M. Memristive devices and systems, *Proceedings of the IEEE*, 1976, vol. 64, pp. 209—223.
3. Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R. Memristive devices for computing, *Nature Nanotechnology*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 13—24.
4. Campbell K. A. Self-directed channel memristor for high temperature operation, *Microelectronics Journal*, 2017, vol. 59, pp. 10—14.
5. Campbell K. A., Anderson C. M. Phase-change memory devices with stacked Ge-chalcogenide/Sn-chalcogenide layers, *Microelectronics Journal*, 2007, vol. 38, pp. 52—59.
5. Edwards A. H., Campbell K. A., Pineda A. C. Self-trapping of single and paired electrons in  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$ , *J. Phys.: Condens. Matter*, 2012, vol. 24, no. 19, p. 195801.

6. Devasia A., Kurinec S., Campbell K. A., Raoux S. Influence of Sn migration on phase transition in GeTe and  $\text{Ge}_2\text{Se}_3$  thin films, *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, p. 141908.
7. Bersuker G., Gilmer D. C., Veksler D., Kirsch P., Vandelli L., Padovani A., Larcher L., McKenna K., Shluger A., Iglesias V., Porti M., Nafria M. Metal oxide resistive memory switching mechanism based on conductive filament properties, *J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 110, p. 124518.
8. Kim K. M., Jeong D. S., Hwang C. S. Nanofilamentary resistive switching in binary oxide system; a review on the present status and outlook, *Nanotechnology*, 2011, vol. 22, p. 254002.
9. Waser R., Aono M. Nanoionics-based resistive switching memories, *Nature Materials*, 2007, vol. 6, no. 11, pp. 833—840.
10. Kröger F. A. The chemistry of imperfect crystals, Amsterdam, North-Holland Publ. Co, 1964.
11. Jeong D. S., Schroeder H., Breuer U., Waser R. Characteristic electroforming behavior in Pt/TiO<sub>2</sub>/Pt resistive switching cells depending on atmosphere, *J. Appl. Phys*, 2008, vol. 104, p. 123716.

# ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ. РАДИОФОТОНИКА

## APPLICATION OF MNST.

### MICROWAVE-PHOTONICS

УДК 621.372.8

DOI: 10.17587/nmst.25.246-256

**М. Е. Белкин**, д-р техн. наук, зав. НТЛ "Радиопотонная СВЧ электроника", belkin@mirea.ru, МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва, belkin@mirea.ru,  
**М. Г. Васильев**, д-р техн. наук, зав. лаб. полупроводниковых и диэлектрических материалов, mgvas@igic.ras.ru, Институт общей и неорганической химии РАН, г. Москва, mgvas@igic.ras.ru,  
**А. С. Сигов**, д-р физ.-мат. наук, президент, академик РАН, sigov@mirea.ru, МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва, sigov@mirea.ru

## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МОСКОВСКОЙ СОТОВОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ПОКОЛЕНИЯ 5G

Поступила в редакцию 25.06.2023 г.

*Выполнен общий анализ мировых тенденций развития сотовой телекоммуникационной сети 5-го поколения. Предложены конкретные пути их реализации в масштабах крупного города. В качестве примера проведено эскизное проектирование Московской сотовой сети поколения 5G с распределением радиосигналов в пикосотах в полосе 37...43,5 ГГц. Сопоставление с ключевым параметром — "пиковая скорость передачи данных в соте", достигнутым в сотовых сетях 4G LTE и ожидаемым в сетях 5G, показало многократное увеличение, что свидетельствует об эффективности предложенного подхода.*

**Ключевые слова:** сотовая телекоммуникационная сеть поколения 5G, концепция малых сот, волоконно-беспроводная архитектура, технология WDM-RoF, эскизный проект

### Введение

Постоянно растущие потребности мировых науки, техники, бизнеса и общества в сверхширокополосных телекоммуникационных услугах, требующих сверхвысокой пропускной способности каналов связи, привели к необходимости радикального совершенствования принципов построения и ключевых параметров развивающейся системы сотовой связи 5-го поколения (5G NR) по сравнению с существующей системой 4-го поколения (4G LTE). Развитие принципов построения идет по пути повышения эффективности использования существующего частотного спектра, расширения его за счет введения новых частотных диапазонов, увеличения плотности зоны обслуживания, использования новых и усовершенствованных существующих сетевых архитектур, носителей информации и методов передачи цифровых сигналов. В результате планируется радикальное улучшение ключевых сетевых параметров [1—5].

Следуя описанным выше тенденциям, в настоящей работе рассматривается новый подход к построению крупномасштабной сотовой телекоммуника-

ционной системы, получившей название поколение 5G [6]. Суть его заключается в тщательной и более детальной структуризации сотовой сети на базе концепции малых сот, в широком использовании на всех ее структурных уровнях методов и подходов волоконно-оптической связи, в применении для передачи цифровых сигналов в транспортной сети оптимального сочетания временного, спектрального и пространственного мультиплексирования, построении сетей доступа на базе волоконно-беспроводной архитектуры, радиосвязи с пользовательскими устройствами в миллиметровом диапазоне волн, построении сетевой и пользовательской радиоаппаратуры миллиметрового диапазона на основе радиопотонной технологии. Для подтверждения практической эффективности изложенных принципов и подходов приведены результаты эскизного проектирования Московской сотовой сети поколения 5G.

### Общий подход

В процессе решения отмеченных во введении стратегических задач, обоснованных одновременными



требованиями как спектральной, так и сетевой эффективности, основное внимание уделяется следующим взаимосвязанным архитектурным и технологическим подходам к построению гетерогенных сетей доступа, реализация которых обеспечит возможность их поэтапного выполнения [6—11]: 1) внедрение концепции малых сот; 2) применение волоконно-беспроводной архитектуры по технологии WDM-RoF (*Wavelength Division Multiplexed Radio-over-Fiber*); 3) введение для радиосвязи с мобильными пользователями дополнительного частотного плана в миллиметровом диапазоне волн (MMB); 4) широкое применение новой радиофотонной технологии при разработке сетевого и пользовательского оборудования. В частности, развитие подхода 1 определило последовательное разбиение сети доступа на макросоты, микросоты, пикосоты и фемтосоты с размерами зон обслуживания от нескольких километров до нескольких метров, что обеспечивает возможность реализации подхода 3. Применение подхода 2, благодаря известным преимуществам волоконно-оптической и эфирной сред передачи, обеспечивает с системной точки зрения:

- повышение помехозащищенности, поскольку информационные потоки преимущественно передаются по свободным от внешних помех проводным (волоконно-оптическим) линиям;

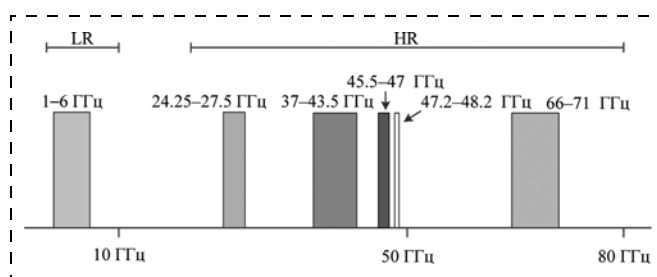
- малое ослабление передаваемых сигналов в линейном тракте, вследствие того, что потери в волоконно-оптическом кабеле на порядки меньше, чем в свободном пространстве;

- относительную простоту реализации и развертывания на объекте за счет применения концепции удаленной базовой станции (БС), которая может обслуживать значительное число пользовательских радиотерминалов;

- более низкую стоимость строительства и эксплуатации за счет использования в сетях доступа принципа передачи цифровых потоков на поднесущих радиочастотного диапазона, частота которых соответствует выделенной частоте радиотракта, что упрощает структуру, снижая мощность потребления и стоимость оборудования БС;

- большой потенциал на будущее за счет того, что сверхширокополосность волоконно-оптических линий связи гарантирует практически без дополнительных капиталовложений повышение пропускной способности сети.

Однако на пути его внедрения необходимо преодолеть известные проблемы радиосвязи в диапазоне MMB [12], в частности, высокие потери, взаимную интерференцию и наличие "мертвых" зон при атмосферном распространении, особенно в условиях плотной многоэтажной застройки крупного города. Кроме того, для гарантированного качества радиосвязи с фиксированными и мобильными пользователями пикосоты необходима совместимость с существующими сетями 4-го поколения. Исходя из этого, для сетей 5G NR в настоящее время Всемирными конференциями по радиосвязи (ВКР) утвержден двухдиапазонный частотный план работы беспроводных сетей



**Рис. 1. Утвержденный ВКР частотный план для сетей 5-го поколения**

(рис. 1): в диапазоне 1...6 ГГц, являющийся развитием частотного плана сетей предыдущих поколений [13], и в диапазоне 24...71 ГГц, специально созданный для сетей 5-го поколения [14].

### Исходные данные для проектирования

Современное административно-территориальное деление Москвы включает 12 административных округов (АО), 125 муниципальных районов (МР) и 21 поселение. Данные по АО Москвы приведены в табл. 1 [15].

Из анализа современных тенденций развития волоконно-оптической связи, рассмотрения плана Москвы и табл. 1 можно сделать предварительный вывод, что московскую сеть 5G NR возможно спроектировать полностью на основе иерархической концепции малых сот со следующими структурными и функциональными отличительными чертами. Соединяющая все АО транспортная сеть строится на базе кольцевой архитектуры с резервированием волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) между ее транспортными сетевыми узлами. Для повышения пропускной способности передаваемых цифровых каналов применяются временное, спектральное и пространственное мультиплексирование. Сеть доступа строится на базе технологии WDM-RoF с последовательным разбиением на макросоты, микросоты, пикосоты и фемтосоты, управление которыми осуществляется от базовых станций соответствующего уровня (БС-М, БС-м, БС-П, БС-Ф). Каждая БС высшего уровня одновременно выполняет функции БС низшего уровня. Дуплексная связь между БС внутри макросот и микросот реализуется на базе ВОЛС со скоростью передачи в терабитном диапазоне, а с пользовательской аппаратурой внутри пикосот — по радиоканалам в нижнем или верхнем диапазоне (LR и HR согласно рис. 1) выделенной полосы частот либо по ВОЛС. Скорость передачи каждому пользовательскому устройству (фиксированному, мобильному) составляет до 5 Гбит/с в исходящем направлении и до 1 Гбит/с во входящем направлении. На БС каждой микросоты в целях экономичного построения схемы БС последующих пикосот реализуется взаимный переход формата модуляции/демодуляции: от цифровой передачи в полосе модулирующих частот в цифровую передачу на поднесущей радиочастотного (РЧ) диапазона. Для бес-

Административные округа Москвы

№ п/п	Название	Население, чел.	Площадь, кв. км	Плотность населения, чел./кв. км	Число МР или поселений
1	Центральный АО (ЦАО)	782 048	66,1755	11 817,79	10
2	Северный АО (САО)	1 185 416	113,726	10 423,44	16
3	Северо-Восточный АО (СВАО)	1 431 976	101,883	14 055,1	17
4	Восточный АО (ВАО)	1 523 420	154,8355	9838,96	16
5	Юго-Восточный АО (ЮВАО)	1 418 430	117,5597	12 065,61	12
6	Южный АО (ЮАО)	1 793 456	131,7729	13 610,2	16
7	Юго-Западный АО (ЮЗАО)	1 445 006	111,3622	12 975,73	12
8	Западный АО (ЗАО)	1 392 993	153,0343	9102,49	13
9	Северо-Западный АО (СЗАО)	1 008 968	93,281	10 816,44	8
10	Зеленоградский АО (ЗГАО)	246 535	37,2	6627,3	5
11	Новомосковский АО (НМАО)	259 682	361,4	719	11
12	Троицкий АО (ТАО)	127 349	1084,3	117,45	10

печения требуемого качества передачи радиосигналов диапазона ММВ внутри пикосот, а также макросот и микросот в новых АО с менее развитой транспортной инфраструктурой и более низкой и разнородной плотностью застройки используют летательные сетевые платформы (ЛСП) на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), одновременно обеспечивающих координированную работу БС в ходе сеанса связи с беспроводным мобильным пользовательским устройством (БМПУ). Каналы радиосвязи в ММВ диапазоне организуют с помощью многолучевой фазированной антенной решетки (ФАР) на стороне БС и однолучевой ФАР на пользовательской стороне. В зависимости от их количества разводка внутри фемтосоты осуществляется по ВОЛС (например, в многоэтажном жилом доме) либо по радиоканалам (например, в автобусе) при сохранении пропускной способности каждого пользовательского канала.

Таким образом, Московскую сотовую сеть поколения 5G предлагается построить на базе гибридной волоконно-беспроводной архитектуры с дуплексной радиосвязью по утвержденному частотному плану (см. рис. 1) в двух частотных диапазонах: LR и HR.

### Принципы построения транспортной сети

Отличительные особенности принципов построения данной сети заключаются в увеличении пропускной способности вышеприведенных цифровых каналов с временным разделением за счет широко применяемого в волоконно-оптической связи спектрального мультиплексирования в полосах минимальных потерь кварцевого волокна, а также только осваиваемого телекоммуникационной промышленностью пространственного мультиплексирования на базе многосердцевинного волокна. Построенная на основе плана Москвы схема транспортной подсети гибридной волоконно-беспроводной сети связи 5-го поколения приведена на рис. 2.

Как следует из рис. 2, транспортная подсеть Московской сети 5G содержит 12 транспортных сетевых узлов (ТСУ) по числу АО. Все ТСУ связаны между

собой по кольцу посредством ВОЛС. Для надежности связь с каждым ТСУ дублируется с соседних ТСУ. Для периферийного ТСУ АО Троицкий (12), находящегося на расстоянии около 30 км от ближайшего ТСУ НМАО (11), интерактивное соединение предлагается дублировать в диапазоне ММВ посредством ЛСП на основе БПЛА, что активно развивается за рубежом в самые последние годы в рамках концепции B5G (Beyond 5G) [6]. Такой же подход перспективно

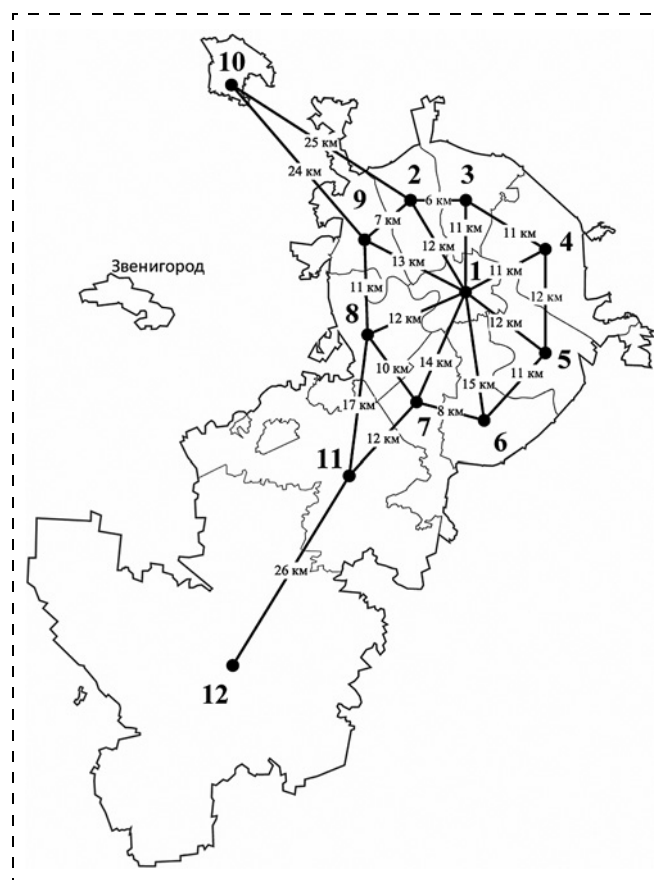


Рис. 2. Схема транспортной подсети Московской сети 5G NR (цифры соответствуют табл. 1)

использовать для подсоединения других связанных с Москвой городов и районов Московской области, например, показанного на рис. 2 г. Звенигорода, входящего в состав Одинцовского городского округа.

Двусторонняя передача между ТСУ потоков цифровых сигналов осуществляется путем пакетирования с временным мультиплексированием при максимальной скорости 800 Гбит/с. Объем пакета зависит от числа пользователей в данном АО. Для увеличения пропускной способности линий передачи используют спектральное и пространственное мультиплексирование с помощью многосердцевинного волокна. Число спектральных и пространственных каналов определяется требуемой емкостью принимающего ТСУ.

Согласно плану Москвы, минимальная длина транспортной соединительной линии (см. рис. 2) соответствует 6 км (между ТСУ САО и СВАО), максимальная длина — 26 км (между ТСУ НМАО и ТАО). Соответственно, общая длина транспортной сети г. Москвы приблизительно составляет 300 км.

**Расчет пропускной способности соединительных линий транспортной сети.** Для оценки пропускной способности транспортной сети необходимо на основе плана Москвы и табл. 1 рассчитать распределение числа пользователей данной сети по АО. Известно [15], что численность населения Москвы примерно равна 12,5 млн человек. С учетом служебных пользователей примем общее число пользователей сети, равным 20 млн. Исходя из нее, рассчитаем среднее число пользователей в одном АО по формуле

$$N_{\text{АО}}^{\text{cp}} = \frac{N_{\text{max}} + N_{\text{min}}}{2}, \tag{1}$$

где  $N_{\text{max}}$  и  $N_{\text{min}}$  — максимальное и минимальное число пользователей, которые согласно столбцу "Население" табл. 1 находятся на территории ЮАО и ТАО. Рассчитанное с помощью (1)  $N_{\text{АО}}^{\text{cp}} = 960$  тысяч. Пользуясь тем же столбцом табл. 1, определим коэффициент нагрузки каждого АО по отношению к среднему

значению. Результаты расчета приведены в табл. 2. Используя соответствующий коэффициент для каждой ВОЛС рис. 2, соединяющей соответствующие АО, определим параметры цифрового оптического сигнала (скорость передачи на одной оптической несущей, число несущих) и линейного тракта (число сердцевин оптического волокна, общая пропускная способность). Результаты выбора также приведены в табл. 2.

Из проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы.

1. Единая транспортная сеть сотовой телекоммуникационной системы Москвы 5-го поколения может быть построена на базе современных промышленно развитых технологий волоконно-оптической связи с использованием для сверхскоростной передачи цифровых данных в каждом из двух направлений временного (до 800 Гбит/с), спектрального (до 4 оптических несущих) и пространственного (7-сердцевинное оптическое волокно) мультиплексирования.

2. Согласно ее схеме (см. рис. 2) число транспортных сетевых узлов соответствует числу городских АО, причем ТСУ всех АО в пределах МКАД связаны между собой по кольцевой топологии. Для дополнительной надежности соединение с каждым кольцевым ТСУ дублируется через ТСУ ЦАО (1). Дуплексное соединение с периферийными ТСУ ЗГАО (10) и НМАО (11) осуществляется соответственно с ТСУ САО (2) и ТСУ ЮЗАО (7) и дублируется соответственно с ТСУ СЗАО (9) и ТСУ ЗАО (8).

3. Для периферийного ТСУ АО Троцкий (12), находящегося на расстоянии около 30 км от ближайшего ТСУ НМАО (11) (см. рис. 2), интерактивное соединение предлагается дублировать в диапазоне ММВ посредством летательной сетевой платформы на основе БПЛА, что активно развивается за рубежом в самые последние годы в рамках концепции 5G.

4. Приведенные в последнем столбце табл. 2 значения пропускной способности характеризуют объем информации, ответвляемый в макросоту данного ТСУ.

Таблица 2

Параметры соединительных линий транспортной подсети

№ п/п	Принимающий ТСУ	Коэффициент нагрузки	Параметры оптического сигнала		Параметры линии передачи	
			Скорость, Тбит/с	Число оптических несущих	Число сердцевин	Пропускная способность Тбит/с
1	ЦАО	0,8	0,8	2	7	11,2
2	САО	1,2	0,8	2	7	11,2
3	СВАО	1,5	0,8	3	7	16,8
4	ВАО	1,6	0,8	3	7	16,8
5	ЮВАО	1,5	0,8	3	7	16,8
6	ЮАО	1,9	0,8	4	7	22,4
7	ЮЗАО	1,5	0,8	3	7	16,8
8	ЗАО	1,5	0,8	3	7	16,8
9	СЗАО	1,05	0,8	2	7	11,2
10	ЗГАО	0,25	0,8	1	1	0,8
11	НМАО	0,25	0,8	1	2	1,6
12	ТАО	0,15	0,4	1	1	0,4
Итого				—	—	142,8

Однако примененная кольцевая топология, при которой каждый ТСУ принимает ответвляемый и ретранслируемые потоки цифровых данных, должна обеспечивать максимальную пропускную способность линейного тракта, составляющую 142,8 Тбит/с. Сегодняшним решением является применение в каждом направлении 12-волоконных кабелей, содержащих 1-сердцевинные и/или 7-сердцевинные оптические волокна, выпуск которых уже освоен зарубежной промышленностью и осваивается отечественной.

5. Использование такого малого числа спектральных каналов объясняется принятой скоростью передачи по одному каналу (800 Гбит/с), при которой расстояние между оптическими несущими при двухполосной модуляции должно быть около 2 ТГц. Данный режим невозможно реализовать с помощью широко применяемого в современных ВОСП плотного спектрального мультиплексирования (DWDM) с шагом 100 ГГц, однако он легко реализуется путем передачи с разреженным спектральным мультиплексированием (CWDM), содержащим согласно рекомендации ITU-T G.694.2 18 оптических несущих с шагом 20 нм в полосе длин волн 1271...1611 нм. Такая сверхширокая полоса охватывает все четыре стандартных спектральных диапазона: *O*, *S*, *C* и *L*, т. е. для компенсации повышенных потерь в многосердцевинном волокне в данном случае невозможно применить эрбиевый волоконный усилитель, который эффективно работает только в *C*- и *L*-диапазонах. Для его использования выбраны максимум четыре оптические несущие (см. табл. 2), например, 1531, 1551, 1571 и 1591 нм, расположенные в *C*- и частично в *L*-диапазоне.

### Принципы построения сети доступа

Согласно исходным данным сеть доступа АО внутри МКАД строится на базе концепции малых сот и волоконно-беспроводной архитектуры с интерактивным распределением радиосигналов в пикосоте. Каждая макросота состоит из связанных микросот по числу входящих МР. Сотовой сетью внутри микросоты управляет БС-м. Все внутренние БС-м связаны посредством ВОЛС. При необходимости увеличения пропускной способности линий связи используется спектральное мультиплексирование. В схеме каждой БС-м должен выполняться взаимный переход формата модуляции/демодуляции — от цифровой передачи в полосе модулирующих частот в цифровую передачу на поднесущей РЧ диапазона. Каждая микросота содержит набор пикосот, число которых определяется числом пользователей и плотностью застройки в данном МР. Сотовой сетью внутри пикосоты управляет базовая станция пикосоты (БС-П). Все внутренние БС-П связаны посредством ВОЛС. При этом зона обслуживания каждой пикосоты и местоположение БС-П, выполняющей роль интерактивного интерфейса между проводным и беспроводным участками сети, определяются из условия удаленности не более 250 м и желательно наличие прямого видения. При его отсутствии ухудшение качества передаваемых сиг-

налов может быть компенсировано за счет применения ЛСП на основе БПЛА, которая одновременно может быть использована для координации БС-П во время сеансов связи с БМПУ. Внутри каждой пикосоты должно быть обеспечено три типа дуплексных каналов связи: служебной фиксированной связи с организациями и предприятиями, резидентской фиксированной связи с жителями домов на территории пикосоты и мобильной связи. Первые передаются по ВОЛС (преимущественно) или радиоканалам в нижнем (1...6 ГГц) диапазоне выделенной полосы частот, вторые — по радиоканалам в нижнем или верхнем (24...71 ГГц) диапазоне выделенной полосы частот, третьи — по радиоканалам в верхнем диапазоне выделенной полосы частот. Каналы радиосвязи в ММВ диапазоне организуются с помощью многолучевой ФАР на стороне БС-П и расположенной на крыше ФАР на пользовательской стороне. При наличии в доме либо в транспортном средстве нескольких пользовательских устройств организуется внутренняя фемтосота, управляемая базовой станцией фемтосоты (БС-Ф). В зависимости от их числа разводка внутри фемтосоты осуществляется либо по ВОЛС, либо по радиоканалам.

Особенность построения сети доступа в двух новых АО с менее развитой инфраструктурой транспортной сети и более низкой и разнородной плотностью застройки состоит в широком использовании для дуплексного соединения микросот и пикосот ЛСП на основе БПЛА. Связь с наземными БС и между ними в целях повышения пропускной способности осуществляется в ММВ диапазоне.

Таким образом, в соответствии с исходными данными и полученными в предыдущем разделе данными транспортной подсети предлагается спроектировать подсеть доступа Московской телекоммуникационной сети 5G NR полностью на основе иерархической концепции малых сот со следующими структурными и функциональными отличительными чертами. Сеть доступа строится на базе технологии WDM-RoF с последовательным разбиением на макросоты, микросоты, пикосоты и фемтосоты, управление которыми осуществляется от базовых станций соответствующего уровня. Каждая базовая станция высшего уровня одновременно выполняет функции базовой станции низшего уровня. Дуплексная связь между базовыми станциями внутри макросот и микросот реализуется по ВОЛС со скоростью передачи соответственно до 10 и 1 Тбит/с, а с пользовательской аппаратурой внутри пикосот — по радиоканалам в нижнем (1...6 ГГц) или верхнем (24...71 ГГц) диапазоне выделенной полосы частот либо по ВОЛС. Скорость передачи каждому пользовательскому устройству (фиксированному, мобильному) составляет до 5 Гбит/с в исходящем направлении и до 1 Гбит/с во входящем направлении. На базовой станции каждой микросоты в целях экономичного построения схемы базовых станций последующих пикосот реализуется отмеченный выше взаимный переход формата модуляции/демодуляции. Частота поднесущей в зависимости от протяженности

волоконно-оптических соединительных линий внутри микросоты выбирается либо непосредственно в ММВ диапазоне, либо в полосе промежуточных частот (15 ГГц) [5]. Для обеспечения требуемого качества передачи радиосигналов ММВ диапазона внутри пикосот, а также макросот и микросот в новых АО с менее развитой инфраструктурой транспортной сети и более низкой и разнородной плотностью застройки используют ЛСП на основе БПЛА, одновременно обеспечивающих координированную работу БС в ходе сеанса связи с БМПУ. Каналы радиосвязи в миллиметровом диапазоне организуют с помощью многолучевой ФАР на стороне базовой станции и однолучевой ФАР на пользовательской стороне. В зависимости от их числа разводка внутри фемтосоты осуществляется по ВОЛС (например, в многоэтажном жилом доме) либо по радиоканалам (например, в автобусе) при сохранении пропускной способности каждого пользовательского канала.

### Сеть доступа макросоты

Согласно развиваемой в данной работе концепции малых сот сеть макросоты должна содержать набор микросот, число которых определяется числом муниципальных образований в составе городского округа. Все БС-м должны быть интерактивно связаны с помощью ВОЛС, по которым согласно исходным данным передают цифровые информационные потоки с временным и, при необходимости, спектральным мультиплексированием.

**Расчет пропускной способности соединительных линий макросоты.** В целях конкретности расчета в качестве примера выберем один из наибольших по площади (см. табл. 1) Западный АО. Инфраструктура данного АО включает 13 МР, каждым из которых согласно разработанной концепции должен управлять

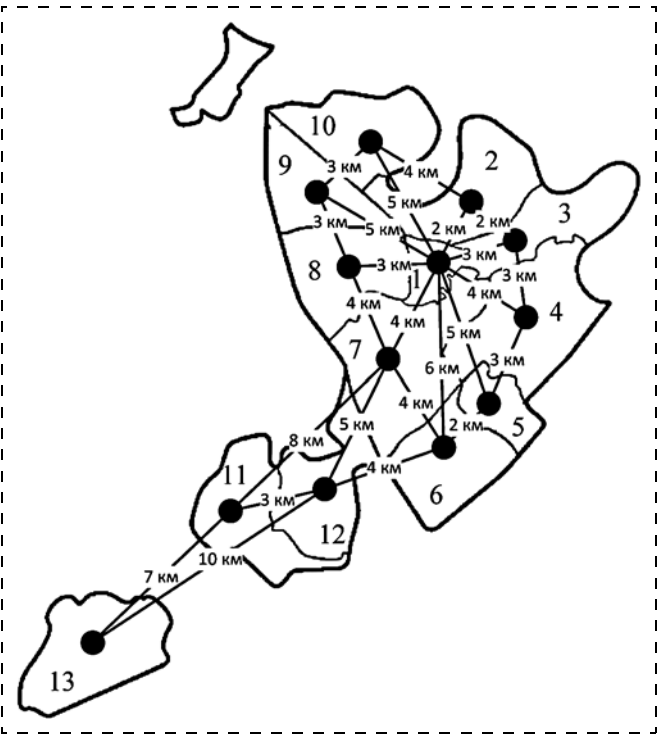


Рис. 3. Схема сотовой телекоммуникационной системы 5G NR в ЗАО г. Москвы

соответствующий БС-м. Таким образом, их число также должно быть 13. Общая характеристика всех МР ЗАО приведена в табл. 3.

Как следует из географии данного АО, для соединения всех БС-м посредством ВОЛС может быть использована кольцевая конфигурация с отводами, принцип построения которой аналогичен рассмотренной выше транспортной сети (см. рис. 2). А именно, кольцевая схема формируется по периферийным МР в пределах МКАД (2—10) с отводами в центральный (Фили-Давыдково (1)) и вынесенными за пределы МКАД (11—13) МР. Для надежности связь с каждым БС-м дублируется с соседних БС-м. Для периферийных БС-м (11—13) интерактивное соединение предлагается дублировать в диапазоне ММВ посредством ЛСП на основе БПЛА [16]. Построенная на описанных принципах схема сотовой телекоммуникационной системы 5G NR в ЗАО г. Москвы приведена на рис. 3. Цифры на схеме соответствуют номеру МР в табл. 3. Общая длина сети составляет около 100 км.

Для оценки пропускной способности соединительных линий макросоты ЗАО используем тот же прием, что при расчете транспортной сети, а именно, определим на основе табл. 3 распределение числа пользователей данной сети по АО. Как следует из табл. 2 и подтверждается данными табл. 3, численность населения ЗАО примерно равна 1 млн 393 тыс. человек. С учетом служебных пользователей и развития прием общее число пользователей сети, равным 1,5 млн. Исходя из нее, рассчитаем с помощью (1) среднее число пользователей в одном МР с учетом максимального и минимального числа пользователей, ко-

Таблица 3  
Муниципальные районы ЗАО Москвы [15]

№ п/п	Название	Население, тыс. чел	Площадь, кв. км	Плотность населения, чел/кв. км
1	Фили-Давыдково	115,128	6,96	16 541,38
2	Филевский парк	94,323	9,62	9804,89
3	Дорогомилово	76,093	7,95	9571,45
4	Раменки	141,610	18,54	7638,08
5	Проспект Вернадского	63,659	4,65	13 690,11
6	Тропарево-Никулино	124,167	11,27	11 017,48
7	Очаково-Матвеевское	130,742	17,54	7453,93
8	Можайский	138,610	10,73	12 917,99
9	Кунцево	152,364	16,56	9200,72
10	Крылатское	82,817	12,04	6878,49
11	Ново-Переделкино	121,553	8,48	14 334,08
12	Солнцево	126,456	11,29	11 200,71
13	Внуково	25,471	17,42	1462,17



торые согласно столбцу "Население" табл. 3 находятся на территории МР "Кунцево" и МР "Внуково". Рассчитанное с помощью (1)  $N_{MP}^{cp} = 89$  тысяч. Пользуясь тем же столбцом табл. 3, определим по аналогии с предыдущим разделом коэффициент нагрузки каждого МР по отношению к среднему значению. Используя соответствующий коэффициент для каждой ВОЛС, соединяющей соответствующие МР, определим параметры цифрового оптического сигнала: скорость передачи на одной оптической несущей, число несущих. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Из проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы.

1. Цифровая волоконно-оптическая подсеть доступа макросоты сотовой телекоммуникационной системы крупного города так же, как и транспортная подсеть, может быть построена на базе современных промышленно развитых технологий волоконно-оптической связи с использованием временного, спектрального и пространственного (7-сердцевинное оптическое волокно) мультиплексирования. Однако в данном случае в связи с приближением к конечному пользователю оптимальным вариантом является разбивка на цифровые пакеты с более низкими скоростями, что позволяет осуществлять передачу в обоих направлениях с использованием широко распространенного в ВОЛС стандарта DWDM (рекомендация ITU-T G.692 и ОСТ 45.178—2001), частотная сетка которого содержит в *L*-, *C*- и *S*-диапазонах до 150 оптических несущих с шагом 100 ГГц. Эффективность данного подхода подтверждена примером проектирования сети макросоты в одном из самых крупных АО — Западном административном округе. Согласно приведенным выше исследованиям обеспечено эффективное распределение по сети ВОЛС с общей пропускной способностью почти 17 Тбит/с цифровых сигналов со скоростью до 50 Гбит/с при использовании 62 оптических несущих с шагом 100 ГГц и 7-сердцевинного оптического волокна (см. табл. 4).

2. Согласно плану макросоты ЗАО число БС-М соответствует числу МР, причем БС-М всех МР в пределах МКАД связаны между собой по надежной кольцевой топологии (см. рис. 3). Для дополнительной надежности соединение с каждой кольцевой БС-М дублируется через центральную БС-М (1). Дуплексное соединение с периферийными БС-М (11, 12, 13) осуществляется соответственно с БС-М (7) и дублируется с БС-М (6).

3. Для периферийной БС-М "Внуково" (13), находящейся на расстоянии около 10 км от ближайшей БС-М (11), интерактивное соединение предлагается из экономических соображений дублировать в диапазоне ММВ посредством летательной сетевой платформы на основе БПЛА, что активно развивается за рубежом в самые последние годы в рамках концепции В5G.

4. Приведенные в последнем столбце табл. 4 значения пропускной способности характеризуют объем информации, отвечаемый в конкретную микросоту. Однако примененная кольцевая топология, при которой каждая БС-М принимает отвечаемый и ретранслируемые потоки цифровых данных, должна обеспечивать максимальную пропускную способность линейного тракта, составляющую почти 17 Тбит/с. Сегодняшним решением является применение в каждом направлении 13-волоконных кабелей, содержащих 1-сердцевинные и/или 7-сердцевинные оптические волокна. В перспективе емкость кабелей может быть значительно уменьшена (либо увеличена пропускная способность волоконно-оптической сети) за счет использования 19-сердцевинного волокна, выпуск которого планируется освоить в ближайшей перспективе.

#### Сеть доступа микросоты

Построение схемы распределения сигналов в микросоте является самым критическим этапом проек-

Таблица 4

Параметры соединительных линий макросоты ЗАО

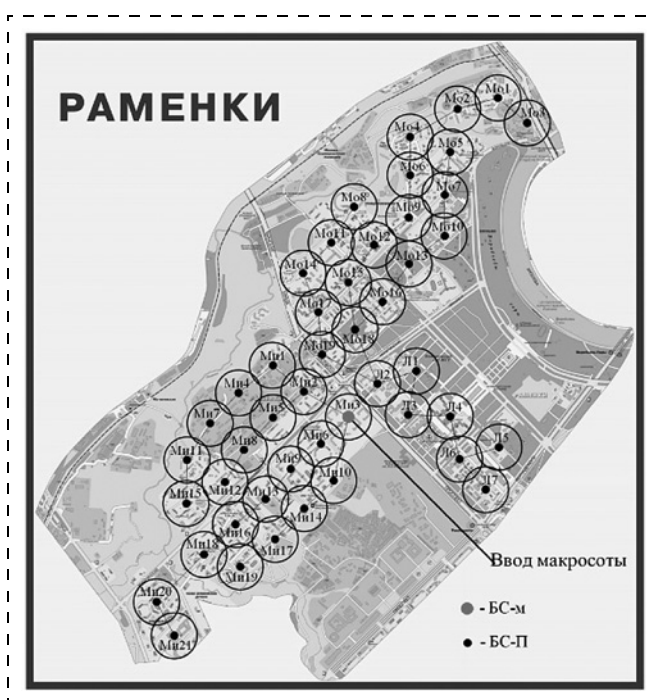
№ п/п	Принимающая БС-м	Коэффициент нагрузки	Параметры оптического сигнала		Параметры линии передачи	
			Скорость, Гбит/с	Число оптических несущих	Число сердцевин	Пропускная способность, Тбит/с
1	Фили-Давыдково	1,29	40	5	7	1,4
2	Филевский парк	1,06	40	4	7	1,12
3	Дорогомилово	0,85	40	3	7	0,84
4	Раменки	1,6	40	7	7	1,96
5	Проспект Вернадского	0,71	40	3	7	0,84
6	Тропарево-Никулино	1,4	40	6	6	1,44
7	Очаково-Матвеевское	1,47	40	7	7	1,6
8	Можайский	1,56	50	5	7	1,75
9	Кунцево	1,7	50	6	7	2,1
10	Крылатское	0,93	40	3	7	0,84
11	Ново-Переделкино	1,36	50	4	7	1,4
12	Солнцево	1,42	50	4	7	1,4
13	Внуково	0,3	40	5	1	0,2
Итого:				62	—	16,89

тирования сети 5G NR с применением принятой в данном исследовании технологии WDM-RoF. Традиционно связь БС-м с радиочастотными пользовательскими устройствами (РПУ) пикосот осуществляется в два этапа с использованием в исходящем направлении двух отдельных систем: проводной оптического диапазона между БС-м и БС-П, а затем беспроводной радиотехнического диапазона. При этом на первом этапе высокоскоростные цифровые потоки данных непосредственно модулируют интенсивность оптических несущих, передаются с помощью цифровой ВОЛС в полосе модулирующих частот и восстанавливаются в том же формате на БС-П, на которой они еще раз переносятся уже на РЧ несущие с принятыми в радиосвязи помехозащищенными методами цифровой модуляции — фазовой либо квадратурной амплитудной. Во входящем направлении связь осуществляется в обратном порядке. Понятно, что такая схема распределения на последнем участке сотовой сети приводит к значительному удорожанию аппаратуры БС-П, что весьма критично в свете концепции малых сот.

Применение технологии RoF [5, 9] принципиально решает эту серьезную проблему, позволяя реализовать бесшовную сетевую структуру, что особенно важно в случае распределения РЧ сигналов в диапазоне ММВ. А именно, указанные выше помехозащищенные форматы модуляции вводятся уже на более высокой ступени сотовой сети — на БС макросоты. При этом цифровые потоки данных маршрутизируются, переносятся на РЧ несущие, и данный комплексный РЧ сигнал модулирует оптическую несущую, передается по ВОЛС на БС-П, на которой только осуществляются простые операции его фотодетектирования и последующего усиления в РЧ диапазоне.

Таким образом, наиболее перспективный путь для реализации описанного выше подхода, который активно обсуждается в мировой научной литературе последних лет, заключается в расширении рабочей полосы частот передаваемых по ВОЛС РЧ сигналов, включая диапазон ММВ, использовании для упрощения схемы БС-П многопозиционной цифровой модуляции РЧ несущей и применении ФАР для ее направленной связи с РПУ пикосоты. А именно, беспроводной сетью диапазона ММВ управляет расположенная на мачте БС-П, включающая в себя простой аппаратный модуль, в котором осуществляется выделение и, при необходимости, частотное преобразование РЧ несущих [5], и одна многолучевая ФАР для высококачественной двунаправленной связи с РПУ данной пикосоты. Кроме того, в зависимости от характера застройки территории пикосоты возможен вариант установки БС-П на крыше одного из многоэтажных домов.

**Пример организации связи в микросоте.** В целях конкретности оценки в качестве примера выберем самый большой по площади и второй по численности населения рассмотренного в предыдущем разделе Западного АО (см. табл. 3) МР "Раменки". Нанесенная на карту данного МР в масштабе 1 см = 250 м предложенная схема распределительной сети микросоты,



**Рис. 4.** Схема распределительной сети в микросоте МР "Раменки"

учитывающая для упрощения только жилую застройку и территорию МГУ им. Ломоносова, приведена на рис. 4.

Как следует из рис. 4, в МР "Раменки" основная жилая застройка расположена вдоль Мичуринского и Ломоносовского проспектов и Мосфильмовской улицы, вследствие чего выбрана радиально-узловая конфигурация сети с примерно центральным местоположением БС-м. В результате получилось 47 пикосот с охватом примерно половины территории МР, включая 19 пикосот вдоль Мосфильмовской улицы (Мо1—Мо19), 21 пикосоту вдоль Мичуринского проспекта (Ми1—Ми21) и 7 пикосот вдоль Ломоносовского проспекта (Л1—Л7).

Определим пиковую скорость передачи в каждой пикосоте, приняв равномерное распределение нагрузки. Согласно табл. 4 пропускная способность линии передачи в БС-м МР "Раменки" составляет 1,96 Тбит/с. Отсюда следует, что в одной пикосоте обеспечивается пиковая скорость до 41,7 Гбит/с.

Важным вопросом, требующим изучения, является частотный план распределения РЧ сигналов ММВ диапазона в пикосотах, который должен соответствовать рис. 1. Вследствие невозможности передачи даже в ММВ диапазоне такого высокоскоростного сигнала, он еще на БС-м должен быть разбит на более мелкие пакеты стандартно по 1,25 либо 2,5 Гбит/с. Для сужения полосы их передачи в целях увеличения числа РЧ несущих в полосах, указанных на рис. 1, принято, что данные пакеты переносят в ММВ диапазон посредством многопозиционной квадратурной модуляции (М-QAM) с числом позиций 16 (сужение в 4 раза), 64 (сужение в 6 раз), 256 (сужение в 8 раз) либо 1024

(сужение в 10 раз) [17]. Согласно рис. 1 для работы в ММВ диапазоне в настоящее время отведены пять полос, включая: 24,25...27,5 ГГц (ширина 3,25 ГГц), 37,0...43,5 ГГц (ширина 6,5 ГГц), 45,5...47 ГГц (ширина 1,5 ГГц), 47,2...48,2 ГГц (ширина 1 ГГц) и 66...71 ГГц (ширина 5 ГГц). Последнюю полосу ввиду наибольшего влияния условий распространения радиоволн [12] разумно отвести для работы ЛСП, что подтверждается известными результатами [16]. Из оставшихся наиболее широкая полоса отведена в диапазоне 40 ГГц. Результаты расчета максимально допустимого числа РЧ каналов в данной полосе в зависимости от режима передачи данных приведены в табл. 5.

Из проведенного анализа можно сделать следующие **выводы и рекомендации**.

1. Применение технологии WDM-RoF и волоконно-беспроводной архитектуры на уровне микросоты позволяет реализовать бесшовную сетевую структуру, значительно улучшая габаритные и стоимостные характеристики базовых станций пикосоты, что особенно важно в случае распределения РЧ сигналов в миллиметровом диапазоне волн. При этом цифровой поток уже на уровне микросоты должен быть разбит на пакеты с существенно меньшими скоростями, и прежде, чем переносить его в оптический диапазон, необходимо модулировать несущие с использованием помехозащищенных форматов цифровой модуляции, например многопозиционной квадратурной амплитудной модуляции.

2. Предложенная распределительная сеть микросоты самого большого по площади муниципального района одного из самых плотно заселенных административных округов г. Москвы содержит 47 пикосот радиусом 250 м, в каждой из которых обеспечивается пиковая скорость до 41,7 Гбит/с. Сопоставление с ключевым параметром "пиковая скорость передачи данных в соте", достигнутым в сотовых сетях 4G LTE и ожидаемым в сетях 5G, показывает более, чем 1000-кратное увеличение, что свидетельствует об эффективности предложенных подходов к проектированию.

3. Связь с фиксированными пользовательскими радиоустройствами в выделенном на WRC-19 миллиметровом диапазоне волн [14] рекомендуется осу-

ществлять в самой широкой полосе 37...43,5 ГГц, в которой в зависимости от скорости передачи пакета и числа позиций QAM можно разместить до 52 радиочастотных несущих. Данное число РЧ несущих вполне достаточно для реализации беспомеховой радиосвязи с учетом, что передача сигнала с БС пикосоты, как правило, осуществляется с помощью многоэлементной и многолучевой фазированной антенной решетки, которая в этой полосе обеспечивает полную ширину радиолуча на краю зоны обслуживания на уровне 10...15° [18].

## Выводы и рекомендации по оптимальным принципам и схемам построения Московской сотовой телекоммуникационной сети поколения 5G

Проведенный комплекс исследований позволяет разработать следующие предложения по оптимальным принципам и схемам построения Московской сотовой телекоммуникационной сети 5-го поколения волоконно-беспроводной архитектуры с радиосвязью с мобильными и стационарными пользовательскими устройствами в миллиметровом диапазоне волн.

**Общие рекомендации.** При построении сотовой телекоммуникационной сети 5-го поколения в крупном городе, каким является г. Москва, основное внимание необходимо уделить следующим взаимосвязанным архитектурным и технологическим подходам к построению сетей доступа, реализация которых даст возможность решить все описанные в начале статьи задачи по многократному совершенствованию ключевых сетевых параметров по сравнению с существующей системой 4-го поколения.

**Рекомендации по транспортной сети.** Общегородскую цифровую транспортную сеть крупного города рекомендуется строить на базе проверенной волоконно-оптической технологии с применением для повышения надежности связи сетевой структуры не менее, чем двукратного резервирования, а для увеличения пропускной способности каналов — временного, спектрального и пространственного мультиплексирования. Первый вариант мультиплексирования рекомендуется реализовать за счет увеличения скорости передачи цифрового контента до 800 Гбит/с, второй вариант — за счет передачи с использованием CWDM в C- и L-спектральных диапазонах, третий вариант — за счет применения многосердцевинного волокна: сейчас 7-сердцевинного, в будущем — 19-сердцевинного.

**Рекомендации по сети доступа.** Начинаящуюся от макросоты и заканчивающуюся в пикосоте либо в фемтосоте сеть доступа рекомендуется строить на базе технологии WDM-RoF с последовательным разбиением на макросоты, микросоты, пикосоты и фемтосоты, управление которыми осуществляет БС соответствующего уровня. Каждая БС высшего уровня одновременно выполняет функции БС низшего уровня. Дуплексная связь между БС внутри макросот и микросот реализуется на базе ВОЛС со скоростью передачи в терабитном диапазоне, а с пользовательской

Таблица 5

Допустимое число РЧ каналов в полосе 37,0...43,5 ГГц

Скорость передачи, Гбит/с	Формат модуляции	Число РЧ каналов
1,25	16-QAM	21
	64-QAM	31
	256-QAM	41
	1024-QAM	52
2,5	16-QAM	11
	64-QAM	16
	256-QAM	21
	1024-QAM	27

Итоги эскизного проектирования Московской сотовой сети поколения B5G

Объект		Параметры		
		Транспортная сеть	Сеть доступа	
			Макросота	Микросота
Территория	Наименование Площадь, кв. км Население, тыс. чел.	г. Москва 2560 12 500	Западный АО 153 1393	МР "Раменки" 18,5 141,6
Сеть	Тип Конфигурация Число узловых станций Протяженность, км Пропускная способность, Тбит/с	Волоконная, 7-сердцевинное Кольцевая с отводами 12 280 142,8	Волоконная, 7-сердцевинное Кольцевая с отводами 13 102 17	Волоконно- беспроводная Радиально-узловая 47 22 2/0,042
Сигнал	Спектральный диапазон Скорость, Гбит/с Число несущих	S + C + L 800 до 7	C + L 50 до 62	C/MMB 2,5/1,25 до 12/до 52 с QAM

аппаратурой внутри пикосот — по радиоканалам в нижнем или верхнем диапазоне (LR и HR согласно рис. 1) выделенной полосы частот либо по ВОЛС. Скорость передачи каждому пользовательскому устройству составляет до 2,5...5 Гбит/с в исходящем направлении и до 1 Гбит/с во входящем направлении. На БС каждой микросоты в целях экономичного построения схемы БС последующих пикосот рекомендуется реализовать взаимный переход формата модуляции/демодуляции: от цифровой передачи в полосе модулирующих частот в цифровую передачу на поднесущей РЧ диапазона. Для обеспечения требуемого качества передачи радиосигналов диапазона ММВ внутри пикосот, а также макросот и микросот в новых АО с менее развитой транспортной инфраструктурой и более низкой и разнородной плотностью застройки используют ЛСП на основе БПЛА, одновременно обеспечивающих координированную работу БС в ходе сеанса связи с мобильным пользовательским устройством. Каналы радиосвязи в диапазоне ММВ рекомендуется организовать с помощью многолучевой ФАР на стороне БС и односторонней ФАР на пользовательской стороне. В зависимости от их числа разводку внутри фемтосоты рекомендуется осуществлять по ВОЛС (например, в многоэтажном жилом доме) либо по радиоканалам (например, в автобусе) при сохранении пропускной способности каждого пользовательского канала.

В заключение, итоги эскизного проектирования Московской сотовой сети поколения B5G с распределением радиосигналов в диапазоне ММВ представлены в табл. 6.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (грант в форме субсидии, шифр темы FSFZ-2022-0005).*

### Список литературы

1. Andrews J. G., Buzzi S., Choi W., Hanly S. What Will 5G Be? // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. Vol. 32. N. 6. P. 1065—1082.

2. Chen S., Zhao J. The requirements, challenges and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication // IEEE Commun. Mag. 2014. Vol. 52. N. 5. P. 36—43.

3. Munn J. Our 5G Future: In the Fast Lane with Numerical Simulation // Microwaves & RF. 2016. P. 48—50.

4. Frenzel L. Making 5G Happen. // Microwaves & RF. 2017. P. 1—5.

5. Belkin M. E., Bakhvalova T., Sigov A. C. Design Principles of 5G NR RoF-Based Fiber-Wireless Access Network, Ch. 8 Intech Open Book "Recent Trends in Communication Networks". 2019. P. 121—145. <https://www.intechopen.com/online-first/design-principles-of-5g-nr-rof-based-fiber-wireless-access-network>.

6. Al-Begain Kh., et al. IEEE 5G and Beyond Technology Roadmap White Paper. [futurenetworks.ieee.org/ieee-5g-roadmap-white-paper](http://futurenetworks.ieee.org/ieee-5g-roadmap-white-paper)

7. Radio over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks / Eds. H. Al-Rawashidy, S. Komaki]. M.: Artech House, 2002. 436 с.

8. Sauer M., Kobayakov A., George J. Radio over Fiber for Pico cellular Network Architectures // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2007. Vol. 25. N. 11. P. 3301—3320.

9. Beas J., Castanon G., Aldaya I. Millimeter-Wave Frequency Radio over Fiber Systems: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2013. Vol. 15. N. 4. P. 1593—1616.

10. Белкин М. Е. Принципы построения и функционирования локальных телекоммуникационных систем волоконно-эфирной структуры. ИНТЕРМАТИК-2009 "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения" // Материалы международной НТК. М.: МИРЭА, 2009. Т. 4. С. 7—12.

11. Belkin M., Alyoshin A., Fofanov D. Designing WDM-RoF Concept-Based Full-Duplex MMW Fiber Front haul Microcell Network. // 26th Conference of Open Innovations Association FRUCT2020, Ярославль, 20—24 апрель. 2020. С. 52—59.

12. Rappaport T. S., Sun Sh., Mayzus R. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! // IEEE Access. 2013. Vol. 1. P. 335—349.

13. Final Acts WRC-2015. Resolution 238. // World Radio communication Conference WRC-2015. 2016. P. 296—298.

14. Final Acts WRC-2019. Resolution 739. // World Radio communication Conference WRC-2019. 2019. P. 568.

15. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>

16. Tafintsev N., Moltchanov D., Gerasimenko M. Aerial Access and Backhaul in mm Wave B5G Systems: Performance Dynamics and Optimization // IEEE Communications Magazine, 2020. P. 93—99.

17. ETSI TS 136 104, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)," Version 15.3.0 Release 15, ETSI. 2018.

18. Belkin M. E., Fofanov D., Bakhvalova T., Sigov A. S. Design of Reconfigurable Multiple-Beam Array Feed Network based on Millimeter-Photonics Beam formers // Array Pattern Optimization. Intech Open, 2019. P. 109—132. <https://www.researchgate.net/publication/336514411>

**M. E. Belkin**, D. Sc., Head of Laboratory, belkin@mirea.ru,  
MIREA — Russian Technological University, Moscow,  
**M. G. Vasil'ev**, D. Sc., Head of Laboratory,  
Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow,  
**A. S. Sigov**, D. Sc., President,  
MIREA — Russian Technological University, Moscow

*Corresponding author:*

**Mikhail E. Belkin**, Head of Laboratory, MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russian Federation  
E-mail: belkin@mirea.ru

## The Concept of Designing Moscow Cellular Telecommunication Network of B5G Generation

Received on June 25, 2023

Accepted on July 24, 2023

*The paper presents a general analysis of global trends in the development of the 5th generation cellular telecommunication network. Concrete ways of their implementation on the scale of a megapolis city are proposed. As an example, a draft design of the Moscow cellular network of the B5G generation was carried out with the distribution of radio signals in pico cells in the 37–43.5 GHz band. Comparison with the key parameter "peak data rate in a cell", achieved in 4G LTE cellular networks and expected in B5G networks, showed a multiple increase, which indicates the effectiveness of the proposed approach.*

**Keywords:** cellular telecommunications network of B5G generation; concept of small cells; fiber wireless architecture; WDM-RoF technology, draft design

*For citation:*

**Belkin M. E., Vasil'ev M. G., Sigov A. S.** The Concept of Designing Moscow Cellular Telecommunication Network of B5G Generation, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 246–256.

DOI: 10.17587/nmst.25.246-256

### References

1. **Andrews J. G., Buzzi S., Choi W., Hanly S.** What Will 5G Be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082.
2. **Chen S., Zhao J.** The requirements, challenges and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication, *IEEE Commun. Mag.*, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 36–43.
3. **Munn J.** Our 5G Future: In the Fast Lane with Numerical Simulation, *Microwaves & RF*, 2016, pp. 48–50.
4. **Frenzel L.** Making 5G Happen, *Microwaves & RF*, 2017, pp. 1–5.
5. **Belkin M. E., Bakhvalova T., Sigov A. C.** Design Principles of 5G NR RoF-Based Fiber-Wireless Access Network, *Chapter 8, Intech Open Book "Recent Trends in Communication Networks"*, 2019, pp. 121–145, available at: <https://www.intechopen.com/online-first/design-principles-of-5g-nr-rof-based-fiber-wireless-access-network>.
6. **Al-Begain Kh.** et al. IEEE 5G AND BEYOND TECHNOLOGY ROADMAP WHITE PAPER, available at: [futureworks.ieee.org/ieeet-5g-roadmap-white-paper](https://www.ieee.org/ieeet-5g-roadmap-white-paper)
7. **Radio over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks**, Moscow, Artech House / Eds. H. Al-Raweshidy, S. Komaki, 2002, 436 p.
8. **Sauer M., Kobayakov A., George J.** Radio over Fiber for Pico cellular Network Architectures, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2007, vol. 25, no. 11, pp. 3301–3320.
9. **Beas J., Castanon G., Aldaya I.** Millimeter-Wave Frequency Radio over Fiber Systems: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 1593–1616.
10. **Belkin M. E.** Principy postroeniya i funkcionirovaniya lokal'nyh telekommunikacionnyh sistem volokonno-jefirnoj struktury, *INTERMATIK-2009 "Fundamental'nye problemy radioelektronno-go priborostroeniya"*, *Materialy mezhdunarodnoj NTK*, Moscow, MIREA, 2009, vol. 4, pp. 7–12 (in Russian).
11. **Belkin M., Alyoshin A., Fofanov D.** Designing WDM-RoF Concept-Based Full-Duplex MMW Fiber Front haul Microcell Network, *26th Conference of Open Innovations Association FRUCT2020, Yaroslavl*, 20–24 April 2020, 2020, pp. 52–59.
12. **Rappaport T. S., Sun S., Mayzus R.** Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!, *IEEE Access*, 2013, vol. 1, pp. 335–349.
13. **Final Acts WRC-2015.** Resolution 238. World Radio communication Conference WRC-2015, 2016, pp. 296–298.
14. **Final Acts WRC-2019.** Resolution 739. World Radio communication Conference WRC-2019, 2019, pp. 568.
15. <https://ru.wikipedia.org/wiki>
16. **Tafintsev N., Moltchanov D., Gerasimenko M.** Aerial Access and Backhaul in mm Wave B5G Systems: Performance Dynamics and Optimization, *IEEE Communications Magazine*, 2020, pp. 93–99.
17. **ETSI TS 136 104**, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Version 15.3.0 Release 15, ETSI. 2018.
18. **Belkin M. E., Fofanov D., Bakhvalova T., Sigov A. S.** Design of Reconfigurable Multiple-Beam Array Feed Network based on Millimeter-Photonics Beam formers, *Array Pattern Optimization*. *Intech Open*, 2019, pp. 109–132, available at: <https://www.researchgate.net/publication/336514411>

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2, оф. 45. Телефон редакции журнала 8(499) 270-1652. 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.

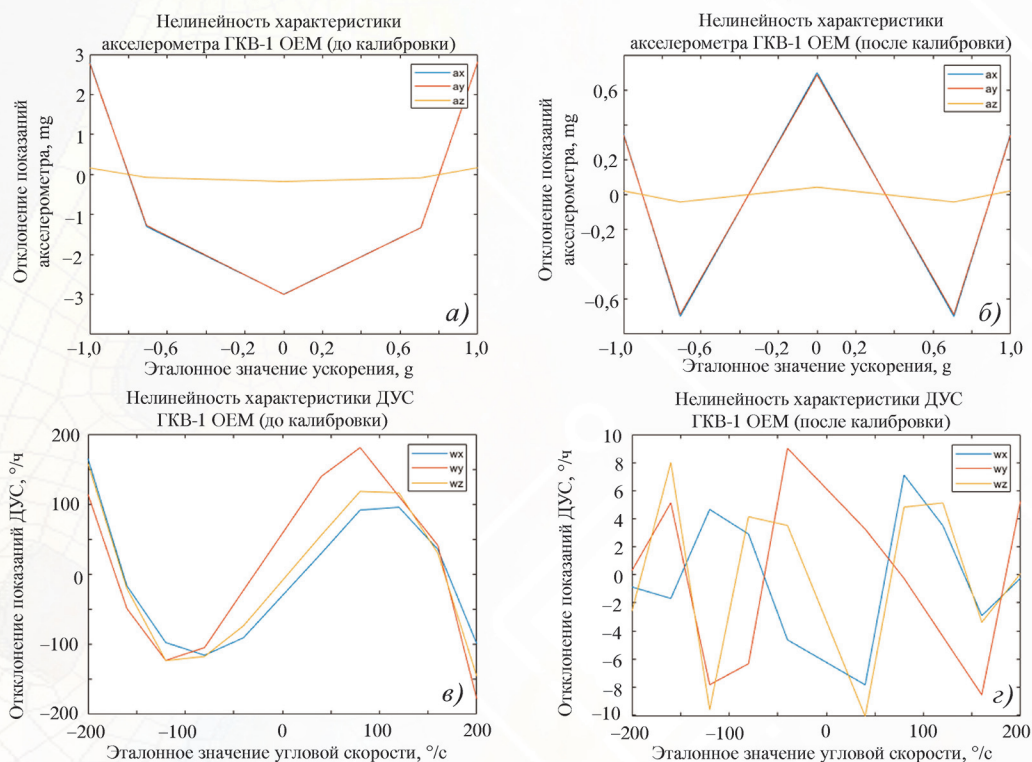
Технический редактор Т. А. Шацкая.

Сдано в набор 14.08.2023. Подписано в печать 15.09.2023. Формат 60×88 1/8. Заказ МС523. Цена договорная  
Оригинал-макет ООО «Авансд солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансд солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

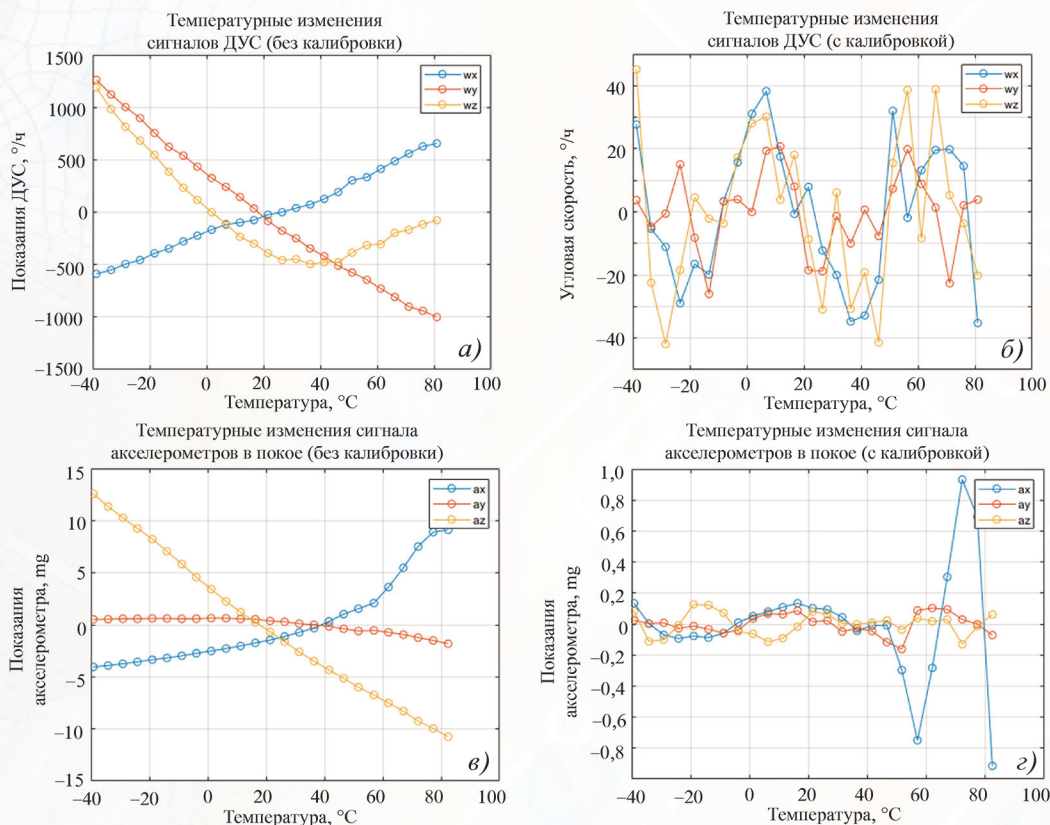


Рисунки к статье А. А. Галкина, Е. С. Кочуриной, С. П. Тимошенкова, П. В. Еркина,  
А. С. Тимошенкова, А. В. Михеева, А. М. Родина

# «КАЛИБРОВКА ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ МЭМС»



**Рис. 6. Отклонение от линейной аппроксимации передаточной характеристики датчиков канала измерения ускорений (а – б) и датчиков канала измерения угловых скоростей (в – з) ГКВ-1 OEM до и после калибровки**



**Рис. 7. Изменение статического сигнала в диапазоне температур датчиков канала измерения ускорений (а – б) и канала измерения канала угловых скоростей (в – з) ГКВ-1 OEM до и после калибровки**



Рисунок к статье А. Н. Алёшина, К. Ю. Харитоновой, Н. В. Зенченко, О. А. Рубана  
«МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ  
В БИПОЛЯРНЫХ МЕМРИСТОРАХ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ»

Рис. 2. ВАХ мемристора, измеренная при комнатной температуре с частотой переключения 1кГц (красными стрелками обозначен порядок переключения мемристора)

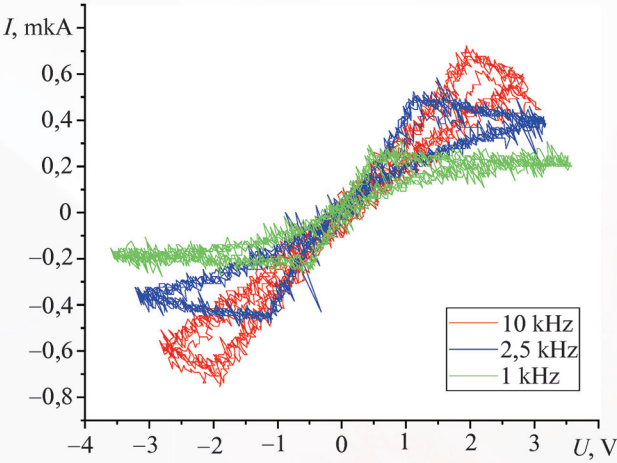
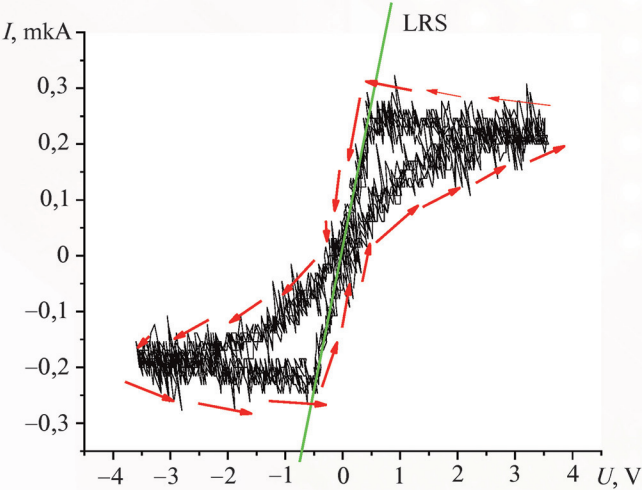


Рис. 3. ВАХ мемристора на основе оксида гафния, снятые при различных частотах переключения (1, 2.5 и 10 кГц)

Рис. 7. Изменение формы ВАХ СФК-мемристора, работающего при комнатной температуре, по мере увеличения частоты переключения: 1, 100, 10000 Гц

