

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. № 2. 2023

Рисунок к статье Н. В. Андреевой, А. Е. Петухова, Е. А. Рындина, В. В. Лучинина, В. М. Айвазяна

**«СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ
КАК МЕТОД АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ
И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В МЕМРИСТИВНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ»**

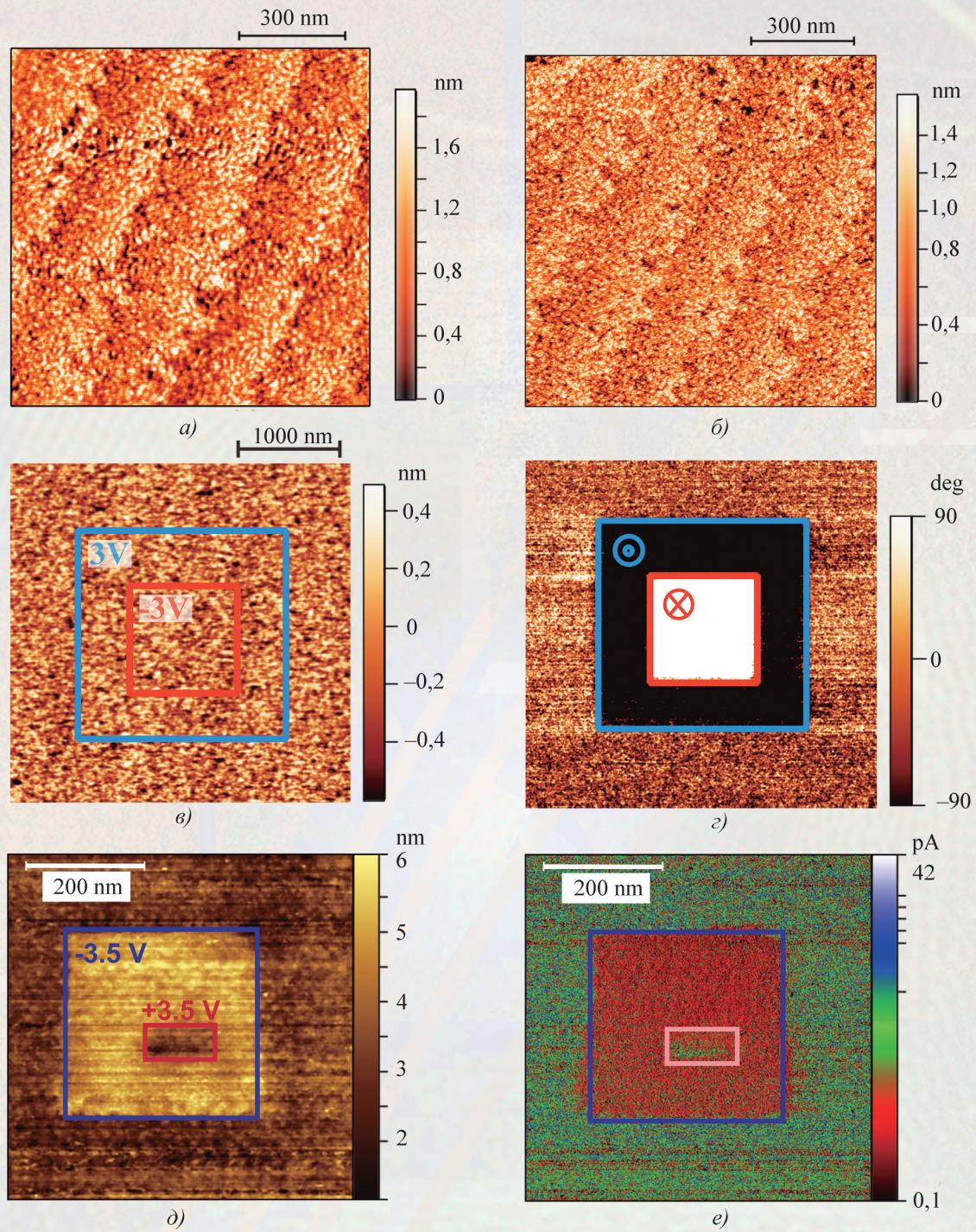


Рис. 4. Результаты исследований влияния процедуры поляризации на локальные свойства ВТО-пленки:
а – топография поверхности ВТО-пленки, полученная в режиме ACM-сканирования; *б* – топография поверхности ВТО-пленки, полученная в режиме СТМ-сканирования; *в* – топография поверхности ВТО-пленки после процедуры поляризации, полученная в режиме ACM-сканирования. Квадратами отмечены заполяризованные области пленки, $V_{DC} = \pm 3$ В; *г* – фаза сигнала пьезоотклика с заполяризованных областей (*в*), измеренная в режиме АСМП; *д* – топография поверхности ВТО-пленки после процедуры поляризации, полученная в режиме СТМ-сканирования. Квадратами отмечены заполяризованные области пленки, $V_{DC} = \pm 3,5$ В; *е* – распределение тока с заполяризованных областей (*д*), измеренное в режиме СТМ-сканирования. Полярность V_{DC} указана относительно нижнего электрода образца

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 25. № 2 ◆ 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 наноэлектроники, 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

Малыцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

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

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

Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН

Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь)

Андреев А., к.ф.-м.н. (Великобритания)

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай)

Басаев А. С., к.ф.-м.н.

Васильев А. А., д.т.н.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.ф.-м.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.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.)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Андреева Н. В., Петухов А. Е., Рындин Е. А., Лучинин В. В., Айвазян В. М. Сканирующая тунNELьная микроскопия как метод анализа корреляции локальных резистивных и сегнетоэлектрических свойств в мемристивных композициях 51

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Кошелева Н. Н., Пермяков Д. С., Гречкина М. В., Меньшикова Т. Г., Ромасев С. А. Синтез и электрофизическiе свойства пленок оксида меди для датчиков газов 61

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Драгунов В. П., Остертак Д. И., Синицкий Р. Е., Драгунова Е. В. Делитель напряжения на переключаемых конденсаторах для МЭМ генераторов 69

- Ефименко Е. В., Фанченко С. С. О сбоестойчивости интегральных схем программируемой логики при радиационном облучении 78

- Печерская Е. А., Гурин С. А., Новичков М. Д. Временная стабильность составных тонкопленочных резистивных структур 82

- Ткаченко А. В., Лысенко И. Е., Козлов А. В. Исследование электромагнитных параметров радиочастотного микромеханического переключателя, предназначенного для работы в приемопередающих системах 5G 86

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. 2
2023

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

Editorial council:

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
 Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), 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.)
 Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
 Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
 Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Ass. 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.)
 Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

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

- Andreeva N. V., Petukhov A. E., Ryndin E. A., Luchinin V. V., Avazyan V. M.** Scanning Tunneling Microscopy as a Method for Analyzing the Correlation of Local Resistive and Ferroelectric Properties in Memristive Compositions 51

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

- Rembeza E. S., Svistova T. V., Kosheleva N. N., Permyakov D. S., Grechkina M. V., Menshikova T. G., Romasev S. A.** Synthesis and Electrophysical Properties of Copper Oxide Films for Gas Sensors 61

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

- Dragunov V. P., Ostertak D. I., Sinitskiy R. E., Dragunova E. V.** Voltage Divider based on Switched Capacitors for MEM Generators 69

- Efimenko E. V., Fanchenko S. S.** On FPGA SEU Mitigation under Irradiation Conditions 78

- Pecherskaya E. A., Gurin S. A., Novichkov M. D.** Temporary Stability of Composite Thin-Film Resistive Structures 82

- Tkachenko A. V., Lysenko I. E., Kozlov A. V.** Research of Electromagnetic Parameters of the Radio-Frequency Micromechanical Switch Designed for Operation in 5G Transceiver Systems 86

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

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 537.312.7, 538.975, 538.971

DOI: 10.17587/nmst.25.51-60

Н. В. Андреева¹, канд. физ.-мат. наук, доц. каф. МНЭ, e-mail: nvandr@gmail.com,
А. Е. Петухов², вед. специалист, e-mail: anatolyptkhv@gmail.com,
Е. А. Рындин¹, д-р техн. наук, проф. каф. МНЭ, e-mail: rynenator@gmail.com,
В. В. Лучинин¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф. МНЭ, e-mail: cmid_leti@mail.ru,
В. М. Айвазян¹, инженер, e-mail: aivazyanvm@mail.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ КАК МЕТОД АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В МЕМРИСТИВНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

Поступила в редакцию 06.12.2022

Создание устройств многоуровневой резистивной памяти на основе нанослоевых мемристивных композиций с тонкими сегнетоэлектрическими (СЭ) пленками, в которых переключение сопротивления обусловлено комбинацией эффектов, связанных с влиянием интерфейсных областей, состояния поляризации, процессов транспорта заряда, а также особенностей микроскопических характеристик наноструктур, требует разработки новых экспериментальных подходов к изучению локальных электрофизическими свойств.

Одним из наиболее распространенных способов исследования локальных электрофизических свойств является использование различных методов атомно-силовой микроскопии (ACM), включая метод зонда Кельвина, тунNELьную атомно-силовую микроскопию и атомно-силовую микроскопию пьезоотклика.

Основной причиной перехода от методик ACM к методикам сканирующей туннельной микроскопии (STM) при исследовании локальных резистивных свойств мемристивных композиций с СЭ пленками является необходимость стабилизации контакта зонда с образцом. Основным препятствием на пути эффективного использования методик ACM для исследования локальных СЭ свойств в нанослоевых мемристивных композициях с тонкими СЭ пленками является возникновение градиента деформации в процессе сканирования, приводящего к вкладу флексоэлектрического эффекта, а также непосредственно прямого пьезоэффекта в результаты измерений.

В работе была разработана методика исследования локальных СЭ свойств с использованием STM и спектроскопического (CSC) режимов в условиях сверхвысокого вакуума. Суть предлагаемого подхода сводится к выявлению вклада поляризационных зарядов, а также особенностей их экранирования на поверхности СЭ пленки в результаты CSC-измерений при разной ориентации поляризации в СЭ пленке. В комбинации с STM-измерениями локальных морфологических особенностей анализ экспериментальных результатов позволяет идентифицировать состояние СЭ поляризации, определить вклад особенностей экранирования поляризационных зарядов на поверхности СЭ пленки в проявление мемристивных эффектов, а также исследовать корреляцию между локальными резистивными и СЭ свойствами в нанослоевых мемристивных композициях с тонкими СЭ пленками.

Ключевые слова: сегнетоэлектрический мемристор, сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия, переключение сопротивления

Введение

История развития сегнетоэлектрических мемристоров берет свое начало с экспериментальных исследований сегнетоэлектрических туннельных переходов (СТП), старт которым был положен в 2003 г. после публикации работы Перцева Н. А. и Кольштедта Х. [1]. СТП — это асимметричная структура, в которой сверхтонкая, туннельно-прозрачная, эпитаксиальная сегнетоэлектрическая пленка расположена между двумя электродами из материалов с различными эффективными длинами экранирования поляризационных зарядов (определенными в приближении Томаса—Ферми плотностью электронных состояний вблизи уровня Ферми) (рис. 1, *a*). Как правило, в качестве верхнего электрода структуры выбирается металл, тогда как нижний электрод представляет собой эпитаксиальную пленку оксида с металлической проводимостью, постоянная решетки которого согласована с постоянными решеток СЭ пленки и монокристаллической подложки. Разница в эффективных длинах экранирования поляризационных зарядов верхним и нижним электродами достигает двух порядков по значению. Асимметрия экранирования поляризационных зарядов приводит к дополнительному вкладу в электростатический потенциал на границах СЭ пленка/электрод, возрастающему с ростом эффективной длины экранирования и разному для верхнего и нижнего электродов. С изменением ориентации поляризации в СЭ пленке меняется асимметрия распределения электростатического потенциала, а следовательно, и средняя высота туннельного барьера, образованного СЭ пленкой. Так, направлению поляризации в сторону электрода с большей эффективной длиной экранирования соответствуют меньшие высота туннельного барьера и значение туннельного электросопротивления (R_{ON}), в то время как при противоположной ориентации поляризации будут наблюдаться большие высота туннельного барьера и значение туннельного электросопротивления (R_{OFF}) (рис. 1, *б*, *в*).

Термин "сегнетоэлектрический мемристор" впервые упоминается в работе 2012 г. [2] для описания резистивных эффектов в структуре $\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}_3$ (нижний электрод, 30 нм)/ BaTiO_3 (СЭ пленка,

2 нм)/ CoAu (верхний электрод), в которой переориентация поляризации в СЭ пленке сопровождалась изменением сопротивления структуры более чем на два порядка по значению. При этом такая структура обладала системой промежуточных (между R_{OFF} и R_{ON}) уровней сопротивления, формируемых при изменении длительности или амплитуды прикладываемых импульсов напряжения. Схожие эффекты были описаны и в ряде других высокоцитируемых работ [3, 4], в некоторых из них отношение R_{OFF}/R_{ON} в СТП достигало пяти порядков по значению.

Для объяснения появления промежуточных уровней проводимости в СТП, в которых ориентация поляризации может принимать всего два состояния — "вверх" (в направлении верхнего электрода) и "вниз", — привлекали представления о разбиении СЭ-пленки на две фракции доменов с разной ориентацией поляризации. Появлению промежуточных уровней проводимости соответствовало изменение соотношения между размерами фракций. В качестве другой возможной причины рассматривали перераспределение зарядов на интерфейсах структуры, обусловленное либо ионизацией доноров ($\text{Nb}^{5+}/\text{Ti}^{4+}$) нижнего электрода струк-

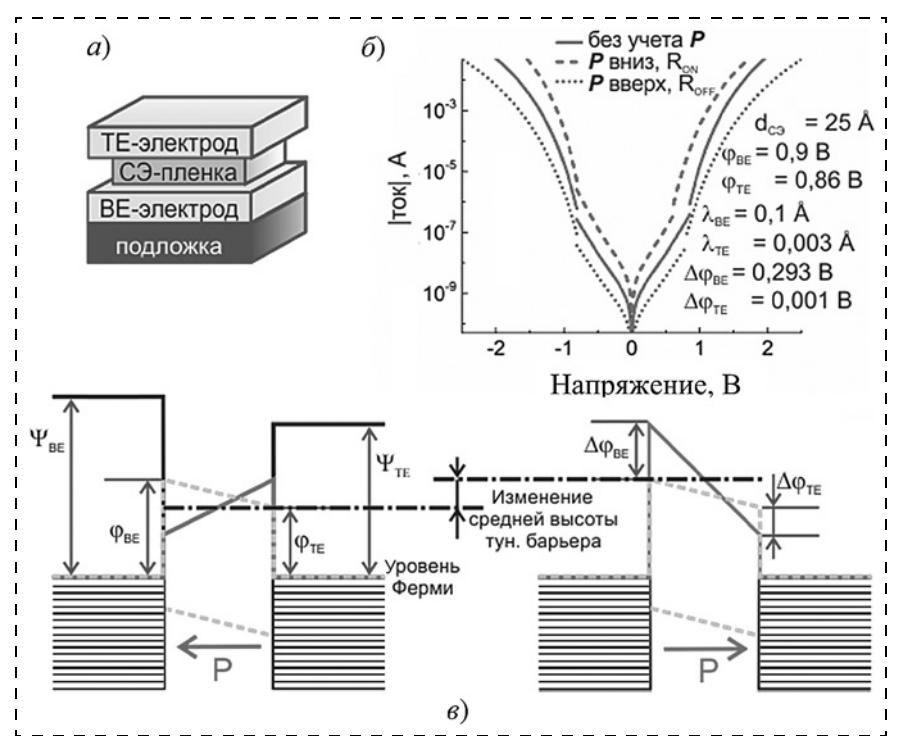


Рис. 1. СТП:

а — схема; *б* — модельные ВАХ, полученные с учетом особенностей экранирования поляризационных зарядов, где $d_{\text{СЭ}}$ — толщина СЭ пленки, $\lambda_{\text{BE}}, \lambda_{\text{TE}}$ — эффективные длины экранирования нижним электродом (ВЕ) и верхним электродом (ТЕ), $\Delta\phi_{\text{BE}}, \Delta\phi_{\text{TE}}$ — изменение потенциала на интерфейсах с нижним и верхним электродами; *в* — энергетические диаграммы для разной ориентации поляризации в СЭ пленке

туры $\text{Pt}/\text{BaTiO}_3/\text{Nb}: \text{SrTiO}_3$, либо вкладом заряженных точечных дефектов СЭ пленки — кислородных вакансий [5—7].

Таким образом, к началу 2020 годов были сформулированы основные рабочие гипотезы, объясняющие особенности организации многоуровневого переключения сопротивления в структурах с тонкими и сверхтонкими СЭ пленками, в которых переключение сопротивления обусловлено комбинацией эффектов, связанных с влиянием интерфейсных областей, состояния поляризации, процессов транспорта заряда, а также особенностей микроскопических характеристик СЭ пленок.

Однако для перехода к созданию устройств многоуровневой резистивной памяти на основе СЭ мемристоров потребовалась разработка новых экспериментальных подходов к изучению локальных электрофизических свойств.

Материалы и методы

Экспериментальное подтверждение выдвинутых гипотез о механизмах резистивной перестройки в СЭ мемристорах во многом основывается на результатах, полученных с использованием зондовых методов исследований, позволяющих измерять локальные электрофизические свойства СЭ пленок с разрешением порядка нескольких нанометров, среди которых наиболее распространеными являются методы атомно-силовой микроскопии (АСМ), включая метод зонда Кельвина, туннельную атомно-силовую микроскопию (тАСМ) и атомно-силовую микроскопию пьезоотклика (АСМП). Во всех перечисленных методах для измерений используют проводящий АСМ-зонд, а управление обратной связью АСМ основано на силовом взаимодействии Ван-дер-Ваальса. Основными препятствиями на пути эффективного использования этих методов для исследования локальных электрофизических свойств сверхтонких СЭ пленок являются:

- нестабильность контакта "АСМ-зонд — поверхность СЭ пленки", обусловленная как емкостным вкладом от взаимодействия балки АСМ-зонда с поверхностью СЭ пленки, так и изменением площади контакта в процессе сканирования;

- контактные деформации, возникающие при силовом взаимодействии АСМ-зонда с поверхностью СЭ пленки. При используемых толщинах СЭ пленок возникновение градиента деформации в процессе сканирования приводит к вкладу флексоэлектрического эффекта, наряду с прямым пьезоэффектом, в результаты измерений локальных СЭ свойств;

- изучение корреляции локальных сегнетоэлектрических, резистивных, морфологических

свойств требует многократных измерений одного и того же участка на поверхности СЭ пленки с использованием АСМ-зонда, проводимость которого, как правило, обеспечивается тонким (толщиной от нескольких до десяти нанометров) покрытием. При последовательном сканировании покрытие существенно модифицируется, что приводит к исказению результатов исследований.

Таким образом, основной причиной перехода от методов АСМ к методам СТМ при исследовании локальных резистивных свойств СЭ мемристоров является необходимость стабилизации контакта зонда с образцом при проводящих измерениях, которая особенно остро возникает в случае образцов с развитым рельефом поверхности (например, с поликристаллическими СЭ пленками).

Для исследований локальных СЭ свойств тонких пленок, как правило, применяют методики атомно-силовой микроскопии пьезоотклика. В режиме сканирования суть исследований сводится к измерению амплитуды и фазы сигнала пьезоотклика от поверхности образца при подаче между АСМ-зондом и нижним электродом переменного напряжения. В спектроскопическом режиме проводят локальное измерение поляризации по петле гистерезиса. Для этого, помимо переменного напряжения, между АСМ-зондом и образцом прикладывают постоянное напряжение смещения. Измерение сигнала пьезоотклика проводят в одной точке образца в процессе *DC* развертки по напряжению. Полученные таким образом локальные петли СЭ гистерезиса позволяют определить значения остаточной поляризации и коэрцитивного поля.

В случае СЭ мемристоров, в которых огромная роль отводится токам утечки, информацию о локальных СЭ свойствах получают из измерений поляризационных кривых с использованием стандартного метода импульсных переключений PUND (*Positive-Up-Negative-Down*). В основе PUND лежит выделение СЭ вклада в вольт-амперную характеристику образца (рис. 2, *a*). Для этого к образцу прикладывают последовательность из пяти импульсов напряжения заданной длительности. Первый импульс служит для переориентации как можно большего числа СЭ диполей в заданном направлении. Затем на образец подают два последовательных импульса обратной полярности. В значение тока I_P , протекающего при подаче первого импульса P на образец, дают вклад все возможные механизмы, включая ток смещения I_D , ток переключения СЭ поляризации I_F и токи утечки I_L :

$$I_P = I_F + I_D + I_L.$$

Во время второго импульса напряжения той же полярности U вклад в протекающий через образец

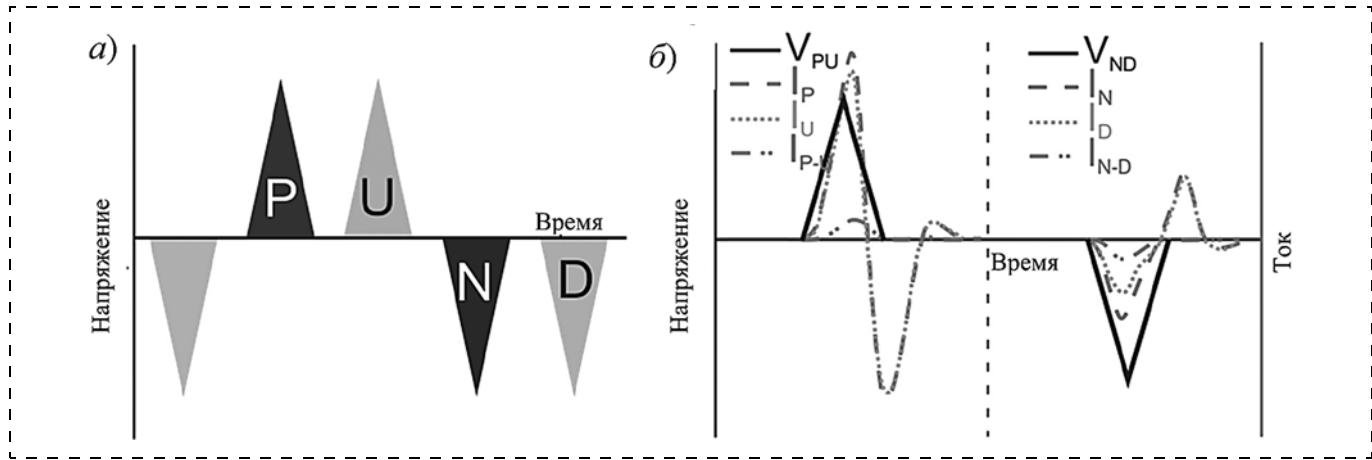


Рис. 2. Метод импульсных переключений PUND:

а — последовательность импульсов напряжения, прикладываемого к СЭ пленке в процессе измерений; б — токовый отклик, измеряемый в PUND, V_{PU} , V_{ND} — импульсы напряжения, I_P , I_N — токи, измеряемые при подаче импульсов P и N , I_U , I_D — токи, измеряемые при подаче импульсов U и D , I_{P-U} , I_{N-D} — токи переключения поляризации "вверх" ($P-U$) и "вниз" ($N-D$) соответственно

ток дают только I_D и I_L , так как во время импульса P были переключены все СЭ диполи. Вычитание тока, измеренного во время второго импульса напряжения, из тока, соответствующего первому импульсу, дает ток переключения СЭ поляризации (рис. 2, б). Следующие два импульса обратной полярности N и D служат для измерения I_F при обратном переключении поляризации.

Основной проблемой при использовании данного метода применительно к СЭ мемристорам при интегрировании с методиками тАСМ (так называемые nano-PUND [8]) является вклад паразитной емкости, обусловленный как емкостным вкладом от взаимодействия балки АСМ-зонда с поверхностью СЭ пленки, так и емкостью самой СЭ пленки. В этом случае ток смещения I_D на несколько порядков превышает ток переключения СЭ поляризации I_F . В некоторых случаях эту проблему пытаются решить путем устранения паразитной емкости различными методами компенсации [8–12].

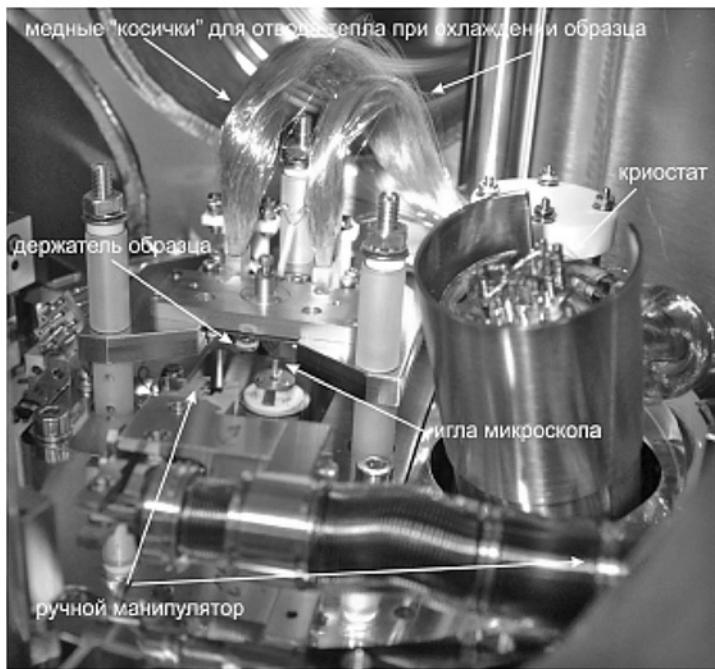
Тем не менее наши оценки [13] показывают, что значение тока переключения поляризации при использовании nano-PUND для исследований мемристивных композиций с тонкими СЭ пленками не превышает нескольких атоампер (при длительностях импульсов напряжения порядка единиц секунд), что соответствует нескольким десяткам электронов в секунду и лежит за пределами чувствительности измерительной аппаратуры зондовых методов (в данном случае как АСМ, так и СТМ).

В связи с этим для исследования корреляции локальных резистивных, СЭ и морфологических свойств в мемристивных композициях с тонкими СЭ пленками мы разработали свою методику на

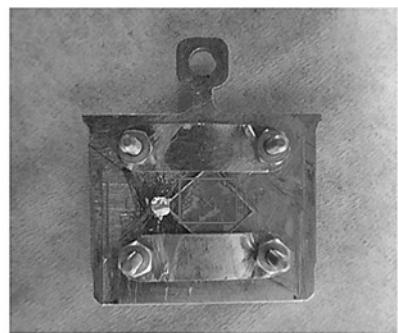
основе СТМ в сверхвысоком вакууме (СВВ). Организация системы обратной связи в СТМ по туннельному току, экспоненциально затухающему с расстоянием, позволяет стабилизировать контакт СТМ-зонд — поверхность.

СТМ-измерения проводили в условиях СВВ в ресурсном центре "Физические методы исследования поверхности" Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. СТМ-измерения проводили в аналитической камере в СВВ при базовом давлении ниже 3×10^{-10} мбар. Частицы остаточного газа, адсорбированные на поверхности, были удалены перед измерениями путем нагрева образцов до 120 °C внутри камеры подготовки при базовом давлении ниже 3×10^{-9} мбар. Измерения проводили в диапазоне туннельных токов от 1 пА до 330 нА на сканирующем зондовом микроскопе Omicron VT AFM XA. Для СТМ/СТС-измерений использовали PtIr-зонды (рис. 3). Для переключения СЭ поляризации использовали процедуру "поляризации", в процессе которой участок поверхности образца сканировали с приложением DC напряжения между СТМ-зондом и нижним электродом. Дополнительно применяли импульсный режим переключения СЭ поляризации.

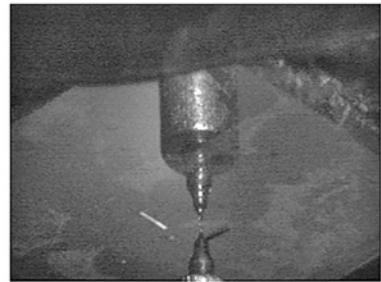
Гетероструктуры $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{BaTiO}_3$ (LSMO (10 нм, нижний электрод)/ВТО (2,5 нм, эпитаксиальная СЭ пленка)) осаждались на монокристаллические подложки SrTiO_3 (STO) с ориентацией (001) методом импульсного лазерного осаждения. Подробная информация об образцах приведена в работе [14]. Коэрцитивное напряжение ВТО-пленки, определенное из измерений петли СЭ гистерезиса в спектроскопическом режиме АСМП, составляет $U_{\text{CB}} = 2$ В.



a)



б)



в)

Рис. 3. Схема проведения СТМ-исследований:

а — аналитическая камера СТМ; *б* — образец, смонтированный на держателе, красным маркером отмечена область сканирования; *в* — образец, загруженный в аналитическую камеру СТМ

Исследование корреляции между локальными резистивными и СЭ свойствами проводили по следующей схеме:

— на первом шаге поверхность СЭ пленки сканировали с приложением постоянного напряжения смещения (V_{DC}) между СТМ-зондом и нижним электродом образца для задания определенного состояния поляризации (процедура поляризации). При использовании PtIr-зондов значение V_{DC} составляло $\pm 3,5$ В, напряжение прикладывали к СТМ-зонду, нижний электрод образца заземляли;

— на следующем шаге область большего размера сканировали в СТМ-режиме. Напряжение и ток рабочей точки, как для режима сканирования, так и для процедуры поляризации составляли $V_s = 4$ В, $I_t = 10$ пА соответственно;

— исследование локальных резистивных свойств образцов проводили с использованием спектроскопического режима СТМ (СТС) в локальных областях пленки. В целях исключения влияния переходных процессов, обусловленных временем перезарядки СЭ конденсатора, скорость развертки по напряжению при измерениях ВАХ не превышала 0,01 Гц и ее оценивали исходя из емкости структуры [14].

Для оценки применимости СТМ для изучения свойств тонких СЭ пленок было проведено сравнительное исследование результатов сканирования топографии СЭ пленок разной структуры с данными АСМ-измерений (рис. 4, *а*, *б*, см. вторую сторону обложки). Сопоставимость результатов, полученных разными методами, вкупе с отсутствием явно выраженных артефактов, говорит о применимости СТМ-методик для исследования локальных резистивных свойств поликристаллических СЭ пленок.

Результаты и обсуждение

Основное отличие СТМ-измерений от АСМ заключается в том, что СТМ-зонд, выполняющий функцию верхнего электрода, отделен от поверхности СЭ пленки туннельным барьером. Таким образом, суммарный барьер, ток через который измеряется в СТМ, образован СЭ пленкой и туннельным зазором "поверхность СЭ пленки — СТМ-зонд". При этом следует иметь в виду, что часть напряжения, прикладываемого между нижним электродом образца и СТМ-зондом, будет падать на барьере "поверхность СЭ пленки — СТМ-зонд".

Поэтому напряжение V_{DC} , прикладываемое на этапе поляризации с использованием СТМ, будет ненамного превосходить значение V_{DC} в АСМ (рис. 4, в, г, см. вторую сторону обложки). В результате процедуры поляризации в ВТО-пленке формируются две области с разной ориентацией поляризации (рис. 4, г). Ориентации поляризации "вверх" соответствует высокоомное состояние (R_{OFF}), "вниз" — низкоомное состояние ВТО-пленки (R_{ON}) (см. рис. 1, б, в). Визуализацию СЭ свойств заполяризованных областей пленки с использованием АСМ проводят в АСМП-режиме (рис. 4, г), при этом АСМ-топография заполяризованных областей не изменяется (рис. 4, в).

В СТМ, с учетом принципа организации обратной связи по туннельному току, в процессе сканирования рабочая точка не изменяется, т. е. значения напряжения, прикладываемого между СТМ-зондом и нижним электродом образца, и тока рабочей точки ($V_s = 4$ В, $I_t = 10$ пА) остаются постоянными. Это означает, что при СТМ-сканировании области, в которой поляризация направлена "вниз", значение тока при заданном V_s будет больше, поскольку оно определяет низкоомное состояние ВТО-пленки. Для поддержания установленного тока рабочей точки система обратной связи СТМ отодвигает зонд от поверхности ВТО-пленки, что будет проявляться на СТМ-топографии в виде ступеньки (рис. 4, д, см. вторую сторону обложки). Для областей с ориентацией поляризации "вверх", соответствующих высокоомному состоянию ВТО-пленки, будем наблюдать обратную картину.

Таким образом, распределение локальных СЭ свойств можно визуализировать на СТМ-топографии в режиме сканирования.

Для исследования локальных резистивных свойств СЭ мемристоров, а также их корреляции с СЭ свойствами, как правило, используется СТС-режим [15].

В этом случае следует иметь в виду, что наличие туннельного зазора "поверхность СЭ пленки — СТМ-зонд" будет приводить к ряду эффектов, обусловленных зарядкой поверхности СЭ пленки, которые при СТС-измерениях будутискажать результаты измерения ВАХ и могут быть приняты за изменение уровня проводимости СЭ мемристора.

Рассмотрим тонкую СЭ пленку, отделенную от СТМ-зонда туннельным зазором. Известно [16], что поляризационный заряд на "свободной" от электрода поверхности СЭ пленки будет частично экранироваться внешними зарядами слоя адсорбата, наличие которого нельзя исключить. Так, связанная с поверхностью оксидной пленки вода не удаляется даже при последующем отжиге (вплоть до температур порядка 350 °C [17, 18]). Наличие неизбежного слоя адсорбата (содержащего помимо полярных OH-групп еще и органические молеку-

лы) будет приводить к изменению особенностей экранирования поляризационных зарядов для разных амплитуд приложенного напряжения в СТС-измерениях. С изменением значения напряжения будет изменяться доля полярных молекул в слое адсорбата, участвующих в экранировании поляризационных зарядов, соответственно, будет изменяться и высота потенциального барьера на поверхности СЭ пленки.

Таким образом, при СТС-измерениях следует учесть падение напряжения на туннельном зазоре "поверхность СЭ пленки — СТМ-зонд", изменяющееся от значения приложенного между СТМ-зондом и нижним электродом образца напряжения U вследствие изменения поверхностной плотности σ_2 "внешних" зарядов, ассоциируемых со слоем адсорбата (рис. 5, в, см. третью сторону обложки).

Соответствующее изменение напряженности электрического поля E_2 можно найти следующим образом:

$$D = \epsilon_0 \epsilon_1 E_1 + P_S = \epsilon_0 \epsilon_2 E_2;$$

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2,$$

тогда

$$E_2 = \frac{P_S d_1}{U + \frac{\epsilon_0 \epsilon_1}{d_2 + \frac{\epsilon_2 d_1}{\epsilon_1}}},$$

где D — электрическая индукция; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; $\epsilon_1 \approx (100...1000)$ — относительная диэлектрическая проницаемость ВТО-пленки; $P_S = 26$ мКл/см² [19] — спонтанная поляризация ВТО-пленки; $d_1 = 25$ Å — толщина ВТО-пленки; $\epsilon_2 \approx (10...100)$ — относительная диэлектрическая проницаемость слоя адсорбата, в качестве которого в первом приближении рассматривается слой воды ($\epsilon_2 = 80$ при нормальных условиях); $d_2 = 1$ Å — толщина туннельного зазора "поверхность СЭ пленки — СТМ-зонд".

Тогда связь между значением напряжения U , прикладываемого между СТМ-зондом и нижним электродом образца, и изменением поверхностной плотности связанных в слое адсорбата зарядов σ_2 определяется из следующего выражения:

$$\sigma_2 = \chi_2 \epsilon_0 E_2 = (\epsilon_2 - 1) \epsilon_0 \frac{P_S d_1}{d_2 + \frac{\epsilon_2 d_1}{\epsilon_1}}.$$

Если предположить, что для исследования переключения сопротивления в СЭ пленке прикла-

дается импульс напряжения с $U = 1$ В, то для $\varepsilon_1 = 100$, $\varepsilon_2 = 10$, поверхностная плотность "внешних" зарядов $\sigma_2 = 40$ мКл/см², а для $\varepsilon_1 = 1000$, $\varepsilon_2 = 100 - \sigma_2 = 269$ мКл/см². Результаты расчетов для рабочего диапазона амплитуды поляризующих (переключающих СЭ поляризацию) импульсов напряжения приведены в табл. 1.

Для экспериментальной проверки изложенных выше рассуждений проведем оценку дополнительного вклада "внешних" зарядов в скачок потенциала на поверхности СЭ пленки в предположении, что измерения будем проводить при $T = 30$ К (низкие температуры выбраны в целях повышения стабильности СТМ-измерений и воспроизводимости результатов). В этом случае за толщину туннельного зазора "поверхность СЭ пленки — СТМ-зонд" примем размер молекулы воды $d_2 = 3$ Å (незначительным отличием $d_2 = 2,67$ Å для льда пренебрежем) и относительную диэлектрическую проницаемость льда $\varepsilon_2 = 95$. Зададимся экспериментально измеренным значением спонтанной поляризации $P_s = 10$ мКл/см² [20].

Учитывая две возможные ориентации поляризации — "вверх" (P_s^\uparrow) и "вниз" (P_s^\downarrow), вклад "внешних" зарядов в скачок потенциала на поверхности СЭ пленки составит:

$$\Delta V = \frac{\sigma_2 \pm P_s}{\varepsilon_0 \varepsilon_2} d_2.$$

Оценки скачка потенциала, обусловленного особенностями экранирования поляризационных зарядов на поверхности СЭ пленки для разной амплитуды импульсов напряжения, прикладываемого между СТМ-зондом и нижним электродом образца, приведены в табл. 2. Данные приведены для от-

рицательной полярности импульса (относительно нижнего электрода образца).

В целях более детального анализа полученных экспериментальных данных было проведено моделирование зависимости плотности тока от напряжения, прикладываемого между СТМ-зондом и нижним электродом образца. Учитывая толщины ВТО-пленок, а также результаты, полученные нами ранее [15, 21], для моделирования использовали теорию Симмонса, описывающую туннелирование через асимметричный потенциальный барьер, образованный между двумя электродами с разной работой выхода [22]. Детальное описание используемой модели и модельные ВАХ, полученные без учета экранирования поляризационных зарядов "внешними" зарядами адсорбата, приведены в нашей предыдущей публикации [14]. В данной работе мы учли вклад скачка потенциала ΔV , обусловленного особенностями экранирования поляризационных зарядов на поверхности СЭ пленки, в значение потенциального барьера. Схема СТМ-измерений и результаты моделирования ВАХ приведены на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

Обращает на себя внимание тот факт, что изменение резистивного состояния структуры (ВАХ изображены сплошной линией на рис. 5, г), обусловленное изменением поверхностной плотности заряда адсорбата, может нивелировать резистивные эффекты, вызванные переключением поляризации в ВТО-пленке (ВАХ изображены штриховой линией на рис. 5, г). В общем случае поверхностная плотность заряда, ассоциируемого со слоем адсорбата, может превосходить поверхностную плотность поляризационных зарядов. Тогда после приложения к структуре импульса напряжения переключения, поляризации может и не про-

Таблица 1

Изменения поверхностной плотности "внешних" зарядов σ_2 от напряжения U , прикладываемого между СТМ-зондом и нижним электродом образца

U , В	1	2	3	4	5	6	7	8
σ_2 , мКл/см ²	40...269	62...519	85...769	108...1020	131...1270	153...1520	176...1771	199...2021

Таблица 2

Оценка скачка потенциала на поверхности СЭ пленки, обусловленного зависимостью поверхностной плотности "внешних" зарядов σ_2 от значения напряжения U , прикладываемого между СТМ-зондом и нижним электродом образца

U , В	1	2	3	4	5	6	7	8
σ_2 , мКл/см ²	40,2	71,6	103,0	134,4	165,8	197,2	228,6	260
ΔV , В для P_s^\uparrow	0,108	0,220	0,368	0,444	0,556	0,668	0,780	0,892
ΔV , В для P_s^\downarrow	0,179	0,291	0,403	0,515	0,627	0,739	0,851	0,963

изойти (более подробно в работе [13]), а вот изменение поверхностной плотности σ_2 наблюдаться будет. В итоге, при определении удельного сопротивления структуры в СТС-режиме с использованием ВАХ, измеренных в диапазоне малых значений напряжений $0 < U \leq \varphi/e$ (φ — высота потенциального барьера на интерфейсах с электродами, e — элементарный заряд), высокоомному состоянию ВТО-пленки (R_{OFF}) будет соответствовать удельное сопротивление низкоомного состояния R_{ON} . Таким образом, об "истинном" уровне проводимости СЭ пленки в данном случае можно судить только по характеру ВАХ, отличающемуся для высокоомного и низкоомного резистивных состояний.

Результаты сравнения модельных ВАХ с экспериментальными представлены на рис. 6 (см. четвертую сторону обложки). Так, из рис. 6, *a, b* следует, что с увеличением амплитуды "переключающего" импульса напряжения отрицательной полярности происходит изменение локальных резистивных свойств структуры, отображающихся в виде изменения наклона ВАХ, при этом характер ВАХ свидетельствует о том, что переключения поляризации "вниз" не происходит (рис. 6, *a*). Вместо этого экспериментальные ВАХ соответствуют состоянию поляризации "вверх" и отображают изменение поверхностной плотности заряда, ассоциируемого со слоем адсорбата (рис. 6, *b*). Аналогичная ситуация наблюдается и для экспериментальных ВАХ, измеряемых после "переключающих" импульсов напряжения положительной полярности (рис. 6, *c, e*), которые должны переключать поляризацию в состояние "вверх". Из рис. 6, *c* видно, что поляризация ВТО-пленки уже ориентирована "вверх" и дальнейшее увеличение амплитуды импульсов приводит к изменению наклона ВАХ, характер которых явно не соответствует смоделированным для состояния поляризации "вниз".

Заключение

Таким образом, был разработан подход к исследованию корреляции между локальными сегнетоэлектрическими и резистивными свойствами в нанослоевых мемристивных композициях с тонкими сегнетоэлектрическими пленками с использованием методов сканирующей тунNELной микроскопии и спектроскопии в СВВ. Локальность экспериментального метода обеспечивается разрешающей способностью СТМ-измерений на уровне единиц нанометров.

В основе разработанного подхода лежит учет влияния особенностей экранирования поляризационных зарядов на свободной поверхности СЭ пленки на ток, измеряемый в процессе сканирования и регистрации ВАХ в СТМ/СТС режимах.

Установлено, что изменение наклона ВАХ с изменением амплитуды переключающего импульса напряжения обусловлено не резистивными эффектами, определяющими перестройку уровня проводимости СЭ пленки в составе мемристивной композиции, а эффектами экранирования поляризационных зарядов.

Показано, что изменение уровня проводимости СЭ мемристивных композиций сопровождается изменением характера ВАХ.

На основании результатов исследования STO/LSMO/BTO-структур, экспериментально установлено и теоретически обосновано, что многоуровневые резистивные эффекты в мемристивных нанослоевых композициях на основе эпитаксиальных сегнетоэлектрических пленок титаната бария в диапазоне сверхмалых толщин не наблюдаются; имеют место процессы переключения поляризации с возникновением двухуровневых состояний, что определяется особенностями экранирования поляризационных зарядов на границе раздела с материалом электродов.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-79-20073.

Список литературы

1. Rodríguez Contreras J., Kohlstedt H., Poppe U. et al. Resistive switching in metal—ferroelectric—metal junctions // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83, N. 22. P. 4595—4597.
2. Chanthbouala A., Garcia V., Cherifi R. O. et al. A ferroelectric memristor // Nat. Mater. 2012. Vol. 11, N. 10. P. 860—864.
3. Yamada H., Garcia V., Fusil S. et al. Giant Electroresistance of Super-tetragonal BiFeO₃-Based Ferroelectric Tunnel Junctions // ACS Nano. 2013. Vol. 7, N. 6. P. 5385—5390.
4. Kim D. J., Lu H., Ryu S. et al. Ferroelectric Tunnel Memristor // Nano Lett. 2012. Vol. 12, N. 11. P. 5697—5702.
5. Qin Q. H., Ääkslompolo L., Tuomisto N. et al. Resistive Switching in All-Oxide Ferroelectric Tunnel Junctions with Ionic Interfaces // Adv. Mater. 2016. Vol. 28, N. 32. P. 6852—6859.
6. Lü W., Li C., Zheng L. et al. Multi-Nonvolatile State Resistive Switching Arising from Ferroelectricity and Oxygen Vacancy Migration // Adv. Mater. 2017. Vol. 29, N. 24. 1606165.
7. Wang Z. J., Bai Y. Resistive Switching Behavior in Ferroelectric Heterostructures // Small. 2019. Vol. 15, N. 32. 1805088.
8. Martin S., Baboux N., Albertini D. et al. A new technique based on current measurement for nanoscale ferroelectricity assessment: Nano-positive up negative down // Rev. Sci. Instrum. 2017. Vol. 88, N. 2. 023901.
9. Estevez I., Chrétien P., Schneegans O. et al. Specific methodology for capacitance imaging by atomic force microscopy: A breakthrough towards an elimination of parasitic effects // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104, N. 8. 083108.
10. Tiedke S., Schmitz T., Prume K. et al. Direct hysteresis measurements of single nanosized ferroelectric capacitors contacted with an atomic force microscope // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 79, N. 22. P. 3678—3680.
11. Prume K., Roelofs A., Schmitz T. et al. Compensation of the parasitic capacitance of a scanning force microscope anti-

- lever used for measurements on ferroelectric capacitors of sub-micron size by means of finite element simulations // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. Vol. 41, N. 11S. P. 7198–7201.
12. Schmitz T., Prume K., Reichenberg B. et al. In-situ compensation of the parasitic capacitance for nanoscale hysteresis measurements // J. Eur. Ceram. Soc. 2004. Vol. 24, N. 6. P. 1145–1147.
 13. Andreeva N. V., Ryndin E. A., Demin Y. A. et al. Investigation of Local Ferroelectric Properties of Ultrathin Ferroelectric Films with Scanning Tunneling Microscopy // Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), October 20–21, 2022. St. Petersburg, Russian Federation. P. 210–213.
 14. Andreeva N., Petukhov O., Vilkov O. et al. Local Electric Property Modification of Ferroelectric Tunnel Junctions Induced by Variation of Polarization Charge Screening Conditions under Measurement with Scanning Probe Techniques // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, N. 12. 3323.
 15. Andreeva N. V., Petru A., Vilkov O. Y., Petukhov A. E. Structure-resistive property relationships in thin ferroelectric BaTiO₃ films // Sci. Rep. 2020. Vol. 10, N. 1. 15848.
 16. Kim Y., Bae C., Ryu K. et al. Origin of surface potential change during ferroelectric switching in epitaxial PbTiO₃ thin films studied by scanning force microscopy // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94, N. 3. 032907.
 17. Brinkman W. F., Dynes R. C., Rowell J. M. Tunneling Conductance of Asymmetrical Barriers // J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41, N. 5. P. 1915–1921.
 18. Peter F. Piezoresponse Force Microscopy and Surface Effects of Perovskite Ferroelectric Nanostructures. Forschungszentrum Jülich GmbH: Jülich, Germany. 2006. Vol. 11. 125 p.
 19. Wang Z., Zhao W., Kang W. et al. A physics-based compact model of ferroelectric tunnel junction for memory and logic design // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47, N. 4. 045001.
 20. Андреева Н. В. Физико-технологические основы мемристивных нанослоевых композиций для аналоговых нейроморфных электронных систем. Дис. на соиск. учен. степ. д. ф.-м. н. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Санкт-Петербург, 2022. 303 с.
 21. Andreeva N. V., Petrov A. A., Petru A. et al. Mechanisms of electron transport in BaTiO₃ ultrathin epitaxial films in the temperature range 40 K–295 K // Mater. Res. Express. 2019. Vol. 6, N. 2. 026427.
 22. Simmons J. G. Electric Tunnel Effect between Dissimilar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34, N. 9. P. 2581–2590.

N. V. Andreeva¹, Ph. D., Associate Professor, e-mail: nvandr@gmail.com,
A. E. Petukhov², Leading Specialist, e-mail: anatolyptkhv@gmail.com,
E. A. Ryndin¹, D. Sc., Professor, e-mail: rynenator@gmail.com,
V. V. Luchinin¹, D. Sc., Professor, Head of Department, e-mail: cmid_leti@mail.ru,
V. M. Aivazyan¹, Engineer, e-mail: aivazyanvm@mail.ru

¹ St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin),
St. Petersburg, 197022, Russian Federation

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Corresponding author:

Andreeva Natalia V., Ph. D., Associate Professor, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, 197022, Russian Federation, e-mail: nvandr@gmail.com

Scanning Tunneling Microscopy as a Method for Analyzing the Correlation of Local Resistive and Ferroelectric Properties in Memristive Compositions

Received on December 06, 2022

Accepted on December 23, 2022

The creation of multilayer resistive memory devices based on nanolayer memristive compositions with thin ferroelectric (FE) films, in which resistance switching is caused by a combination of effects related to the influence of interface regions, polarization states, charge transport mechanisms, and microscopic features of nanostructures, requires the development of new experimental approaches to the study of local electrophysical properties.

One of the most common ways to investigate local electrophysical properties is the use of various atomic force microscopy (AFM) techniques, including the Kelvin probe microscopy, tunneling AFM, and piezoresponse AFM.

The main reason for switching from AFM to scanning tunneling microscopy techniques when studying the local resistive properties of memristive compositions with FE films is the need to stabilize the probe-sample contact. The main obstacle to the effective use of AFM techniques to study the local ferroelectric properties in nanolayer memristive compositions with thin FE films is the occurrence of a strain gradient during scanning, which leads to the contribution of the flexoelectric effect and direct piezoelectric effect in the measurement results.

In this work, we have developed a method of investigating the local FE properties using scanning tunneling microscopy (STM) and spectroscopy (STS) techniques under ultra-high vacuum conditions. The essence of the proposed approach is to identify the contribution of polarization charges, as well as the features of their screening on the free surface of the FE film, to the results of STS measurements at different polarization orientations in the FE film.

In combination with STM measurements of local morphological features, the analysis of experimental results makes it possible to identify the state of FE polarization, determine the contribution of the surface screening of polarization charges to the manifestation of memristive effects, and investigate the correlation between the local resistive and FE properties in nanolayer memristive compositions with thin FE films.

Keywords: ferroelectric memristor, scanning tunneling microscopy and spectroscopy techniques, resistance switching

For citation:

Andreeva N. V., Petukhov A. E., Ryndin E. A., Luchinin V. V., Aivazyan V. M. Scanning Tunneling Microscopy as a Method for Analyzing the Correlation of Local Resistive and Ferroelectric Properties in Memristive Compositions, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 51–60.

DOI: 10.17587/nmst.25.51-60

References

1. Rodríguez Contreras J., Kohlstedt H., Poppe U. et al. Resistive switching in metal–ferroelectric–metal junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 2003, vol. 83, no. 22, pp. 4595–4597.
2. Chanthbouala A., Garcia V., Cherifi R. O. et al. A ferroelectric memristor, *Nat. Mater.*, 2012, vol. 11, no. 10, pp. 860–864.
3. Yamada H., Garcia V., Fusil S. et al. Giant Electroresistance of Super-tetragonal BiFeO₃-Based Ferroelectric Tunnel Junctions, *ACS Nano*, 2013, vol. 7, no. 6, pp. 5385–5390.
4. Kim D. J., Lu H., Ryu S. et al. Ferroelectric Tunnel Memristor, *Nano Lett.*, 2012, vol. 12, no. 11, pp. 5697–5702.
5. Qin Q. H., Äkäslompolo L., Tuomisto N. et al. Resistive Switching in All-Oxide Ferroelectric Tunnel Junctions with Ionic Interfaces, *Adv. Mater.*, 2016, vol. 28, no. 32, pp. 6852–6859.
6. Lü W., Li C., Zheng L. et al. Multi-Nonvolatile State Resistive Switching Arising from Ferroelectricity and Oxygen Vacancy Migration, *Adv. Mater.*, 2017, vol. 29, no. 24, 1606165.
7. Wang Z. J., Bai Y. Resistive Switching Behavior in Ferroelectric Heterostructures, *Small*, 2019, vol. 15, no. 32, 1805088.
8. Martin S., Baboux N., Albertini D. et al. A new technique based on current measurement for nanoscale ferroelectricity assessment: Nano-positive up negative down, *Rev. Sci. Instrum.*, 2017, vol. 88, no. 2, 023901.
9. Estevez I., Chrétien P., Schneegans O. et al. Specific methodology for capacitance imaging by atomic force microscopy: A breakthrough towards an elimination of parasitic effects, *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, no. 8, 083108.
10. Tiedke S., Schmitz T., Prume K. et al. Direct hysteresis measurements of single nanosized ferroelectric capacitors contacted with an atomic force microscope, *Appl. Phys. Lett.*, 2001, vol. 79, no. 22, pp. 3678–3680.
11. Prume K., Roelofs A., Schmitz T. et al. Compensation of the parasitic capacitance of a scanning force microscope cantilever used for measurements on ferroelectric capacitors of sub-micron size by means of finite element simulations, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, vol. 41, no. 11S, pp. 7198–7201.
12. Schmitz T., Prume K., Reichenberg B. et al. In-situ compensation of the parasitic capacitance for nanoscale hysteresis measurements, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2004, vol. 24, no. 6, pp. 1145–1147.
13. Andreeva N. V., Ryndin E. A., Demin Y. A. et al. Investigation of Local Ferroelectric Properties of Ultrathin Ferroelectric Films with Scanning Tunneling Microscopy, *Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, October 20–21, 2022. St. Petersburg, Russian Federation, pp. 210–213.
14. Andreeva N., Petukhov A., Vilkov O. et al. Local Electric Property Modification of Ferroelectric Tunnel Junctions Induced by Variation of Polarization Charge Screening Conditions under Measurement with Scanning Probe Techniques, *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 12, 3323.
15. Andreeva N. V., Petru A., Vilkov O. Y., Petukhov A. E. Structure-resistive property relationships in thin ferroelectric BaTiO₃ films, *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, no. 1, 15848.
16. Kim Y., Bae C., Ryu K. et al. Origin of surface potential change during ferroelectric switching in epitaxial PbTiO₃ thin films studied by scanning force microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 94, no. 3, 032907.
17. Brinkman W. F., Dynes R. C., Rowell J. M. Tunneling Conductance of Asymmetrical Barriers, *J. Appl. Phys.*, 1970, vol. 41, no. 5, pp. 1915–1921.
18. Peter F. Piezoresponse Force Microscopy and Surface Effects of Perovskite Ferroelectric Nanostructures. Forschungszentrum Jülich GmbH: Jülich, Germany, 2006, vol. 11, 125 p.
19. Wang Z., Zhao W., Kang W. et al. A physics-based compact model of ferroelectric tunnel junction for memory and logic design, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, vol. 47, no. 4, 045001.
20. Andreeva N. V. Fiziko-tehnologicheskie osnovy memristivnykh nanosloevykh kompozitsiy dlya analogovykh neyromorfnykh elektronnykh sistem. Thesis for the degree of Doctor of Science. ETU "LETI". St. Petersburg, 2022. 303 p (in Russian).
21. Andreeva N. V., Petrov A. A., Petru A. et al. Mechanisms of electron transport in BaTiO₃ ultrathin epitaxial films in the temperature range 40 K–295 K, *Mater. Res. Express*, 2019, vol. 6, no. 2, 026427.
22. Simmons J. G. Electric Tunnel Effect between Dissimilar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film, *J. Appl. Phys.*, 1963, vol. 34, no. 9, pp. 2581–2590.

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

УДК 621.797

DOI: 10.17587/nmst.25.61-68

Е. С. Рембеза¹, д-р физ.-мат. наук, проф., rembeza@phys.vsu.ru,

Т. В. Свистова^{2*}, канд. техн. наук, доц., svistamara@yandex.ru,

Н. Н. Кошелева², канд. техн. наук, доц., nndirda@yandex.ru,

Д. С. Пермяков², аспирант, Dima.P.S@yandex.ru,

М. В. Гречкина¹, зав. лаб., grechkina_m@mail.ru,

Т. Г. Меньшикова², канд. физ.-мат. наук, доц., menshikova.vrn@mail.ru,

С. А. Ромасев³, инженер-технолог

¹ Воронежский государственный университет, г. Воронеж

² Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

³ АО "Воронежский завод полупроводниковых приборов — Сборка", г. Воронеж

СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ОКСИДА МЕДИ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ГАЗОВ

Поступила в редакцию 01.12.2022

Тонкие пленки оксида меди были изготовлены золь-гель методом. Пленки имеют мелкозернистую структуру. После отжига при температурах 400 и 500 °C происходит уменьшение размера зерен. Пленки имеют высокие значения газовой чувствительности (изменение сопротивления 30 %) и низкие значения температуры максимальной газовой чувствительности (180...190) °C карам этанола, ацетона, аммиака в воздухе.

Ключевые слова: оксид меди, золь-гель метод, электрические свойства, оптические свойства, газовая чувствительность

Введение

Оксид меди CuO — нетоксичный прямозонный полупроводниковый материал с проводимостью *p*-типа, высоким коэффициентом поглощения для видимого света и шириной запрещенной зоны 1,4...2,9 эВ [1—3]. CuO имеет моноклинную кристаллическую решетку [4]. Свойства оксида меди очень сильно зависят от метода изготовления. Пленку CuO можно синтезировать такими методами как золь-гель метод [5, 6], сольватермическое, термическое испарение, гидротермический и микроволновый гидротермальный, ультразвуковой распылительный пиролиз и электроосаждения [7, 8] и т. д. Преимуществами оксида меди перед другими оксидами является низкая стоимость, химическая стойкость, простота изготовления пленок.

Этот материал можно применять в газовых датчиках [9—11], солнечной энергетике [12, 13], фотокatalитических расщепителях воды [1] и других полупроводниковых приборах и аналитических устройствах.

Цель работы — исследование электрофизических свойств и газовой чувствительности тонких пленок оксида меди, изготовленных золь-гель методом, и оценка возможности их применения в качестве чувствительного элемента датчика газа.

Материалы и методы эксперимента

Для приготовления тонких пленок CuO был использован золь-гель метод на основе ацетата меди ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), изопропилового спирта ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) и диэтиламина ($(\text{CH}_3\text{CH}_2)_2\text{NH}$). Ацетат

меди растворяли в изопропиловом спирте в концентрации 0,1 моль/л. Перемешивание проводили на магнитной мешалке 1 ч при комнатной температуре. Для стабилизации раствора использовали диэтиламин, который добавляли покапельно (0,1 мл/мин) при непрекращающемся перемешивании до молярной концентрации 0,01 М. После добавления диэтиламина раствор дополнитель но перемешивали 30 мин. В качестве подложек использовали предметные стекла, которые были очищены дистиллированной водой и изопропиловым спиртом в ультразвуковой ванне. Нанесение пленки осуществляли центрифугированием при скорости 1500 об/мин в течение 75 с. Пленки наносили в 2, 4, 8 слоев с сушкой между слоями 10 мин при 250 °C [14]. Затем пленки отжигали группами в квазизамкнутом объеме при температурах 300, 400, 500, 600 °C. Сопротивление образцов контролировали в процессе отжига с помощью пишущего мультиметра АКТАКОМ АМ-1109.

Толщину пленок измеряли на интерференционном микроскопе МИИ-4.

Оптические параметры исследовали на спектрофотометре СПЕКС ССП-715-М. Экспериментально измерена зависимость коэффициента пропускания T от длины волны λ , затем был рассчитан коэффициент поглощения α и построена зависимость в координатах $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$, из которой рассчитывали коэффициент поглощения и оценивали ширину запрещенной зоны.

Поверхностное сопротивление измеряли на вычислительно-измерительном комплексе для определения удельного и поверхностного электросопротивления четырехзондовым методом ВИК-УЭС.

Термозондовым методом был определен p -тип проводимости пленок.

Фазовый состав пленок исследовали на рентгеновском дифрактометре Bruker DIFFRAC EVA3.0 с помощью CuK_α -излучения по стандартной методике с использованием базы данных ICDD PDF2012. Размер зерен поликристаллов оценивали по формуле Дебая—Шеррера.

Представление о микрорельефе поверхности исследуемых тонких пленок позволило получить сканирование на атомно-силовом микроскопе Femto-Scan-001 в Центре коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета. Разрешающая способность данного метода составила 0,1...1 нм по горизонтали и 0,01 нм по вертикали. Визуализацию проводили средствами компьютерной графики в виде 3D и 2D изображений. Точность подведения иглы — 2 Å. Погрешность измерений — до 2,5 %.

Газовую чувствительность определяли как отношение сопротивления пленки в парах исследуемого вещества (R_t) к сопротивлению пленки в чистом воздухе (R_b): $S_g = R_t/R_b$.

Результаты и их обсуждение

Пленки CuO имеют толщину 0,5...0,8 мкм в зависимости от числа слоев, высокую однородность, темно-коричневый цвет и поверхностное сопротивление порядка 600 МОм/□.

Методом рентгенофазового анализа установлено, что основной фазой в исследуемых пленках является CuO (рис. 1). Установлено, что пленки непосредственно после изготовления практически не кристаллизованы, так как в них наблюдается единственный рефлекс, соответствующий CuO (110) 31,7°. В результате отжига пленок при 400 и 500 °C происходит кристаллизация и проявляются рефлексы: (110) на 31,7°, (-111) на 35,5°, (111) на 38,8°, соответствующие CuO [15].

Средний размер зерен, оцененный по дифрактограммам по формуле Дебая—Шеррера, составил для пленки CuO непосредственно после изготовления 25,4 нм, для пленки CuO после отжига при 400 °C — 20,1 нм, для пленки CuO после отжига при 500 °C — 20,9 нм. Обнаружено, что с ростом температуры отжига происходит уменьшение размера зерна, это свидетельствует о кристаллизации пленки и способствует улучшению газочувствительных свойств.

Оптические свойства пленок оксида меди оценивали с точки зрения их прозрачности в види-

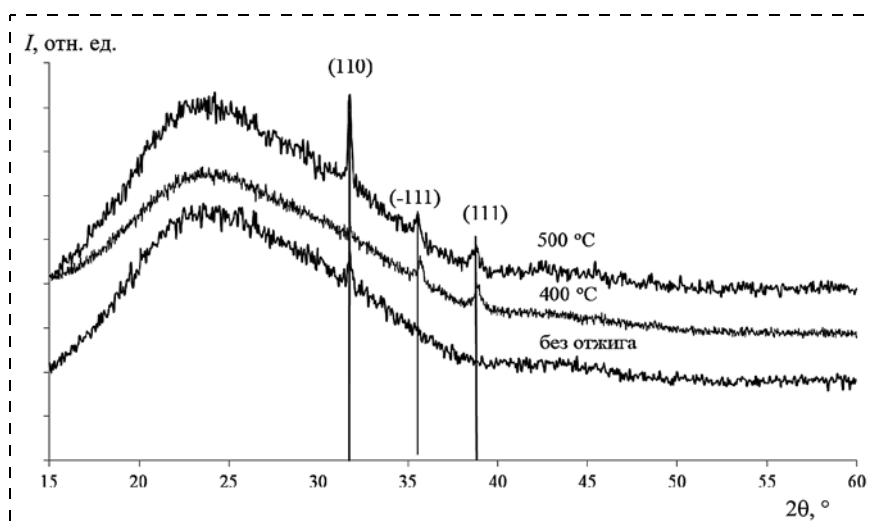


Рис. 1. Дифрактограммы для пленок CuO после изготовления (без отжига) и после отжига при 400, 500 °C в течение 1 ч

мом диапазоне света и значений ширины запрещенной зоны. На рис. 2 приведен спектр пропускания пленки CuO (четыре слоя, после отжига при 400 °C). Как следует из экспериментальных резуль-

татов, прозрачность в видимом диапазоне имеет значения в диапазоне $T = 30\ldots67\%$.

Край полосы поглощения для прямых межзонных переходов $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ в зависимости от

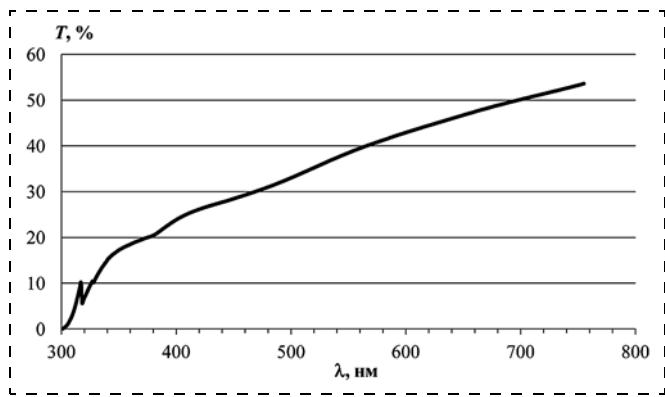


Рис. 2. Спектр пропускания пленки CuO (четыре слоя, отжиг при 400 °C)

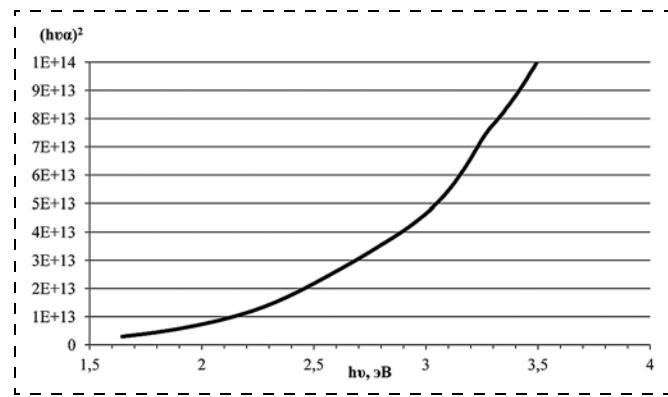


Рис. 3. Спектр поглощения пленки CuO (четыре слоя, отжиг при 400 °C) в координатах $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$

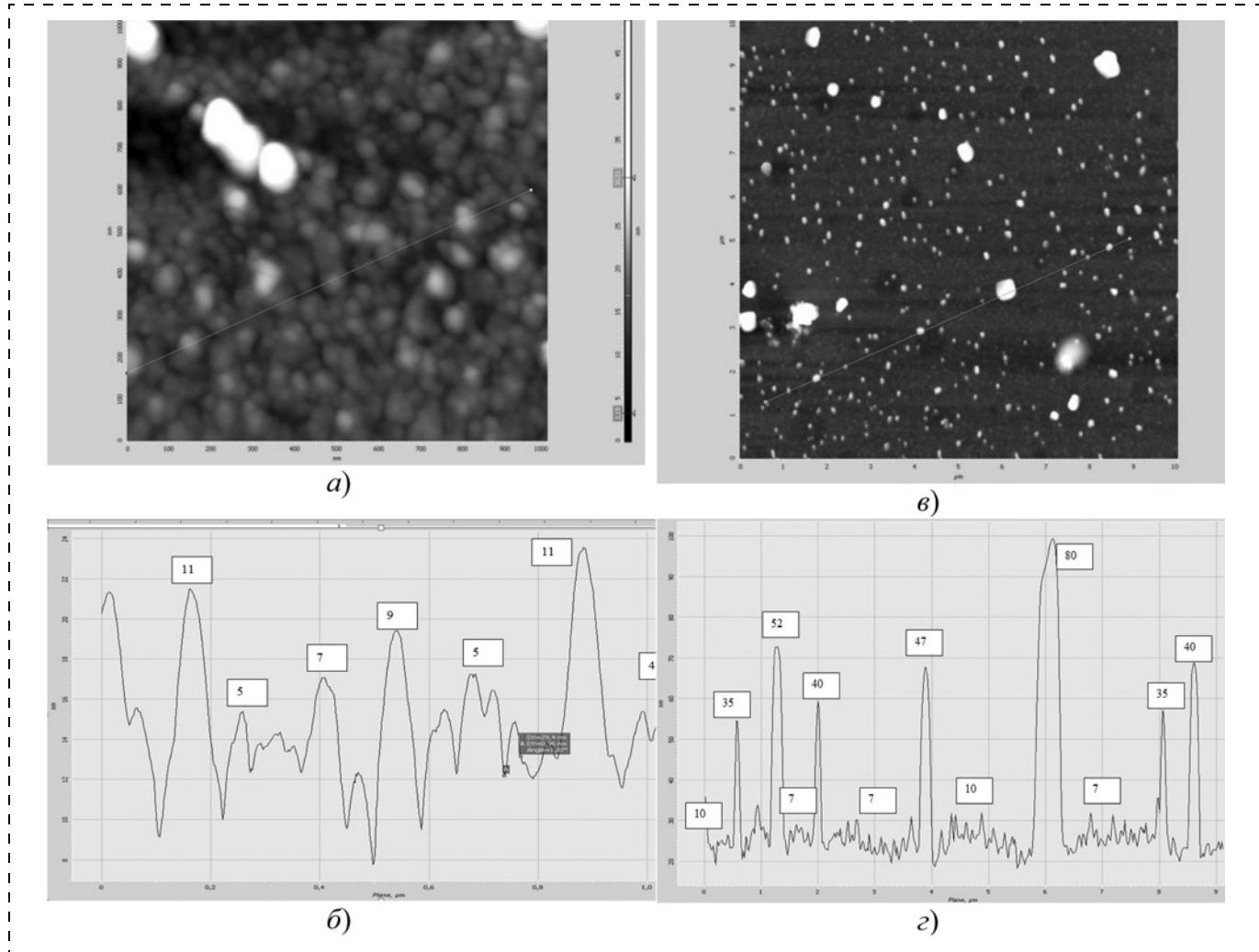


Рис. 4. Изображения микрорельефа (а) и профили распределения (б) поверхности для площади 1×1 мкм; для площади 10×10 мкм (в) и (г) пленки CuO (четыре слоя, отжиг при 300 °C)

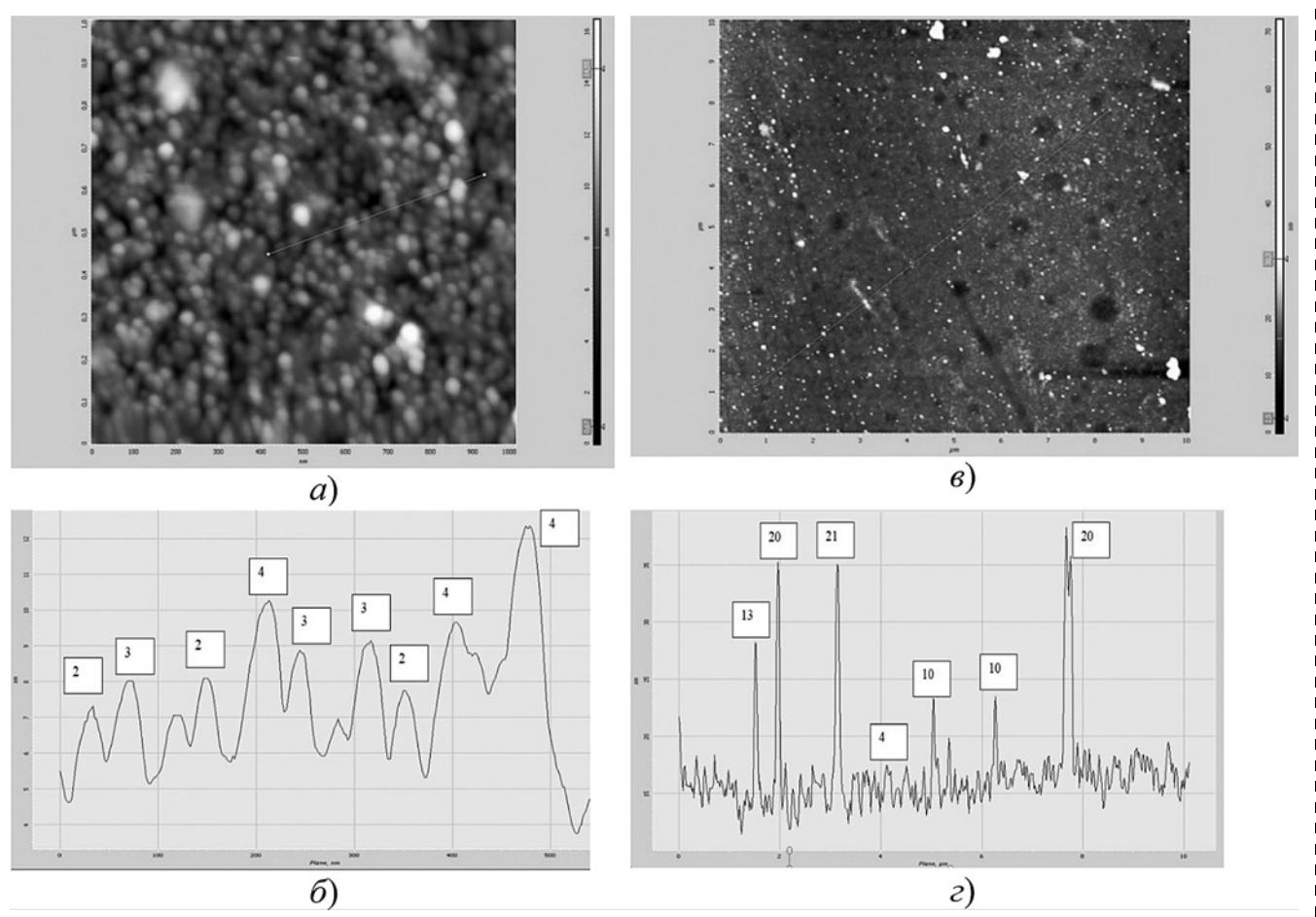


Рис. 5. Изображения микрорельефа (а) и профиля распределения (б) поверхности для площади 1×1 мкм; для площади 10×10 мкм (в) и (г) пленки CuO (четыре слоя, отжиг при 400°C)

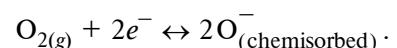
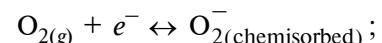
энергии световых квантов приведен на рис. 3. Оценка ширины запрещенной зоны дает значение 1,9 эВ.

Сканирование поверхности образцов с использованием атомно-силового микроскопа позволило получить представление о микрорельефе поверхности исследуемых тонких пленок CuO. Пленка CuO, отожженная при 300°C (рис. 4), имеет мелкозернистую структуру со средним значением шероховатости 8 нм и с крупными включениями размером от 35 до 80 нм. Пленка CuO, отожженная при 400°C (рис. 5), имеет мелкозернистую структуру со средним значением шероховатости 4 нм и с крупными включениями размером от 10 до 20 нм. Пленка CuO, отожженная при 500°C (рис. 6), также имеет мелкозернистую структуру со средним значением шероховатости 4 нм и с крупными включениями размером от 10 до 20 нм.

Установлено, что для исследуемых пленок на основе оксида меди, изготовленных золь-гель методом, при увеличении температуры отжига от 300 до 400°C происходит уменьшение размера шероховатости. С уменьшением шероховатости пленки

увеличивается площадь поверхности, контактирующая с газовой фазой, что способствует улучшению газочувствительных свойств.

Проведены исследования температурной зависимости сопротивления пленок (рис. 7) и их газовой чувствительности к парам этилового спирта, ацетона и аммиака в воздухе (рис. 8). Температурная зависимость сопротивления имеет характерный для полупроводниковых материалов вид — уменьшается с увеличением температуры. В парах этилового спирта в воздухе сопротивление пленки увеличивается, что характерно для полупроводников *p*-типа. Объяснить это можно следующим образом [16, 17]. Адсорбция молекул газа O_2 , диссоциация на атом кислорода и ионизация кислорода путем взятия электронов с поверхности CuO приводят к образованию отрицательно заряженных поверхностных ионов кислорода:



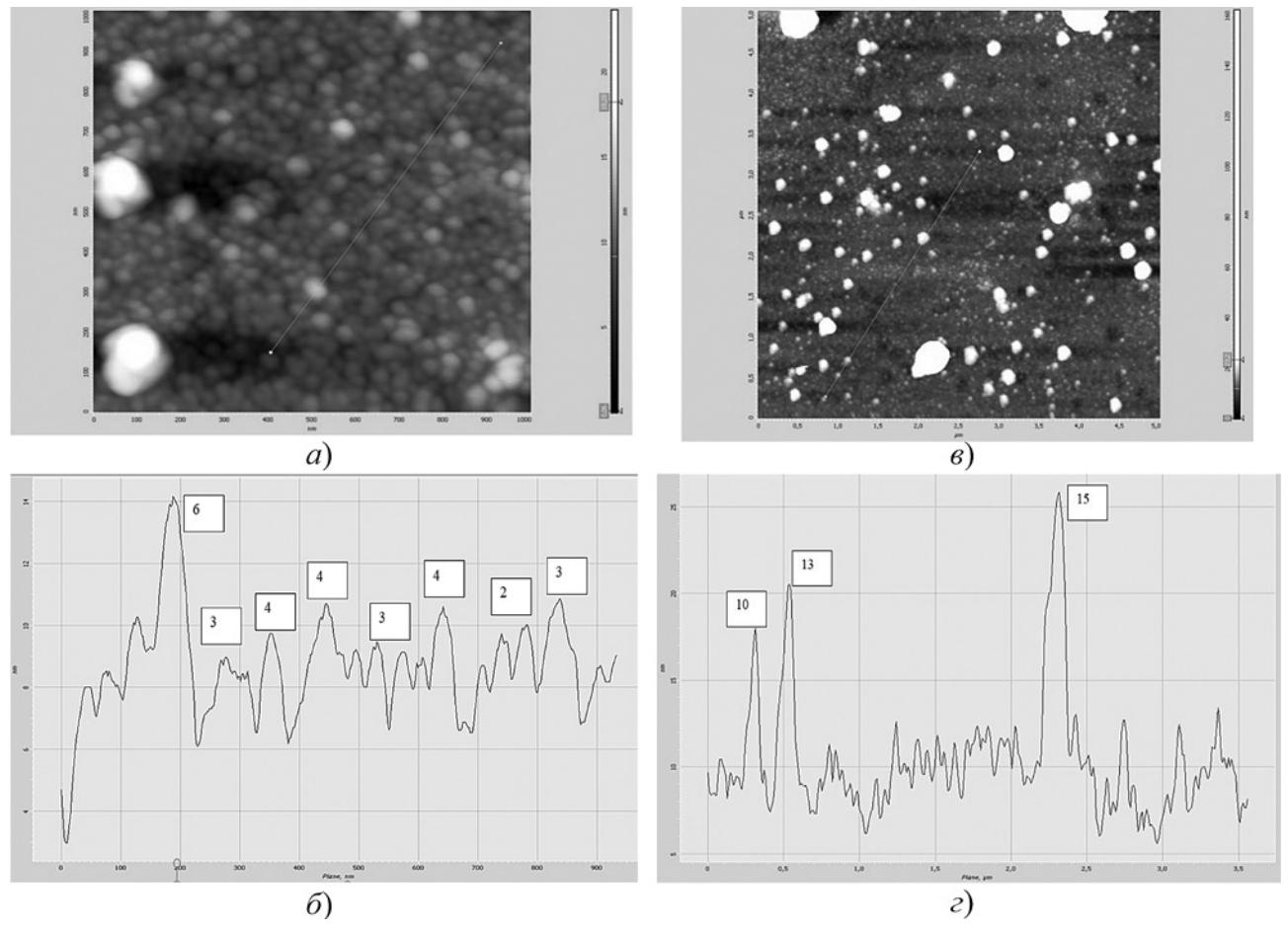


Рис. 6. Изображения микрорельефа (а) и профиля распределения (б) поверхности для площади $1 \times 1 \text{ мкм}$; для площади $10 \times 10 \text{ мкм}$ (с) и (д) пленки CuO (четыре слоя, отжиг при 500°C)

Адсорбция этого кислорода с отрицательным зарядом на оксидных полупроводниках *p*-типа, таких как CuO, приводит к образованию дырочного слоя вблизи поверхности. Когда в окружающей атмосфере присутствуют восстановительные газы, такие как $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CH_3OH и др., реакция между восстановительным газом и отрицательно заряженным поверхностью кислородом высвобождает электрон, что, в свою очередь, увеличивает сопротивление полупроводника *p*-типа методом электронно-дырочной рекомбинации в соответствии с уравнением:

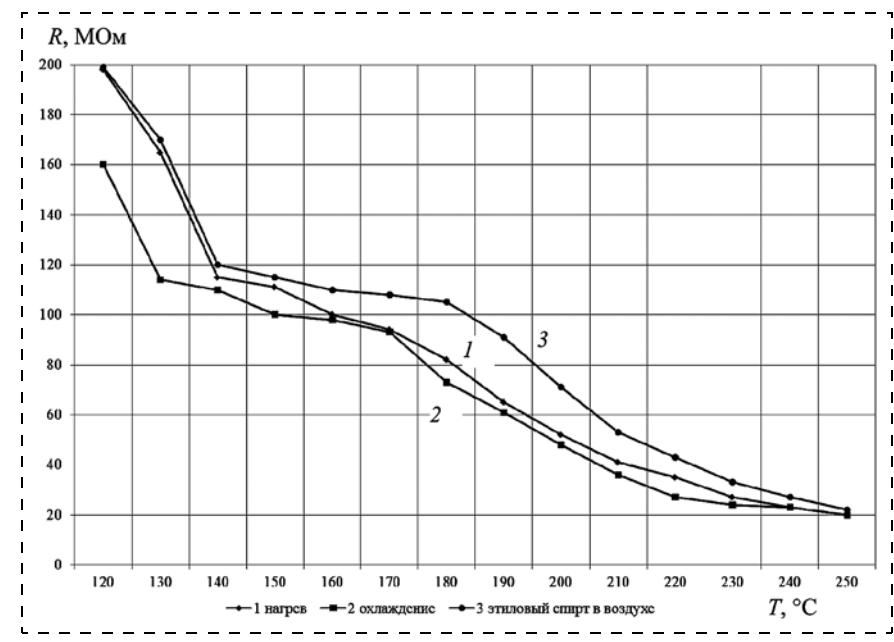
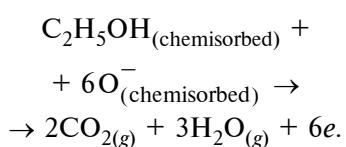


Рис. 7. Температурные зависимости сопротивления пленки CuO (четыре слоя, отжиг при 400°C) при нагреве (1) и охлаждении (2) на воздухе и при нагреве в парах этилового спирта (12700 ppm) в воздухе (3)

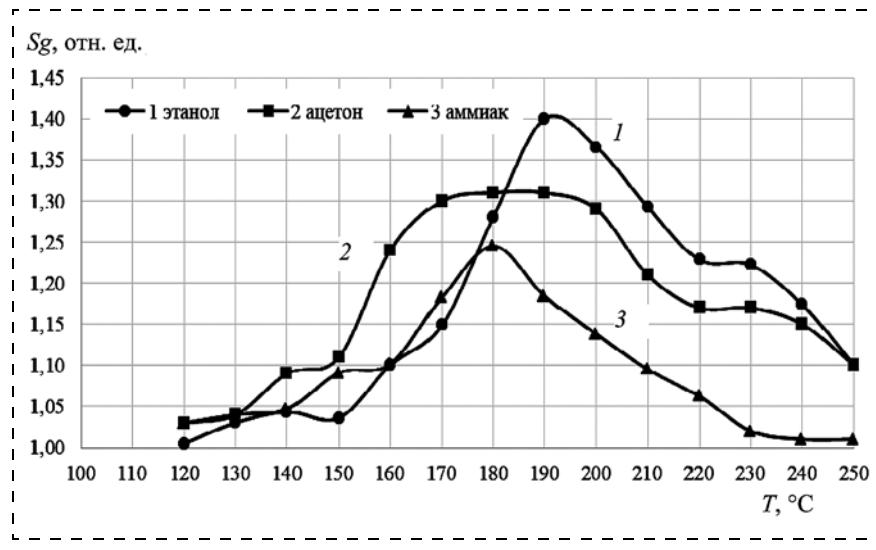


Рис. 8. Температурная зависимость газовой чувствительности пленки оксида меди в парах этилового спирта (12 700 ppm), ацетона (14 100 ppm), аммиака (15 300 ppm) в воздухе

На рис. 8 приведены результаты исследования температурной зависимости газовой чувствительности пленок к парам этилового спирта, ацетона и аммиака в воздухе.

Установлено, что температура максимальной газовой чувствительности пленок CuO (после отжига при 400 °C) к парам этилового спирта в воздухе — 190 °C, к парам ацетона в воздухе — 190 °C, к парам аммиака в воздухе — 180 °C. Такие значения температуры максимальной газовой чувствительности на 100—150 °C ниже аналогичных значений для широко распространенных газочувствительных слоев, например SnO₂ [18—20]. Газовая чувствительность к парам этилового спирта (12 700 ppm) в воздухе пленки CuO, изготовленной золь-гель методом, составляет 1,38 отн. ед., к парам ацетона (14 100 ppm) 1,31 отн. ед., к парам аммиака (15 300 ppm) 1,26 отн. ед. Таким образом, очевидно, что пленки оксидов меди можно использовать в качестве чувствительного слоя газовых сенсоров.

Заключение

Синтез пленок оксидов меди был осуществлен золь-гель методом, который отличается дешевизной и простотой технологического процесса.

Средний размер зерен в пленках CuO, оцененный по формуле Дебая—Шеррера, составил 20...25 нм в зависимости от режима отжига.

При увеличении температуры отжига от 300 до 400 °C в пленках CuO происходит уменьшение размера шероховатости от мелкозернистой структуры со средним значением шероховатости 8 нм и с крупными включениями размером 35...80 нм до

мелкозернистой структуры со средним значением шероховатости 4 нм и с крупными включениями размером 10...20 нм.

Пленки CuO (четыре слоя, отжиг 400 °C) имеют пропускание около 70 % и ширину запрещенной зоны 1,9 эВ.

Зависимость сопротивления пленок CuO от температурыносит полупроводниковый характер. Сопротивление пленок оксида меди в парах этилового спирта, ацетона и аммиака увеличивается по сравнению с сопротивлением на воздухе. Пленки оксидов меди проявляют устойчивую чувствительность к парам этилового спирта, аммиака и ацетона в воздухе в области температур 180...190 °C.

Таким образом, пленки оксида меди подходят для применения в качестве чувствительного элемента датчика газа.

Список литературы

- Yang Y., Xu D., Wu Q. Cu₂O/CuO bilayered composite as a high-efficiency photocathode for photoelectrochemical hydrogen evolution reactions // Scientific reports. 2016. Vol. 6. P. 35158.
- Lee Y. S., Winkler M. T., Ch. Siah S. et al. Hall mobility of cuprous oxide thin films deposited by reactive direct-current magnetron sputtering // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 192115.
- Rakhshani A. E. Preparation, Characteristics and Photo-voltaic Properties of Cuprous Oxide: A Review // Solid-State Electron. 1986. Vol. 29. P. 7—17.
- Liang J. B., Li X. Y., Kishi N. et al. Single phase CuO thin films prepared by thermal oxidation in air with water vapor // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 1109. P. 544—548.
- Baturay S., Tombakb A., Batibay D. N-type conductivity of CuO thin films by metal doping // Applied Surface Science. 2019. Vol. 477. P. 91—95.
- Ray S. C. Preparation of copper oxide thin film by the sol-gel-like dip technique and study of their structural and optical properties // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2001. Vol. 68. P. 307—312.
- Yang C., Su X., Xiao F. et al. Gas sensing properties of CuO nanorods synthesized by a microwave-assisted hydrothermal method // Sensors Actuators B Chem. 2011. Vol. 158. P. 299—303.
- Singh I., Bedi R. K. Studies and correlation among the structural, electrical and gas response properties of aerosol spray deposited itself assembled nanocrystalline CuO // Appl. Surf. Sci. 2011. Vol. 257. P. 7592—7599.
- Hu J., Zou C., Su Y. et al. An ultrasensitive NO₂ gas sensor based on a hierarchical Cu₂O/CuO mesocrystal nano-flower // Journal of Materials Chemistry A. 2018. Vol. 6, N. 35. P. 17120—17131.
- Rydosz A. Amorphous and Nanocrystalline Magnetron Sputtered CuO Thin Films Deposited on Low Temperature Cofired Ceramics Substrates for Gas Sensor Applications // IEEE Sens. J. 2014. Vol. 14. P. 1600—1607.

11. Мoiseeva T. A., Mysedova T. N., Petrov B. V., Кошельева Н. Н. Разработка газочувствительного элемента на основе пленок оксидов меди для датчика аммиака // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-2 (23). С. 6.
12. Wong T. K. S., Zhuk S., Masudy-Panah S. et al. Current Status and Future Prospects of Copper Oxide Heterojunction Solar Cells // Materials (Basel). 2016. Vol. 9 (4). P. 271–292.
13. Fujimoto K., Oku T., Akiyama T., Suzuki A. Fabrication and characterization of copper oxide-zinc oxide solar cells prepared by electrodeposition // J. of Phys.: Conf. Ser. 2013. Vol. 433. P. 012024.
14. Пермяков Д. С., Меньшикова Т. Г. Влияние режима термообработки на электрофизические свойства пленок CuO, приготовленных золь-гель методом // Твердотельная электроника, микроэлектроника и наноэлектроника: межвуз. сб. науч. тр. 2019. Вып. 18. С. 98–102.
15. Полковников В. Е., Пермяков Д. С., Рембеза С. И., Меньшикова Т. Г. Исследование влияния изотермического отжига на параметры металлооксидных пленок CuO, изго-
- товленных спрей-пиrolизом и золь-гель методом // Известия РАН. Сер. Физическая. 2020. Т. 84, № 9. С. 1282–1285.
16. Смирнов А. В. Васильев А. И., Платонов П. С. и др. Синтез и исследование газочувствительных свойств тонких пленок оксида меди // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 53–57.
17. Gurlo A. Interplay between O₂ and SnO₂: Oxygen ion-sorption and Spectroscopic Evidence for Adsorbed Oxygen // ChemPhysChem. 2006. N. 7. P. 2041–2052.
18. Рембеза С. И., Свистова Т. В., Рембеза Е. С., Борсякова О. И. Микроструктура и физические свойства тонких пленок SnO₂ // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35, № 7. С. 796–800.
19. Рембеза С. И., Свистова Т. В., Рембеза Е. С., Борсякова О. И. Свойства нанокристаллических пленок SnO₂ для датчиков газов // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 14–18.
20. Кошельева Н. Н. Материал чувствительного элемента на основе диоксида олова для датчика газов // Нано- и микросистемная техника. 2022. Т. 24, № 5. С. 247–252.

E. S. Rembeza¹, D. Sc., Professor, e-mail: rembeza@phys.vsu.ru,
T. V. Svistova^{2*}, Ph. D., Associate Professor, e-mail: svistamara@yandex.ru,
N. N. Kosheleva², Ph. D., Associate Professor, e-mail: nndirda@yandex.ru,
D. S. Permyakov², Postgraduate, e-mail: Dima.P.S@yandex.ru,
M. V. Grechkina¹, Head of the Laboratory, e-mail: grechkina_m@mail.ru,
T. G. Menshikova², Ph. D., Associate Professor, e-mail: menshikova.vrn@mail.ru,
S. A. Romasev³, Process Engineer

¹ Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation

² Voronezh State Technical University, Voronezh, 394006, Russian Federation

³ Voronezh Semiconductor Device Factory-Assembly, Voronezh, 394007, Russian Federation

Corresponding author:

Tamara V. Svistova, Ph. D., Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, 394006, Russian Federation, e-mail: svistamara@yandex.ru

Synthesis and Electrophysical Properties of Copper Oxide Films for Gas Sensors

Received on December 01, 2022
Accepted on December 26, 2022

Thin films of copper oxide were fabricated by sol-gel method. For the preparation of CuO thin films, a sol-gel method based on copper acetate ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$), isopropyl alcohol (C_3H_8O) and diethylamine ($(CH_3CH_2)_2NH$) was used. The film was applied by centrifugation at a speed of 1500 rpm for 75 seconds. The films were applied in 2, 4, 8 layers with drying between layers for 10 minutes at 250 °C. The thermal probe method was used to determine the p-type of conductivity of the films. The films were annealed at temperatures of 300, 400, 500, 600 °C. By method of X-ray phase analysis, it was found that the main phase in the films is CuO. On films without additional annealing, a single reflex corresponding to CuO (110) 31.7° is observed. After annealing the films at 400 and 500 °C, crystallization occurs and reflexes manifest: (110) by 31.7°, (-111) by 35.5°, (111) by 38.8°, corresponding to CuO. It was found that with an increase in the annealing temperature, the grain size decreases, which indicates the crystallization of the film and contributes to the improvement of gas-sensitive properties. The transparency of the films in the visible range has values $T = 30–67\%$. The width of the gap is estimated to be 1.9 eV. According to AFM data, the films have a fine-grained structure and with an increase in the annealing temperature from 300 °C to 400 °C, the size of the roughness decreases. The films have high gas sensitivity values (resistance change of 30 %) and low temperature values of maximum gas sensitivity (180–190) °C to ethanol, acetone, ammonia vapors in the air.

Keywords: copper oxide, sol-gel method, electrical properties, optical properties, gas sensitivity

For citation:

Rembeza E. S., Svistova T. V., Kosheleva N. N., Permyakov D. S., Grechkina M. V., Menshikova T. G., Romasev S. A. Synthesis and Electrophysical Properties of Copper Oxide Films for Gas Sensors, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 61–68.

DOI: 10.17587/nmst.25.61-68

References

1. Yang Y., Xu D., Wu Q. Cu₂O/CuO bilayered composite as a high-efficiency photocathode for photoelectrochemical hydrogen evolution reactions, *Scientific reports*, 2016, vol. 6, pp. 35158.
2. Lee Y. S., Winkler M. T., Ch. Siah S. et al. Hall mobility of cuprous oxide thin films deposited by reactive direct-current magnetron sputtering, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, p. 192115.
3. Rakshani A. E. Preparation, Characteristics and Photo voltaic Properties of Cuprous Oxide: A Review, *Solid-State Electron*, 1986, vol. 29, pp. 7–17.
4. Liang J. B., Li X. Y., Kishi N. et al. Single phase CuO thin films prepared by thermal oxidation in air with water vapor, *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1109, pp. 544–548.
5. Baturay S., Tombakk A., Batibay D. N-type conductivity of CuO thin films by metal doping, *Applied Surface Science*, 2019, vol. 477, pp. 91–95.
6. Ray S. C. Preparation of copper oxide thin film by the sol-gel-like dip technique and study of their structural and optical properties, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2001, vol. 68, pp. 307–312.
7. Yang C., Su X., Xiao F. et al. Gas sensing properties of CuO nanorods synthesized by a microwave-assisted hydrothermal method, *Sensors Actuators B Chem.*, 2011, vol. 158, pp. 299–303.
8. Singh I., Bedi R. K. Studies and correlation among the structural, electrical and gas response properties of aerosol spray deposited itself assembled nanocrystalline CuO, *Appl. Surf. Sci.*, 2011, vol. 257, pp. 7592–7599.
9. Hu J., Zou C., Su Y. et al. An ultrasensitive NO₂ gas sensor based on a hierarchical Cu₂O/CuO mesocrystal nanoflower, *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, vol. 6, no. 35, pp. 17120–17131.
10. Rydosz A. Amorphous and Nanocrystalline Magnetron Sputtered CuO Thin Films Deposited on Low Temperature Cofired Ceramics Substrates for Gas Sensor Applications, *IEEE Sens. J.*, 2014, vol. 14, pp. 1600–1607.
11. Moiseeva T. A., Mjasoedova T. N., Petrov V. V. Koshleva N. N. Razrabotka gazochuvstvitelnogo jelementa na osnove plenok oksidov medi dlja datchika ammiaka, *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2012, no. 4-2 (23), p. 6 (in Russian).
12. Wong T. K. S., Zhuk S., Masudy-Panah S. et al. Current Status and Future Prospects of Copper Oxide Heterojunction Solar Cells, *Materials (Basel)*, 2016, vol. 9 (4), pp. 271–292.
13. Fujimoto K., Oku T., Akiyama T., Suzuki A. Fabrication and characterization of copper oxide-zinc oxide solar cells prepared by electrodeposition, *J. of Phys.: Conf. Ser.*, 2013, vol. 433, p. 012024.
14. Permjakov D. S., Men'shikova T. G. Vlijanie rezhma termoobrabotki na elektrofiziche-skie svojstva plenok CuO, prigotovlennyh zol'-gel' metodom, *Tverdotel'naja elektronika, mikrojelektronika i nanojelektronika: mezhvuz. sb. nauch. tr.*, 2019, no. 18, pp. 98–102 (in Russian).
15. Polkovnikov V. E., Permjakov D. S., Rembeza S. I., Men'shikova T. G. Issledovanie vlijanja izotermicheskogo otzhiga na parametry metallooksidnyh plenok CuO, izgotovленnyh sprej-pirolizom i zol'-gel' metodom, *Izvestija RAN. Ser. Fizicheskaja*, 2020, vol. 84, no. 9, pp. 1282–1285 (in Russian).
16. Smirnov A. V., Vasil'ev A. I., Platonov P. S. i dr. Sintez i issledovanie gazochuvstvitel'nyh svojstv tonkih plenok oksida medi, *Prikladnaja fizika*, 2020, no. 1, pp. 53–57 (in Russian).
17. Gurlo A. Interplay between O₂ and SnO₂: Oxygen ionosorption and Spectroscopic Evidence for Adsorbed Oxygen, *ChemPhysChem*, 2006, no. 7, pp. 2041–2052.
18. Rembeza S. I., Svistova T. V., Rembeza E. S., Borsjkova O. I. Mikrostruktura i fizicheskie svojstva tonkih plenok SnO₂, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2001, vol. 35, no. 7, pp. 796–800 (in Russian).
19. Rembeza S. I., Svistova T. V., Rembeza E. S., Borsjkova O. I. Svojstva nano-kristallicheskikh plenok SnO₂ dlja datchikov gazov, *Mikrosistemnaja tehnika*, 2001, no. 7, pp. 14–18 (in Russian).
20. Kosheleva N. N. Material chuvstvitelnogo jelementa na osnove dioksida olova dlja datchika gazov, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2022, vol. 24, no. 5, pp. 247–252 (in Russian).

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.3.049.77.002.5

DOI: 10.17587/nmst.25.69-78

В. П. Драгунов, д-р техн. наук, нач. отд., e-mail: drag@adm.nstu.ru,
Д. И. Остертак, канд. техн. наук, зав. каф., e-mail: ostertak@ngs.ru,
Р. Е. Синицкий, аспирант, e-mail: sinitskiy.rodion@yandex.ru,
Е. В. Драгунова, канд. экон. наук, доцент, e-mail: dragunova@corp.nstu.ru
Новосибирский государственный технический университет

ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ КОНДЕНСАТОРАХ ДЛЯ МЭМ ГЕНЕРАТОРОВ

Поступила в редакцию 12.12.2022

Представлены результаты моделирования работы делителей напряжения на переключаемых конденсаторах с диодной и транзисторно-диодной коммутацией для МЭМ генераторов. Установлено, что у делителя с диодной коммутацией конденсаторов коэффициент деления напряжения при изменении сопротивления нагрузки не сохраняется, и при больших сопротивлениях нагрузки значение напряжения нагрузки асимптотически приближается к V_0 , а не к V_0/N . В то же время делитель с транзисторно-диодной коммутацией конденсаторов при больших сопротивлениях нагрузки позволяет получать выходное напряжение V_L в N раз меньшее напряжения первичного источника питания V_0 . Получены аналитические выражения для оценки параметров делителей с диодной коммутацией, позволяющие рассчитать характеристики делителя на этапе предварительного проектирования МЭМ генераторов с диодно-конденсаторными делителями напряжения. Показано, что моделирование работы диодно-конденсаторного делителя напряжения необходимо проводить с учетом динамических ВАХ диодов. Установлено, что при использовании в качестве зарядного ключа биполярного транзистора, коэффициент пульсаций выходного напряжения меньше, чем при использовании герконового реле.

Ключевые слова: МЭМ генератор, структура с переключаемыми конденсаторами, преобразователь, делитель напряжения, аналитические выражения

Введение

За последние 20 лет извлечение энергии из источников окружающей среды для питания мало-мощных электронных устройств, таких как интеллектуальные носимые системы, биомеханические имплантаты и узлы беспроводных сенсорных сетей, привлекло большое внимание академических и промышленных сообществ [1–6]. При этом, как потенциальный метод замены или метод увеличения срока службы батарей миниатюрных электронных систем, все чаще исследуется извлечение кинетической энергии из окружающей среды.

Кинетическая энергия колебаний и шума окружающей среды, в том числе возникающая в результате человеческой деятельности, является одним из наиболее распространенных источников энергии в окружающей среде. Поэтому значительные

усилия направлены на разработку высокоэффективных харвестеров энергии для преобразования механической кинетической энергии в электрическую. В настоящее время активно разрабатывают и исследуют автономные источники питания на основе электростатических микроэлектромеханических (МЭМ) преобразователей (МЭМП) энергии, расположенных непосредственно в месте размещения автономных устройств, таких как, например, узлы беспроводных сенсорных сетей.

В основе работы электростатических МЭМП лежит изменение емкости переменного конденсатора под действием внешних механических колебаний (вибраций) [4, 7].

Для передачи электрической энергии, полученной с помощью МЭМП, в нагрузку преобразователь включают в состав соответствующих элект-

рических схем (схем сопряжения) [8–11]. Такая система в целом представляет собой своеобразный МЭМ генератор (МЭМГ).

Параметры МЭМГ существенно зависят как от конструкции и характеристик МЭМП, так и от схемы сопряжения. Выбор схемы сопряжения на этапе проектирования МЭМГ является важнейшей задачей, что делает необходимым ее анализ и учет при анализе и оптимизации системы в целом.

Разработка и усовершенствование МЭМП и микрогенераторов на их основе в первую очередь направлены на повышение вырабатываемой электрической энергии и генерируемой мощности. Так как энергия, которая может быть сохранена в конденсаторе и извлечена из него, пропорциональна квадрату напряжения на конденсаторе, для увеличения вырабатываемой электрической энергии и развивающейся мощности наиболее часто разрабатывают электростатические МЭМГ, использующие максимально высокое рабочее напряжение. Использование высокого напряжения особенно актуально в микрогенераторах с силовым возбуждением подвижного электрода МЭМП (исключается эффект схлопывания — *pull-in instability* [12] и проблемы, связанные с условием сохранения положительной жесткости — *spring softening effect* [13]) и при применении специальных мер для исключения электрического пробоя.

Для повышения рабочего напряжения используют МЭМП с электретами, заряженными до нескольких сотен вольт, и специальные схемы на умножителях напряжения, позволяющие генерировать высокое напряжение смещения из изначально низкого напряжения, обеспечивающего, например, батареей или окружающим шумом [13–18].

В то же время большинство современных электронных устройств работают при напряжении питания менее 10 В. Более того, тенденция к миниатюризации электронных схем требует дальнейшего уменьшения их напряжения питания. Поэтому появляется необходимость в разработке МЭМГ с пониженным выходным напряжением, что в случае электростатических МЭМГ требует преобразования высокого напряжения переменного тока в низкое напряжение постоянного тока. Такое преобразование можно выполнить с помощью трансформатора, что существенно ухудшит массогабаритные показатели МЭМГ. В результате наиболее перспективным представляется путь бестрансформаторного преобразования переменного напряжения в постоянное с одновременным совмещением функций различных элементов блок-схемы выпрямителя.

В литературе по силовой электронике встречаются публикации по бестрансформаторным делителям напряжения. Однако в них предполагают, что первичный источник напряжения имеет бес-

конечную мощность (шина бесконечной мощности), а электростатические МЭМГ развивают значительно меньшую мощность. Кроме того, в силовой электронике при работе с большими мощностями потери в системах управления преобразователями оказываются не столь значительными. Поэтому для достижения хороших показателей преобразователя применяют индивидуальное управление каждым транзистором [19, 20], что также неприемлемо в микрогенераторах.

В данной работе приведены результаты исследований по разработке делителя напряжения на переключаемых конденсаторах для электростатических МЭМ генераторов с пониженным выходным напряжением. Особенностью работы таких *DC–DC*-систем с понижением напряжения является изменение их структуры дважды в течение периода частоты коммутации, благодаря чему в течение одной части периода частоты коммутации конденсаторы заряжаются от первичного источника, в течение другой части периода они разряжаются.

Диодно-конденсаторный делитель напряжения

Работа бестрансформаторных низковольтных выпрямителей с делением напряжения на конденсаторах основана на заряде N последовательно соединенных конденсаторов C_i от высоковольтного источника и последующем разряде этих конденсаторов, но уже соединенных параллельно, на нагрузку.

При последовательном заряде N конденсаторов напряжение первичного источника при $C_1 = C_2 = \dots = C_N$ делится практически поровну между ними. В результате напряжение на одном конденсаторе оказывается в N раз меньше амплитуды напряжения первичного источника. При переключении конденсаторов для разряда на нагрузку напряжение на выходе выпрямителя будет равно напряжению на одном конденсаторе, а ток нагрузки будет в N раз больше тока, потребляемого от первичного источника.

Таким образом, конденсаторы с элементами перестройки цепи заряда в цепь разряда и наоборот представляют собой основу схемы накопления и передачи энергии с одновременным делением напряжения.

В результате анализа известных схем делителей на переключаемых конденсаторах [21–27] наиболее перспективной для использования в электростатических микрогенераторах представляется схема деления напряжения с диодной коммутацией, показанная на рис. 1. Она содержит N переключаемых конденсаторов C_i , $(N - 1)$ зарядных диодов D_{ch} и $2(N - 1)$ разрядных диодов D_{dis} .

В работе данного делителя напряжения можно выделить два такта. На первом такте работы (клю-

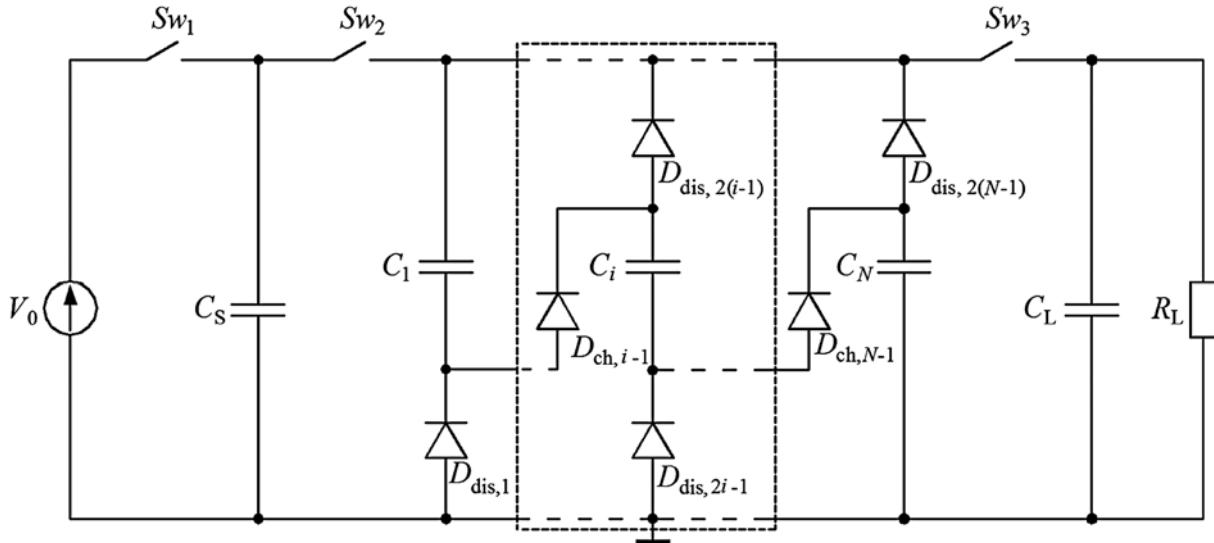


Рис. 1. Электрическая схема бестрансформаторного диодно-конденсаторного делителя напряжения

чи Sw_1 и Sw_3 замкнуты, ключ Sw_2 разомкнут) происходит подзаряд конденсатора C_S от первичного источника V_0 до напряжения V_0 , и одновременно N параллельно включенных конденсаторов C_i разряжаются через $2(N - 1)$ разрядных диода D_{dis} на RC -цепочку нагрузки. На втором такте (ключи Sw_1 и Sw_3 разомкнуты, ключ Sw_2 замкнут) конденсатор C_S разряжается на N уже последовательно включенных конденсаторов C_i через $(N - 1)$ зарядный диод D_{ch} , и происходит заряд C_i . Затем двухтактный цикл работы делителя повторяется.

Такой делитель напряжения можно использовать не только в электростатических МЭМ генераторах, но и в других системах, где требуется понизить напряжение.

Используя модель идеальных диодов и полагая, что значения емкостей всех конденсаторов C_i одинаковы, можно показать, что при периодическом переключении ключей с периодом T зависимость максимального напряжения на R_L (напряжения на R_L в начале такта разряда конденсаторов C_i на RC -цепочку нагрузки) от числа циклов работы делителя можно представить в виде

$$V_{L, \max, m} = V_0 \frac{C_S}{C_i/N + C_S} \frac{C_i}{NC_i + C_L} \frac{1 - gv^m}{1 - gv}, \quad (1)$$

где

$$gv = \frac{1}{NC_i + C_L} \left(\frac{NC_i^2}{C_i + NC_S} + C_L \exp\left(\frac{-(T - \Delta\tau)}{R_L C_L}\right) \right) \times \\ \times \exp\left(\frac{-\Delta\tau}{R_L (NC_i + C_L)}\right).$$

За цикл работы напряжение на нагрузке изменится от максимального $V_{L, \max, m}$ до минимального:

$$V_{L, \min, m} = V_{L, \max, m} K_1 K_2, \quad (2)$$

где $\Delta\tau$ — длительность временного интервала подключения делителя к RC -цепочке нагрузки,

$$K_1 = \exp\left(\frac{-\Delta\tau}{R_L (NC_i + C_L)}\right);$$

$$K_2 = \exp\left(\frac{-(T - \Delta\tau)}{R_L C_L}\right).$$

На рис. 2 приведены зависимости напряжения на нагрузке и на одном (каждом) конденсаторе де-

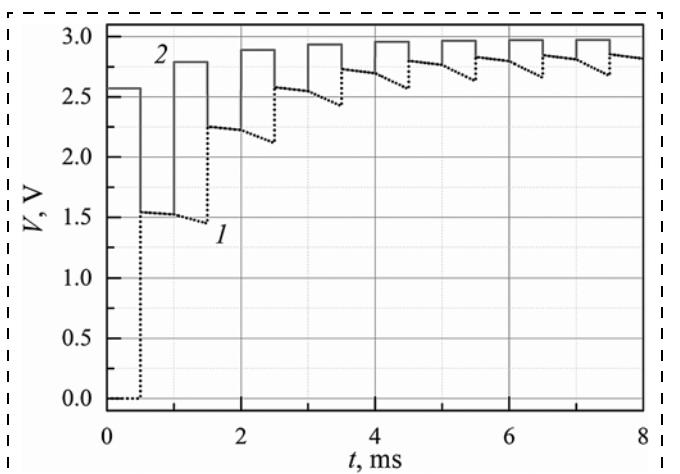


Рис. 2. Зависимости напряжения от времени, рассчитанные при $RL = 10^7$ Ом:

1 — на нагрузке; 2 — на одном (каждом) конденсаторе делителя

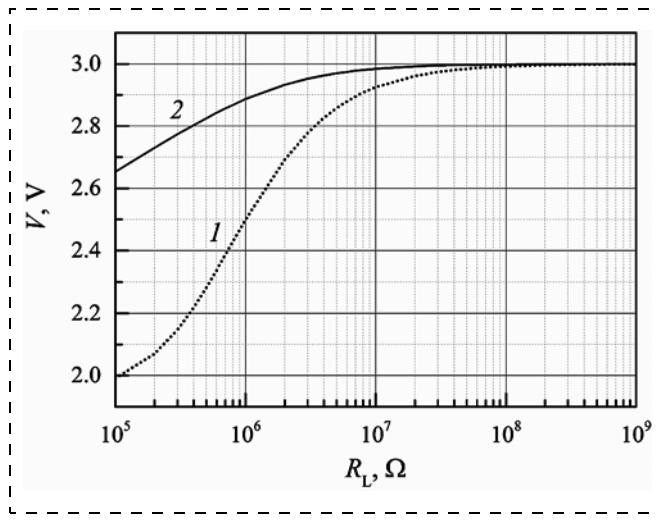


Рис. 3. Зависимости максимального напряжения от сопротивления нагрузки в установившемся режиме:

1 — на нагрузке и 2 — на одном (каждом) конденсаторе делителя C_i

дителя C_i от времени, рассчитанные при $V_0 = 9$ В, $C_L = C_i = 1$ нФ, $T = 0,001$ с, $\Delta\tau = 0,5T$, $C_S = 2$ нФ, $N = 3$ и $R_L = 10^7$ Ом. Видно, что с увеличением времени для обоих напряжений наступает установившийся режим. На рис. 2 также хорошо видны два такта работы делителя. В течение первого такта (ключи Sw_1 и Sw_3 замкнуты, ключ Sw_2 разомкнут) N параллельно включенных конденсаторов C_i и C_L разряжаются на RC -цепочку нагрузки (см. рис. 1) с постоянной времени $\tau_1 = R_L(NC_i + C_L)$. Соответственно, на рис. 2 их кривые совпадают. На втором такте (ключи Sw_1 и Sw_3 разомкнуты, ключ Sw_2 замкнут) конденсатор C_S мгновенно подзаряжает N уже последовательно включенных конденсаторов C_i . После чего напряжение на каждом конденсаторе C_i остается постоянным до конца такта. В это же время конденсатор C_L продолжает разряжаться через R_L , но уже быстрее с постоянной времени $\tau_2 = R_L C_L$. Затем двухтактный цикл работы делителя повторяется с учетом перераспределения зарядов в предыдущем цикле.

На рис. 3 показаны зависимости максимального напряжения на нагрузке и на одном (каждом) конденсаторе делителя C_i в установившемся режиме от сопротивления нагрузки, рассчитанные при тех же параметрах схемы, что и для рис. 2. Заметим, что максимальное напряжение на конденсаторах C_i достигается в момент подключения делителя к конденсатору C_S (ключ Sw_2 замкнут, а Sw_1 и Sw_3 — разомкнут), а на нагрузке — в момент подключения делителя к нагрузке (ключ Sw_3 замкнут, а Sw_2 разомкнут).

Из рис. 3 видно, что максимальное напряжение на нагрузке у данного делителя приближается к значению V_0/N только при больших сопротивле-

ниях нагрузки. Это связано с тем, что при малых R_L выходное напряжение и заряд, накопленный в C_L , к концу цикла преобразования уменьшаются настолько, что не могут быть полностью восстановлены до V_0/N при подключении C_S (заряд на C_S ограничен значением $V_0 C_S$). В результате равновесие между зарядом, отдаваемым в R_L , и зарядом, забираемым делителем из C_S , наступает при напряжении на нагрузке, меньшем, чем V_0/N . Это видно из рис. 4, где показаны зависимости, представленные на рис. 2, но рассчитанные при $R_L = 10^5$ Ом. В этом случае напряжение на нагрузке за цикл работы делителя уменьшается практически до нуля, и каждый раз к началу нового цикла делитель оказывается разряженным до одного и того же напряжения. При этом накопления заряда не происходит, но увеличивается количество заряда, забираемого из C_S .

Для верификации полученных выражений были проведены соответствующие расчеты в программном комплексе OrCAD PSpice с использованием статических ВАХ диодов. На рис. 5 (1, 2, 5, 6) приведены зависимости максимального и минимального напряжений на сопротивлении нагрузки в установившемся режиме от сопротивления нагрузки, рассчитанные с использованием выражений (1), (2) и в программном комплексе OrCAD PSpice, при $V_0 = 9$ В, $C_L = C_i = 1$ нФ, $T = 0,02$ с, $\Delta\tau = 0,002$ с, $C_S = 1$ нФ и $N = 3$.

Видно, что зависимости, полученные в результате аналитических и численных расчетов, качественно согласуются. Однако значения, полученные в результате расчета с использованием программного комплекса OrCAD PSpice, меньше аналити-

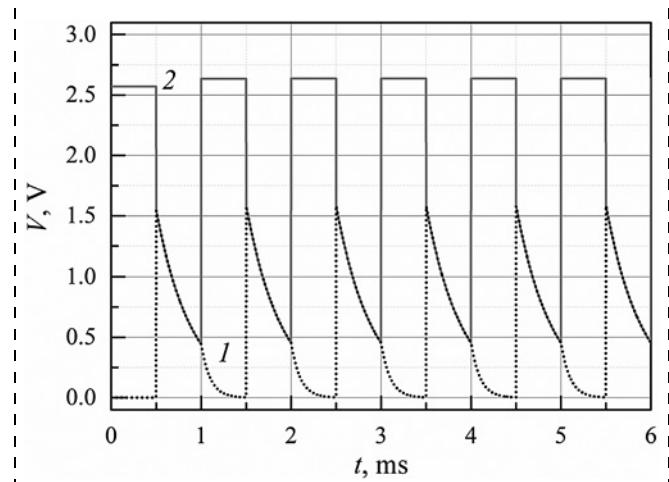


Рис. 4. Зависимости напряжения от времени, рассчитанные при $R_L = 10^5$ Ом:

1 — на нагрузке; 2 — на одном (каждом) конденсаторе делителя

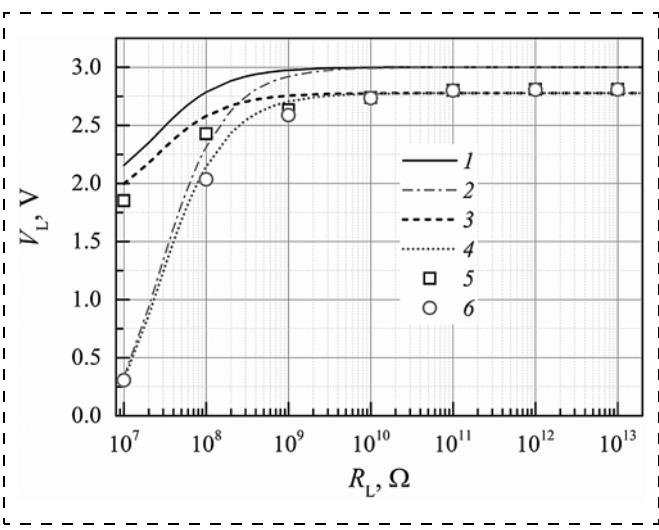


Рис. 5. Зависимости максимального и минимального напряжений на сопротивлении нагрузки в установившемся режиме от сопротивления нагрузки:

1, 3, 5 — результаты расчетов $V_{L, \max}$ с использованием (1), (3) и в PSpice; 2, 4, 6 — результаты расчетов $V_{L, \min}$ с использованием (2), (4) и в PSpice, соответственно

ческих. Мы считаем, что это несоответствие связано с использованием при аналитических расчетах модели идеального диода, в которой диоды открываются при нулевом напряжении. Полагая, что диоды открываются при напряжении V_D , выражения для $V_{L, \max}$ и $V_{L, \min}$ в установившемся режиме принимают следующий вид:

$$V_{L, \max} = \frac{C_i}{C_L(C_i + NC_S)} \times \frac{[NC_S V_0 - 2V_D(N-1)(2C_i + NC_S)]}{\left[1 - K_1 K_2 + N \frac{C_i}{C_L} \left(1 - \frac{C_i K_1}{C_i + NC_S}\right)\right]}, \quad (3)$$

$$V_{L, \min} = V_{L, \max} K_1 K_2. \quad (4)$$

Соответствующие зависимости, рассчитанные с использованием (3) и (4) при $V_D = 0,1$ В, приведены на рис. 5 (3 и 4). Видно, что в данном случае и количественное согласие между аналитическими и численными расчетами достаточно хорошее.

Таким образом, можно отметить, что встречающееся в литературе представление о работе данного типа делителей достаточно хорошо согласуется с результатами расчетов, использующих статические ВАХ диодов. При этом на этапе предварительного проектирования лучше использовать аналитические выражения, учитывающие ненулевое напряжение открывания диодов V_D .

В то же время следует отметить, что в фазе заряда конденсаторов делителя одновременно с зарядом основных конденсаторов C_i происходит и

заряд емкостей диодов, включенных в обратном направлении. Причем эти емкости C_D заряжаются до напряжений, в несколько раз больших напряжений на C_i . В результате при подключении делителя к нагрузке в первый момент напряжение на каждом каскаде делителя оказывается больше, чем V_0/N (т. е. больше, чем напряжение на C_i).

Для анализа влияния емкостей диодов на характеристики делителя были выполнены соответствующие расчеты в программном комплексе OrCAD PSpice с учетом динамических ВАХ диодов.

На рис. 6 приведены зависимости максимального $V_{L, \max}$ (3) и минимального $V_{L, \min}$ (4) напряжений на сопротивлении нагрузки в установившемся режиме от сопротивления нагрузки, рассчитанные в программном комплексе OrCAD PSpice, при $V_0 = 9$ В, $C_L = C_i = 1$ нФ, $T = 0,02$ с, $\Delta t = 0,002$ с, $C_S = 1$ нФ, $C_D = 5$ пФ и $N = 3$.

Аналогичные зависимости для делителя с четырьмя каскадами, рассчитанные при $V_0 = 12$ В, приведены на рис. 7.

Видно, что при учете емкостей диодов эти зависимости при больших сопротивлениях нагрузки асимптотически приближаются к напряжению V_0 , а не к напряжению V_0/N , т. е. делитель работает не так, как предсказывалось в литературе. В то же время при сопротивлениях нагрузки менее 300 МОм зависимости соответствуют расчетам, использующим статические модели диодов.

Полагая, что при подключении делителя к нагрузке при больших сопротивлениях нагрузки,

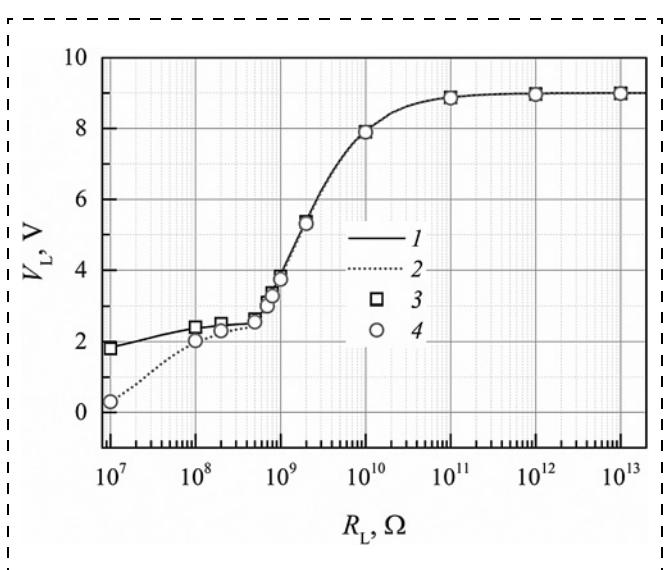


Рис. 6. Зависимости максимального и минимального напряжений на сопротивлении нагрузки в установившемся режиме от сопротивления нагрузки, рассчитанные с учетом C_D диодов:

1 и 3 — результаты расчетов $V_{L, \max}$ с использованием (3), (5) и в PSpice; 2 и 4 — результаты расчетов $V_{L, \min}$ с использованием (4), (6) и в PSpice, соответственно

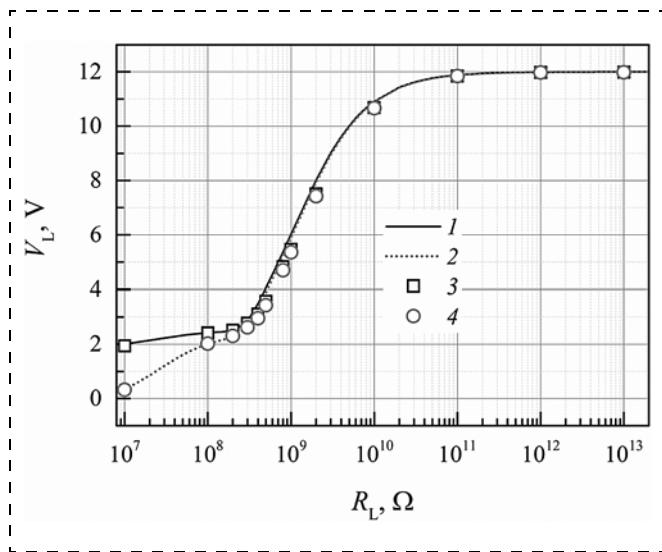


Рис. 7. Зависимости максимального и минимального напряжений на сопротивлении нагрузки в установившемся режиме от сопротивления нагрузки, рассчитанные с учетом C_D диодов при $V_0 = 12$ В и $N = 4$:

1 и 3 — результаты расчетов $V_{L, \max}$ с использованием (3), (5) и в PSpice; 2 и 4 — результаты расчетов $V_{L, \min}$ с использованием (4), (6) и в PSpice, соответственно

когда от делителя забирается малый заряд, емкости разрядных диодов D_{dis} разряжаются не полностью, и разрядные диоды не открываются, выражения для $V_{L, \max}$ и $V_{L, \min}$ в установившемся режиме можно представить в виде

$$V_{L, \max} = \frac{NC_D V_0}{NC_{\text{cas}} + C_L(1 - K_{1, D}K_2) - N(C_{\text{cas}} - C_D)K_{1, D}}, \quad (5)$$

$$V_{L, \min} = V_{L, \max} K_{1, D} K_2, \quad (6)$$

где

$$C_{\text{cas}} = \left(\frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_D} \right)^{-1}, \text{ а } K_{1, D} = \exp\left(\frac{-\Delta\tau}{R_L(NC_{\text{cas}} + C_L)} \right).$$

В то же время при малых сопротивлениях нагрузки, когда от делителя при подключении к нагрузке забирается значительный заряд, выражения для $V_{L, \max}$ и $V_{L, \min}$ в установившемся режиме не изменяются и будут соответствовать выражениям (3) и (4).

На рис. 6 и 7 приведены зависимости максимального $V_{L, \max}$ (1) и минимального $V_{L, \min}$ (2) напряжений на сопротивлении нагрузки в установившемся режиме от сопротивления нагрузки, рассчитанные с использованием выражений (3)–(6), при $C_L = C_i = 1$ нФ, $T = 0,02$ с, $\Delta\tau = 0,002$ с, $C_S = 1$ нФ, $C_D = 5$ пФ, $V_D = 0,2$ В, $N = 3$ и $V_0 = 9$ В (см. рис. 6), $N = 4$ и $V_0 = 12$ В (см. рис. 7), соответственно.

Видно, что в данном случае наблюдается достаточно хорошее количественное согласие между аналитическими и численными расчетами. Таким образом, выражения (3)–(6) можно использовать на этапе предварительного проектирования МЭМ генераторов с диодно-конденсаторными делителями напряжения. При этом для оценки критического сопротивления нагрузки, при котором необходимо переходить от использования выражений (3) и (4) к использованию выражений (5) и (6), можно предложить следующую формулу:

$$R_{\text{crit}} = \frac{T - \Delta\tau}{C_L \ln \left[\frac{C_L}{C_L - C_D N(N-1)(1 - V_D/V_0)} \right]}. \quad (7)$$

При выводе (7) предполагали, что делитель подключен к нагрузке на очень короткое время $\Delta\tau$.

В целом анализ работы диодно-конденсаторного делителя напряжения показал, что у этой схемы коэффициент деления напряжения при изменении сопротивления нагрузки не сохраняется. В результате при изменении параметров схемы необходимо каждый раз оценивать коэффициент деления заново.

Делитель с транзисторно-диодной коммутацией

В работе [21] была предложена оригинальная структура бестрансформаторного делителя напряжения с транзисторно-диодной коммутацией переключаемых конденсаторов с одним зарядным ключом (рис. 8), что упрощает систему управления. Упрощение достигается благодаря тому, что управление зарядным Q_K и разрядными Q_i транзисторными ключами осуществляется одним генератором управляющих прямоугольных импульсов V_{QK} .

В работе этого делителя напряжения также можно выделить два такта. На первом такте работы (транзисторный ключ Q_K замкнут) происходит подзаряд последовательно включенных конденсаторов C_i от предварительно заряженного до напряжения V_0 конденсатора C_S . При этом, поскольку напряжение на резисторах R_i всегда превышает напряжение на конденсаторах C_i , разрядные транзисторы Q_i оказываются запертными. На втором такте (ключ S_{W1} замкнут, транзисторный ключ Q_K разомкнут) конденсатор C_S заряжается от первичного источника напряжения V_0 , а транзисторные ключи Q_i открываются током разряда конденсаторов C_i через свои переходы эмиттер-база и ограничительные резисторы R_i . При этом параллельно включенные конденсаторы C_i разряжаются на RC -цепочку нагрузки. Затем двухтактный цикл работы делителя повторяется.

Результаты расчетов зависимостей максимального $V_{L, \max}$ (1 и 3) и минимального $V_{L, \min}$ (2 и 4)

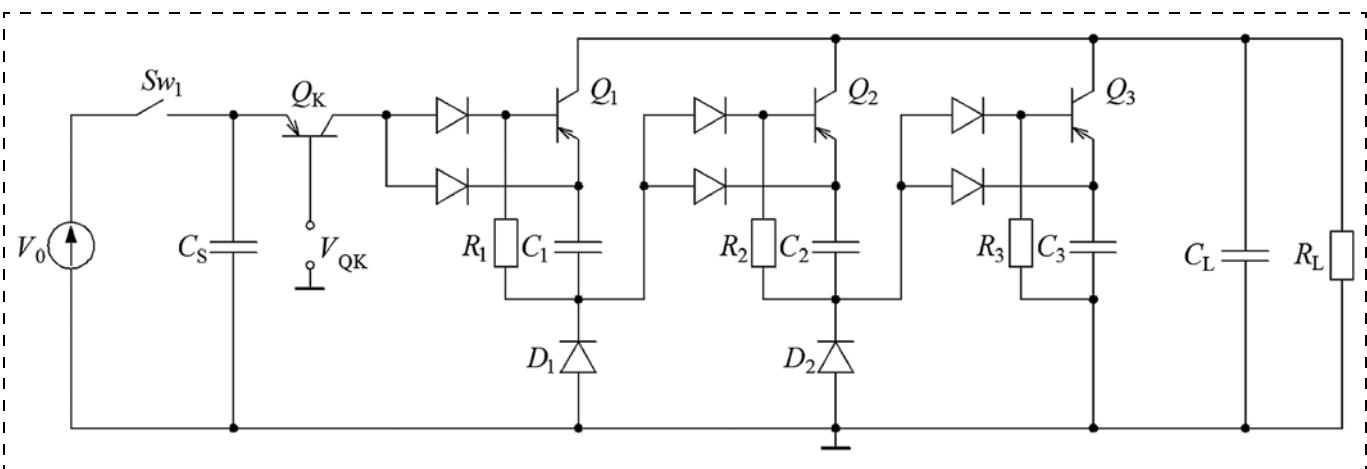


Рис. 8. Электрическая схема бестрансформаторного делителя напряжения с транзисторно-диодной коммутацией

напряжений на сопротивлении нагрузки в установившемся режиме от сопротивления нагрузки, рассчитанные в программном комплексе OrCAD PSpice при $V_0 = 30$ В, $C_L = C_i = 1$ нФ, $R_i = 4,1 \cdot 10^8$ Ом, $T = 0,02$ с, $\Delta t = 0,002$ с, $C_S = 1$ нФ и $N = 3$, приведены на рис. 9. Расчеты выполнены для двух случаев: в первом случае в качестве зарядного ключа Q_K использован биполярный транзистор (кривые 1 и 2), а во втором случае в качестве зарядного ключа Q_K использовано герконовое реле (кривые 3 и 4). Видно, что при больших R_L в обоих случаях зависимости выходят на насыщение. Причем при $R_L > 10^{10}$ Ом значения $V_{L, \max}$ практически равны V_0/N . Однако в случае герконового реле коэффи-

циент пульсаций (отношение $V_{L, \max}$ к $V_{L, \min}$) значительно больше. В то же время уменьшение $V_{L, \max}$ при уменьшении сопротивления нагрузки в случае герконового реле происходит медленнее, и при $R_L = 5 \cdot 10^8$ Ом значение $V_{L, \max}$ уменьшается всего на 10 % от значения V_0/N . Отметим также, что во всех расчетах использовали динамические ВАХ электронных компонентов.

Аналогичные результаты расчетов наблюдали и при $N = 4$. Таким образом, можно сделать вывод, что делитель напряжения с транзисторно-диодной коммутацией конденсаторов в применении к микроэлектромеханическим генераторам при больших сопротивлениях нагрузки позволяет получать выходное напряжение V_L в N раз меньшее, чем напряжение первичного источника питания V_0 .

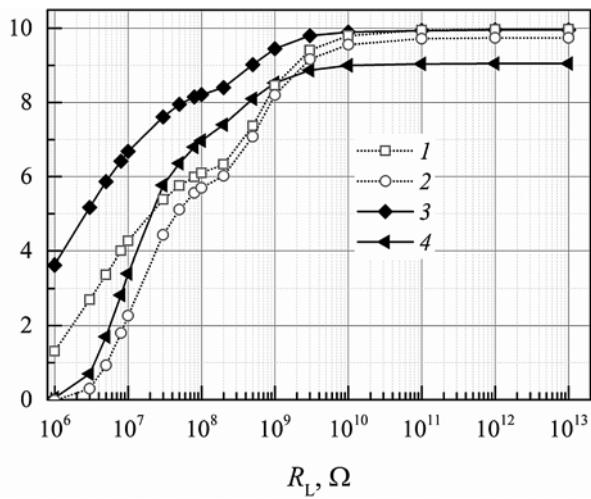


Рис. 9. Зависимости максимального и минимального напряжений на сопротивлении нагрузки в установившемся режиме от сопротивления нагрузки:
1 и 2 — в качестве зарядного ключа Q_K использован биполярный транзистор; 3 и 4 — в качестве зарядного ключа Q_K использовано герконовое реле

— значение коэффициента деления напряжения данной схемы при изменении сопротивления нагрузки не сохраняется и при больших сопротивлениях нагрузки значение напряжения на нагрузке асимптотически приближается к V_0 , а не к V_0/N , в результате при изменении параметров схемы необходимо каждый раз оценивать коэффициент деления заново;

Заключение

В целом анализ функционирования диодно-конденсаторного делителя напряжения показал:

- значение коэффициента деления напряжения данной схемы при изменении сопротивления нагрузки не сохраняется и при больших сопротивлениях нагрузки значение напряжения на нагрузке асимптотически приближается к V_0 , а не к V_0/N , в результате при изменении параметров схемы необходимо каждый раз оценивать коэффициент деления заново;

- при моделировании работы такого делителя необходимо учитывать падение напряжения на открытых диодах и емкости диодов;

- моделирование работы диодно-конденсаторного делителя напряжения с использованием программных комплексов необходимо проводить с учетом динамических ВАХ диодов;

- полученные аналитические выражения, описывающие работу диодно-конденсаторного делителя напряжения при малых и больших сопротивле-

ниях нагрузки, учитывающие падения напряжения на открытых диодах и емкости диодов, позволяют рассчитать характеристики делителя с достаточной для практических применений точностью, поэтому их можно использовать на этапе предварительного проектирования МЭМ генераторов с диодно-конденсаторными делителями напряжения.

Анализ работы схемы делителя напряжения с транзисторно-диодной коммутацией конденсаторов показал, что:

— при больших сопротивлениях нагрузки такой делитель позволяет получать выходное напряжение V_L в N раз меньшее напряжения первичного источника питания V_0 ;

— при использовании в качестве зарядного ключа биполярного транзистора коэффициент пульсаций выходного напряжения меньше, чем при использовании герконового реле.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект FSUN-2023-0006).

Авторы выражают благодарность профессору Кубису О. В. за ценные замечания и предложения, сделанные в ходе выполнения данной работы.

Список литературы

1. Shaikh F. K., Zeadally S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 55. P. 1041–1054. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.010.
2. Li Z., Yan Z., Luo J., Yang Z. Performance comparison of electromagnetic energy harvesters based on magnet arrays of alternating polarity and configuration // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 179. P. 132–140. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.060.
3. Wang J., Zhou S., Zhang Z., Yurchenko D. High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 181. P. 645–652. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.034.
4. Khan F. U., Qadir M. U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting // J. Micromech. Microeng. 2016. Vol. 26, № 10. P. 103001. DOI: 10.1088/0960-1317/26/10/103001.
5. Zhao C., Yang Y., Upadrashta D., Zhao L. Design, modeling and experimental validation of a low-frequency cantilever triboelectric energy harvester // Energy. 2021. Vol. 214. P. 118885. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118885.
6. Rahman M. T., Rana S. S., Salauddin M., Mahajan P., Bhatta T., Kim H., Cho H., Park J. Y. A highly miniaturized freestanding kinetic-impact-based non-resonant hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for human induced vibrations harvesting // Applied Energy. 2020. Vol. 279. P. 115799. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115799.
7. Lagomarsini C., Jean-Mistral C., Monfray S., Sylvestre A. Optimization of an electret-based soft hybrid generator for human body applications // Smart Mater. Struct. 2019. Vol. 28, № 10. P. 104003. DOI: 10.1088/1361-665X/ab3906.
8. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Microelectromechanical converters // Russian Microelectronics. 2012. Vol. 41. No. 2. P. 107–121. DOI: 10.1134/S1063739712010027.
9. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E., Roundy S. Power-electronic-interface topology for MEMS energy harvesting with multiple transducers // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1052. No. 012074 (5 p.). DOI: 10.1088/1742-6596/1052/1/012074.
10. Phan T. N., Azadmehr M., Le C. P., Halvorsen E. Low power electronic interface for electrostatic energy harvesters // Journal of Physics: Conf. Series. 2015. Vol. 660. No. 012087 (5 p.). DOI: 10.1088/1742-6596/660/1/012087.
11. Dragunov V. P., Ostertak D. I., Pelmanev K. G., Sinit-skii R. E., Dragunova E. V. Electrostatic Vibrational Energy Converter with Two Variable Capacitors // Sensors and Actuators A: Physical. 2021. V. 318. P. 112501. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112501.
12. Драгунов В. П. Нелинейная модель упругого элемента микроэлектромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. 2004. № 6. С. 19–24.
13. Драгунов В. П. Микромеханический электростатический преобразователь // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2007. № 1. С. 56–66.
14. Asanuma H., Oguchi H., Hara M., Yoshida R., Kuwano H. Ferroelectric dipole electrets for output power enhancement in electrostatic vibration energy harvesters // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103, № 16. P. 162901. DOI: 10.1063/1.4824831.
15. Wei J., Risquez S., Mathias H., Lefevre E., Costa F. Simple and efficient interface circuit for vibration electrostatic energy harvesters // 2015 IEEE Sensors. 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/icsens.2015.7370637.
16. Ayudhya R. S. N. A switched-capacitor Dickson charge pumps for high-voltage high power applications // 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering. 2014. P. 1147–1150. DOI: 10.1109/InfoSEEE.2014.6947850.
17. de Queiroz A. C. M., de Oliveira Filho L. C. M. Unipolar symmetrical variable-capacitance generators for energy harvesting // 60th IEEE Int. Midwest Symp. Circuits and Syst. 2017. P. 221–224. DOI: 10.1109/MWSCAS.2017.8052900.
18. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E. Comparative performance of voltage multipliers for MEMS vibration-based energy harvesters // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Vol. 1052. P. 012118. DOI: 10.1088/1742-6596/1052/1/012118.
19. Зотов Л. Г. Энергоэффективные устройства и системы силовой электроники на основе структур с переключаемыми конденсаторами. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2020. 403 с.
20. Розанов Ю. К., Рябчицкий М. В., Кваснок А. А. Силовая электроника: учебник для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2009. 632 с.
21. Gunn G. B., Kisco M. High DC to low DC voltage converter / Патент US 3708742 A. 1973.
22. Sidney D. G. AC to DC voltage conversion circuit / Патент US 3477011 A. 1969.
23. Nagai I. Transformerless voltage reducing rectifier circuit / Patent US 3478258 A. 1969.
24. Dulin G. F. Transformerless high-current power supply / Patent US 3505586 A. 1970.
25. Gunn G. B., Kisco M. Transformerless power supply / Патент US 3602795 A. 1971.
26. DeMichele G. Protected transformerless AC to DC power converter / Патент US 6061259 A. 2000.
27. Neil J., Francis J. Systems and Methods for Providing a Transformerless Power Supply / Patent US 20160233761 A1. 2016.

V. P. Dragunov, Dr. of Science, Professor, e-mail: drag@adm.nstu.ru,
D. I. Ostertak, Cand. Of Science, Associate Professor, e-mail: ostertak@ngs.ru,
R. E. Sinitkiy, Ph. D student, e-mail: sinitkiy.rodion@yandex.ru,
E. V. Dragunova, Cand. Of Science, Associate Professor, e-mail: dragunova@corp.nstu.ru
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Prospekt K. Markska, 20,
Russian Federation

Corresponding author:

Ostertak Dmitriy I., Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Prospekt K. Markska, 20, Russian Federation, e-mail: ostertak@ngs.ru

Voltage divider based on switched capacitors for MEM generators

Received on December 12, 2022

Accepted on December 28, 2022

Simulation results of the operation of voltage dividers based on switched capacitors with diode and transistor-diode switching for microelectromechanical (MEM) generators are presented. It has been established that for a divider with diode-switched capacitors, the voltage division factor doesn't remain when the load resistance changes, and for higher load resistances, the value of the load voltage asymptotically approaches to V_0 , but not to V_0/N . At the same time, a divider with transistor-diode switching of capacitors at higher load resistances makes it possible to obtain an output voltage V_L , which is N times lower than the voltage of the primary power source V_0 . Analytical expressions have been obtained for estimating the parameters of dividers with diode switching, which allow calculating the characteristics of the divider at the stage of preliminary design of MEM generators with diode-capacitor voltage dividers. It is shown that the simulation of the operation of a diode-capacitor voltage divider must be carried out taking into account the dynamic current-voltage characteristic of diodes. It is established that when using a bipolar transistor as a charging switch, the ripple coefficient of the output voltage is less than when using a reed relay.

Keywords: MEM generator, switched capacitor, converter, voltage divider, analytical expressions

For citation:

Dragunov V. P., Ostertak D. I., Sinitkiy R. E., Dragunova E. V. Voltage Divider based on Switched Capacitors for MEM Generators, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 69–78.

DOI: 10.17587/nmst.25.69-78

Acknowledgements: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSUN-2023-0006).

The authors are grateful to Professor Kibis O. V. for valuable comments and suggestions which were made during this work carrying-out.

References

1. Shaikh F. K., Zeadally S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 55, pp. 1041–1054, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.010.
2. Li Z., Yan Z., Luo J., Yang Z. Performance comparison of electromagnetic energy harvesters based on magnet arrays of alternating polarity and configuration, *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 179, pp. 132–140, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.060.
3. Wang J., Zhou S., Zhang Z., Yurchenko D. High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments, *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 181, pp. 645–652, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.034.
4. Khan F. U., Qadir M. U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting, *J. Micromech. Microeng.*, 2016, vol. 26, no. 10, p. 103001. doi: 10.1088/0960-1317/26/10/103001.
5. Zhao C., Yang Y., Upadrashta D., Zhao L. Design, modeling and experimental validation of a low-frequency cantilever triboelectric energy harvester, *Energy*, 2021, vol. 214, p. 118885. doi: 10.1016/j.energy.2020.118885.
6. Rahman M. T., Rana S. S., Salauddin M., Maharjan P., Bhatta T., Kim H., Cho H., Park J. Y. A highly miniaturized freestanding kinetic-impact-based non-resonant hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for human induced vibrations harvesting, *Applied Energy*, 2020, vol. 279, p. 115799. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115799.
7. Lagomarsini C., Jean-Mistral C., Monfray S., Sylvestre A. Optimization of an electret-based soft hybrid generator for human body applications, *Smart Mater. Struct.*, 2019, vol. 28, no 10, p. 104003. doi: 10.1088/1361-665X/ab3906.
8. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Microelectromechanical converters, *Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 2, pp. 107–121. doi: 10.1134/S1063739712010027.
9. Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E., Roundy S. Power-electronic-interface topology for MEMS energy harvesting with multiple transducers, *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, vol. 1052, no. 012074 (5 p.), doi: 10.1088/1742-6596/1052/1/012074.
10. Phan T. N., Azadmehr M., Le C. P., Halvorsen E. Low power electronic interface for electrostatic energy harvesters, *Journal of Physics: Conf. Series*, 2015, vol. 660, no. 012087 (5 p.), doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012087.
11. Dragunov V. P., Ostertak D. I., Pelmenev K. G., Sinitkiy R. E., Dragunova E. V. Electrostatic Vibrational Energy Converter with Two Variable Capacitors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, vol. 318, p. 112501. doi: 10.1016/j.sna.2020.112501

12. **Dragunov V. P.** Nelinejnaja model' uprugogo jelementa mikrojelektromehanicheskikh sistem, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2004, no. 6, pp. 19–24 (in Russian).
13. **Dragunov V. P.** Mikromehanicheskij jelektrostaticheskii' preobrazovatel', *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossii'skoi' Federacii*, 2007, no. 1, pp. 56–66 (in Russian).
14. **Asanuma H., Oguchi H., Hara M., Yoshida R., Kuwano H.** Ferroelectric dipole electrets for output power enhancement in electrostatic vibration energy harvesters, *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 103, no. 16, p. 162901. doi: 10.1063/1.4824831.
15. **Wei J., Risquez S., Mathias H., Lefevre E., Costa F.** Simple and efficient interface circuit for vibration electrostatic energy harvesters, *2015 IEEE Sensors*, 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/icsens.2015.7370637.
16. **Ayudhya R. S. N.** A switched-capacitor Dickson charge pumps for high-voltage high power applications, *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering*, 2014, pp. 1147–1150. doi: 10.1109/InfoSEEE.2014.6947850.
17. **de Queiroz A. C. M., de Oliveira Filho L. C. M.** Unipolar symmetrical variable-capacitance generators for energy harvesting, *60th IEEE Int. Midwest Symp. Circuits and Syst.*, 2017, pp. 221–224. doi: 10.1109/MWSCAS.2017.8052900.
18. **Truong B. D., Le C. P., Halvorsen E.** Comparative performance of voltage multipliers for MEMS vibration-based energy harvesters, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018, vol. 1052, p. 012118. doi: 10.1088/1742-6596/1052/1/012118.
19. **Zotov L. G.** *Jenergoeffektivnye ustrojstva i sistemy silovoj elektroniki na osnove struktur s pereklyuchayymi kondensatorami* (Power-efficient power electronics devices and systems based on structures with switched capacitors), Novosibirsk, NSTU, 2020. 403 p. (in Russian).
20. **Rozanov Y. K., Riabchitsky M. V., Kvasnyuk A. A.** *Silovaja elektronika*. Uchebnoe posobie. (Power electronics. Study guide), Moscow, MPEI, 2009. 632 p. (in Russian).
21. **Gunn G. B., Kisco M.** High DC to low DC voltage converter, *Patent US* 3708742 A, 1973.
22. **Sidney D. G.** AC to DC voltage conversion circuit, *Patent US* 3477011 A, 1969.
23. **Nagai I.** Transformerless voltage reducing rectifier circuit, *Patent US* 3478258 A, 1969.
24. **Dulin G. F.** Transformerless high-current power supply, *Patent US* 3505586 A, 1970.
25. **Gunn G. B., Kisco M.** Transformerless power supply, *Patent US* 3602795 A, 1971.
26. **DeMichele G.** Protected transformerless AC to DC power converter, *Patent US* 6061259 A, 2000.
27. **Neil J., Francis J.** Systems and Methods for Providing a Transformerless Power Supply, *Patent US* 20160233761 A1, 2016.

УДК 544.541

DOI: 10.17587/nmst.25.78-81

Е. В. Ефименко, инженер-исследователь, e-mail: el.vl.efimenko@gmail.com
С. С. Фанченко, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории рентгеновской диагностики поверхности, e-mail: ssfan@mail.ru,
Национальный Исследовательский Центр "Курчатовский институт" (НИЦ "КИ"), Москва,

О СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКИ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Поступила в редакцию 10.11.2022

Показано, что в случае "мягких" сбоев резервирование с четным числом элементов и случайным выбором между равновероятными конфигурациями эквивалентно резервированию с нечетным, на единицу меньшим числом элементов. Проведены оценки того, насколько эффективны троирование и пятирывание.

Ключевые слова: единичные сбои, программируемые логические интегральные схемы, радиационные эффекты, сбоестойчивость, мажоритарное троирование

Введение

Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) в последнее время широко используются для задач резервирования в микросхемах с повышенной радиационной стойкостью, поскольку они позволяют осуществить различные варианты резервирования без необходимости разработки специализированных заказных больших интегральных схем [1–3].

Радиационная космическая среда оказывает серьезное неблагоприятное воздействие на электронные системы. В частности, повышенная чувстви-

тельность к эффектам одиночного события (Single Event Effect, SEE) является одной из главных проблем в сфере космической электроники. Различные аспекты одиночных сбоев при облучении тяжелыми заряженными частицами и нейтронами рассмотрены в работах [4, 5].

Эффекты одиночного события вызывают широкий спектр эффектов, которые могут привести к "жестким" — невосстановляемым, или "мягким" — восстановляемым, сбоям. "Жесткие" сбои приводят к катастрофическому отказу электронного устройства, но они случаются гораздо реже, чем "мягкие", — согласно [4], для микросхем Xilinx Kintex

**Значения параметров сбоестойчивости
для микросхемы LTC1657 [7]**

	Порог по ЛПЭ, МэВ · см ² /мг	Сечение при ЛПЭ-37 МэВ · см ² /мг, см ² /прибор
"Жесткие" сбои	14	$6,3 \cdot 10^{-5}$
"Мягкие" сбои	4	$1,2 \cdot 10^{-3}$

UltraScale FPGA, произведенных по технологии 16 нм, на их долю приходится около 3 %. "Мягкие" сбои носят временный характер и не ведут напрямую к отказу устройства. Однако они наиболее распространены, и поэтому требуют первоочередного внимания.

Для оценки чувствительности полупроводниковых устройств и микросхем к одиночным событиям (SEE) используют соответствующие параметры. "Мягкие" и "жесткие" сбои характеризуются передаваемой на единицу длины пороговой энергией (линейная передача энергии, ЛПЭ) и сечением эффекта. Для "мягких" сбоев пороговая энергия ниже, а сечение больше. В таблице приведены данные для микросхемы LTC1657 16 bit DAC 0105 Linear Technology [7] — отношение сечений "жесткого" к "мягкому" составляет около 5 %.

Существует прямая зависимость: чем больше сечение эффекта, тем больше устройство чувствительно к облучению частицами, поэтому на основании таблицы можно сделать вывод о наибольшей уязвимости микросхем к "мягким" сбоям в электронных компонентах.

Один из методов повышения отказоустойчивости микросхем осуществляется введением аппаратной избыточности (резервирования). Рассмотрим различные способы повышения отказоустойчивости микросхем, а также оценим их эффективность.

Четное резервирование

Несмотря на то, что каждая микросхема имеет свои параметры, частота возникновения "мягких" сбоев выше, чем "жестких". Поэтому для повышения отказоустойчивости интегральной схемы необходимо использовать метод резервирования, опираясь, в первую очередь, на "мягкие" сбои.

Наиболее известным и распространенным методом обеспечения отказоустойчивости интегральных схем является мажоритарное троирование. Этот метод предполагает использование трехмодульного резервирования, в котором применяется концепция голосования по принципу "два из трех" на низком уровне.

Однако также возможны и схемы с четным резервированием со случайным выбором равновероятных значений.

Вероятность бессбойной работы микросхемы с четным числом резервируемых элементов определяется следующим выражением с биномиальными коэффициентами (дополнительный коэффициент 0,5 в последнем слагаемом указан ввиду необходимости случайного выбора для равновероятных конфигураций):

$$W_{2N} = (1 - q)^{2N} + 2Nq(1 - q)^{2N-1} + \dots \\ \dots (2N)/(k!(2N-k)!)\cdot q^k(1 - q)^{2N-k} \dots + \\ + 0,5 \cdot (2N)!/N!^2 \cdot q^N \cdot (1 - q)^N,$$

где $q = 1 - e^{-\frac{T}{\tau}}$ и $1 - q = e^{-\frac{T}{\tau}}$ — вероятность сбоя и бессбойной работы логической ячейки за время T ; τ — среднее время между сбоями.

Выделим из первого слагаемого $(1 - q)$:

$$(1 - q)^{2N-1} + (2N-1)q(1 - q)^{2N-2} + \\ \dots + 0,5 \cdot (2N)!/N!^2 \cdot q^N(1 - q)^N.$$

Далее то же из второго слагаемого:

$$(1 - q)^{2N-1} + (2N-1)q(1 - q)^{2N-2} + \\ + (N-1)(2N-1)q^2(1 - q)^{2N-2} \dots + \\ + 0,5 \cdot (2N)!/N!^2 \cdot q^N(1 - q)^N.$$

Продолжая эту процедуру до конца, получаем вероятность для резервирования с $2N-1$ элементами. Вследствие коэффициента 0,5 в последнем слагаемом он сокращается с $-(2N-1)!/(N!(N-1)!) \times \times q^N(1 - q)^N$ из степенного ряда. В результате выражение принимает вид:

$$W_{2N} = W_{2N-1} = (1 - q)^{2N-1} + \\ + (2N-1)q(1 - q)^{2N-2} + \dots \\ \dots + (2N-1)!/N!(N-1)!q^{N-1}(1 - q)^N.$$

Таким образом, четное резервирование эквивалентно нечетному, с на единицу меньшим числом элементов, что делает его практически бесполезным для "мягких" сбоев.

Предсказанная в работе [8] концепция существенного повышения отказоустойчивости за счет поэлементного дублирования не приводит к повышению сбоестойчивости ввиду пренебрежения "мягкими" сбоями по отношению к "жестким". Согласно [6, 7], число "мягких" сбоев в 20...30 раз больше, чем "жестких", а поэтому уменьшения числа сбоев в 70 млн раз при таком дублировании происходить не будет.

Качественное отличие "мягких" сбоев от "жестких" в том, что для них неизвестно, в какой ячейке из двух содержится правильный результат, в то время как для "жестких" сбоев можно определить, например, по измерению электросопротивления, в какой именно ячейке произошел сбой, и выбрать правильное значение (нуля или единицы) из другой.

Нечетное резервирование

Как было отмечено выше, наиболее простое и распространенное нечетное резервирование — мажоритарное троирование [9]. Резервирование с нечетными числами для вероятности сбоя описывается формулами аналогично четному случаю, и после несложных вычислений дает для первых пяти нечетных чисел следующие выражения:

$$1: q; \quad (1)$$

$$3: -2q^3 + 3q^2; \quad (2)$$

$$5: 6q^5 - 15q^4 + 10q^3; \quad (3)$$

$$7: -20q^7 + 70q^6 - 84q^5 + 35q^4; \quad (4)$$

$$9: 70q^9 - 315q^8 + 540q^7 - 420q^6 + 126q^5. \quad (5)$$

Аналогичные выражения могут быть написаны и для большего числа резервируемых элементов, но все они существенно зависят от вероятности сбоя q . Повышение отказоустойчивости также зависит от значения вероятности сбоя и при изменении плотности потока облучающих частиц может существенно возрастать (см. рисунок).

Анализируя рисунок, можно отметить, что с повышением кратности резервируемых элементов увеличивается и относительная сбоестойчивость микросхемы.

Для оценки чувствительности системы к одиночным событиям необходимо определить среднее время на сбой, которое при мажоритарном троировании определяется как интеграл по времени от величины $3e^{-2T/\tau} - 2e^{-3T/\tau}$ или $T_{\text{ср}} =$

$$= \int \left(3e^{-\frac{2T}{\tau}} - 2e^{-\frac{3T}{\tau}} \right) dT.$$

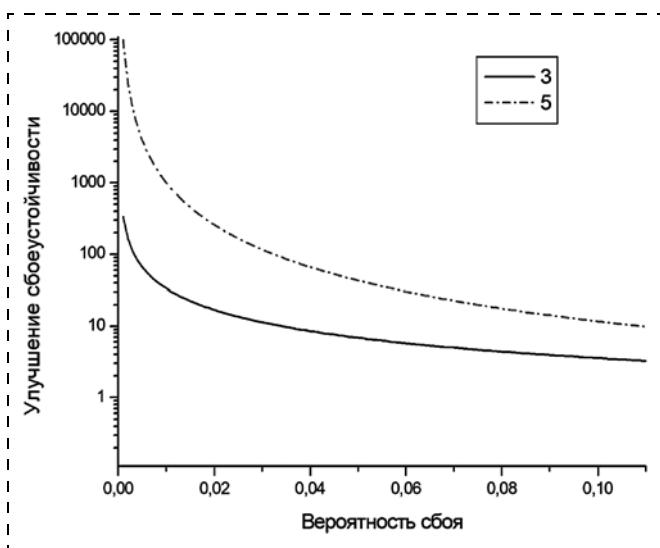


График зависимости улучшения сбоестойчивости микросхемы от вероятности сбоя логического элемента при трех- (3) и пятикратном (5) резервировании

В связи с этим среднее время бессбойной работы без трехмодульного резервирования определяется как τ , а с мажоритарным троированием — $5/\bar{t}$.

В большинстве случаев рассматривают "мягкие" сбои, которые реализуются с вероятностью менее 5 %. В работе [10] для трехкратного резервирования проводили измерения сбоестойчивости микросхем Xilinx Artix-7 FPGA (XC7A200T-1SBG484C), произведенных по технологии 28 нм с общим числом логических элементов 33 650. Для нерезервированных микросхем в результате облучения на нейтронном пучке в Лос Аламосе [11] было обнаружено 555 сбоев, что соответствует значению $q = 0,016$. Однако измеренное значение улучшения сбоестойчивости оказалось равным 2,9, а вовсе не значению $1/3q = 20,8$, что говорит о том, что в микросхемах ПЛИС радиационному воздействию подвержены не только логические элементы, но и мажоритарные воутеры, и межсоединения, в результате, использование простых комбинаторных формул может приводить к ошибкам.

При данном q пятирирование должно давать улучшение в 400 раз, семирирование — в 7250 раз по комбинаторным формулам (3) и (4) (см. рисунок), однако экспериментальное значение может оказаться существенно меньшим. Для оценки влияния радиационного облучения на мажоритарные воутеры и межсоединения требуются дальнейшие исследования.

Заключение

Обеспечение радиационной стойкости полупроводниковой электроники к эффектам одиночных событий при воздействии космического облучения является актуальной задачей.

В зависимости от видов сбоев — "мягких" или "жестких" целесообразно применять конкретные виды резервирования. Так как частота возникновения "мягких" сбоев выше, необходимо в первую очередь ориентироваться на них. В работе показано, что для обеспечения отказоустойчивости микросхем против "мягких" сбоев следует применять нечетное резервирование — трех- или пятимодульное.

Список литературы

1. Siegle F., Vladimirova T., Ilistad J., Emam O. Mitigation of Radiation Effects in SRAM-based FPGAs for Space Applications. // ACM Comput. Surv. 2014. Vol. 47. Is. 2. P. 1—34.
2. Nidhin T. S. Bhattacharyya A., Behera R. P., Jayanthi T. A Review on SEU Mitigation Techniques for FPGA Configuration Memory. // IETE Technical Review. 2018. Vol. 35. Is. 2. P. 157—168.
3. Cannon M., Keller A., Wirthlin M. Improving SRAM FPGA Radiation Reliability Through Low-Level TMR Implementation. // IEEE 26th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines. 2018. P. 141—148.

4. Александров П. А., Фанченко С. С., Ефименко Е. В. Оценка влияния облучения тяжелыми заряженными частицами на работу МОП-транзистора // Нано- и микросистемная техника. 2022. Том 24, № 1. С. 19–26.
5. Ефименко Е. В., Фанченко С. С., Александров П. А. Исследование влияния облучения нейтронами на отказоустойчивость микросхемы // Известия НАН Армении. Физика. 2022. Т. 57, № 3. С. 457–462.
6. Cai C., Gao S., Zhao P. et al. SEE sensitivity evaluation for commercial 16 nm SRAM-FPGA // Electronics. 2019. Vol. 8, № 12. P. 1531–1543.
7. O'Bryan M. V., LaBel K. A., Ladbury R. L. et al. Current Single Event Effects and Radiation Damage Results for Candidate Spacecraft Electronics. // IEEE Radiation Effects Data Workshop. 2002. P. 82–105.
8. Александров П. А., Будагарин В. В., Жук В. И., Литвинов В. Л. Об отказоустойчивостиnanoэлектронных интегральных схем при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 1. Р. 7–14.
9. Fon Nejman Dzh. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент // Автоматы / Под ред. Шеннона К. Э. и Маккарти Дж. М.: ИЛ, 2003. С. 68–139.
10. Cannon M. Improving the Single Event Effect Response of Triple Modular Redundancy on SRAM FPGAs Through Placement and Routing // Brigham Young University ProQuest Dissertations Publishing, 2019. 22616967.
11. Wender S., Dominik L. Los Alamos High-Energy Neutron Testing Handbook // SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility. 2020. Vol. 2 (3). P. 1279–1302.

E. V. Efimenko, Research Engineer, e-mail: el.vl.efimenko@gmail.com
S. S. Fanchenko, Head of the laboratory for X-Ray Surface Diagnostics, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, e-mail: ssfan@mail.ru

Corresponding author:

Elizaveta V. Efimenko, Research Engineer, National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, e-mail: el.vl.efimenko@gmail.com

On Fpga Seu Mitigation Under Irradiation Conditions

Received on November 10, 2022
Accepted on December 01, 2022

It is shown that in the case of soft errors even redundancy with casual choice for equiprobable configurations is equivalent to odd redundancy with less by one number of elements. The efficiencies of triple and quintuple modular redundancy are estimated.

Keywords: single event upsets, programmable logic integrated circuits, radiation effects, fault tolerance, triple modular redundancy

For citation:

Efimenko E. V., Fanchenko S. S. On FPGA SEU Mitigation under Irradiation Conditions, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 78–81.

DOI: 10.17587/nmst.25.78-81

References

1. Siegle F., Vladimirova T., Istad J., Emam O. Mitigation of Radiation Effects in SRAM-based FPGAs for Space Applications, *ACM Comput. Surv.*, 2014, vol. 47, is. 2, pp. 1–34.
2. Nidhin T. S., Bhattacharyya A., Behera R. P., Jayanthi T. A Review on SEU Mitigation Techniques for FPGA Configuration Memory, *IETE Technical Review*, 2018, vol. 35, is. 2, pp. 157–168.
3. Cannon M., Keller A., Wirthlin M. Improving SRAM FPGA Radiation Reliability Through Low-Level TMR Implementation, *IEEE 26th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, 2018, pp. 141–148.
4. Aleksandrov P. A., Fanchenko S. S., Efimenko E. V. Ocenna vliyanija oblucheniya Tyazhelyimi Zaryazhennymi Chasticami Na Rabotu Mop-tranzistora, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2022, vol. 24, is. 1, pp. 19–26 (in Russian).
5. Efimenko E. V., Fanchenko S. S., Aleksandrov P. A. Issledovanie vliyanija oblucheniya nejtronami na otkaoustojchivost' mikroskhemy, *Izvestiya NAN Armenii. Fizik.*, 2022, vol. 57, is. 3, pp. 457–462 (in Russian).
6. Cai C., Gao S., Zhao P. et al. SEE sensitivity evaluation for commercial 16 nm SRAM-FPGA, *Electronics*, 2019, vol. 8, is. 12, pp. 1531–1543.
7. O'Bryan M. V., LaBel K. A., Ladbury R. L. et al. Current Single Event Effects and Radiation Damage Results for Candidate Spacecraft Electronics, *IEEE Radiation Effects Data Workshop*, 2002, pp. 82–105.
8. Aleksandrov P. L., Budaragin V. V., Zhuk V. I., Litvinov V. L. Ob otkaoustojchivosti nanoelektronnyh integral'nyh skhem pri obluchenii, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, vol. 1, pp. 7–14 (in Russian).
9. Fon Nejman Dzh. Veroyatnostnaya logika i sintez nadezhnyh organizmov iz nenaidezhnyh komponent. Avtomaty, pod red. SHennona K. E. i Makkariti Dzh. Moscow, IL, 2003, pp. 68–139 (in Russian).
10. Cannon M. Improving the Single Event Effect Response of Triple Modular Redundancy on SRAM FPGAs Through Placement and Routing, *Brigham Young University ProQuest Dissertations Publishing*, 2019, 22616967.
11. Wender S., Dominik L. Los Alamos High-Energy Neutron Testing Handbook, *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility*, 2020, vol. 2, is. 3, pp. 1279–1302.

Е. А. Печерская¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф. ИИТИМ, e-mail: peal@list.ru,

С. А. Гурин², канд. техн. наук, нач. лаб., e-mail: teslananoel@rambler.ru,

М. Д. Новичков², инженер-технолог, e-mail: novichkov1998maks@gmail.com,

¹ Кафедра "Информационно-измерительная техника и метрология" ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет", Пенза, 440026, Россия,

² АО "Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов", Пенза, 440600, Россия

ВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СОСТАВНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР

Поступила в редакцию 04.12.2022

Исследованы процессы, протекающие в структуре тонких пленок, приводящие к изменению сопротивления тонкопленочного резистора с течением времени. Добавление в состав резистора тонкой пленки с противоположным направлением "дрейфа" сопротивления позволяет минимизировать влияние процессов старения на общее сопротивление составного резистора. Представлены различные варианты конструкций, предоставляющие возможность для компенсации отклонения сопротивления тонкопленочного резистора с течением времени, в том числе близкой к нулю. Показаны их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: тонкопленочный резистор, сопротивление, временная стабильность, кинетика деградации тонких пленок, компенсация "дрейфа" сопротивлений

Введение

Неуклонное развитие радиоэлектронной аппаратуры требует повышения уровня электронно-компонентной базы [1]. Одним из наиболее распространенных элементов является резистор, применяемый для перераспределения и регулировки электрической энергии в авиационной и автомобильной промышленности, навигационной аппаратуре, медицинской технике, в системах связи, управлении объектами промышленного назначения, бытовой технике и т. д. Неуправляемое изменение основного электрического параметра резисторов — сопротивления в процессе эксплуатации для прецизионных резисторов стало доминировать над изменением от электрофизических свойств материала [2]. Поэтому для обеспечения высокого уровня точности резисторов наибольшее значение приобретает повышение временной стабильности.

Изготавливаемые в настоящее время тонкопленочные резисторы предусматривают конструкцию, состоящую из резистивного и проводящего (контактного) слоев, размещенных на диэлектрической подложке. С развитием микроэлектроники стало возможным использование большего числа функциональных слоев тонких пленок [3]. Добавляя в конструкцию дополнительный компенсационный слой с противоположным знаком относительно изменения сопротивления с течением времени, становится возможным добиться более высокой стабильности сопротивления по сравнению с производимыми в настоящее время аналогами.

Кинетика деградации тонких пленок

Согласно теоретическим исследованиям, проведенным в работе [4], электрическая проводимость описывается следующим выражением:

$$\sigma(T) = \sigma_{\infty} \exp\left(-\frac{T_M}{T}\right) + \sigma_0(1 + \alpha T)^{-1}, \quad (1)$$

где T — температура; T_M — характеристическая температура; σ_{∞} — термоактивационная проводимость; σ_0 — металлическая проводимость; α — ТКС металлической фазы.

В нормальных условиях со временем в тонких резистивных пленках происходит ряд процессов, приводящих к изменению составляющих уравнения (1), и как следствие, к "дрейфу" сопротивления. С одной стороны, это "залечивание" и упорядочение дефектов, снятие напряжений, рекристаллизация и рост зерен, приводящие к снижению сопротивления с течением времени, с другой стороны — поверхностное и объемное окисление, приводящее к росту сопротивления резистивной пленки [5]. Так, например, в пленках никрома дрейф сопротивления имеет положительное направление и свидетельствует о доминирующей роли окисления. Добавки алюминия в сплавы на основе никрома усиливают роль процессов рекристаллизации. Известно, что температура рекристаллизации алюминия (150 °C) значительно ниже, чем никрома. Тем самым при оптимальном процентном составе сплава возможна взаимная компенсация роста сопро-

тивления, вследствие окисления, снижением сопротивления за счет рекристаллизации, что схоже с возможными теоретическими проработками получения металлосилицидных резистивных пленок. Но на сегодняшний день, учитывая множество режимов формирования резистивной структуры, в производстве достичь прогнозируемых значений не удается [6].

Кинетика процессов деградации тонких пленок керметов так же, как и никрома, имеет двойственный характер. С течением времени возможны окончательное формирование фаз и рекристаллизация, с одной стороны, и окисление хрома, с другой стороны. Скорость первого процесса зависит от оптимальных режимов термостабилизации и минимальна при отработанной технологии, а второго от содержания хрома в резистивном слое [7, 8]. При этом временной "дрейф" сопротивления таких пленок имеет отрицательное направление.

Временная стабильность составных тонкопленочных резистивных структур

В составных тонкопленочных резисторах, состоящих из пленок, имеющих противоположные направления изменения сопротивления с течением времени, представляется возможной компенсация отклонения сопротивления резистора с течением времени. Зная значение отклонения сопротивления пленок по отдельности и использовав известные соотношения для сопротивлений последовательного и параллельного включений резисторов, суммарное относительное изменение сопротивления тонкопленочного резистора для указанных включений можно определить по следующим формулам:

$$\delta_{\text{пос}} = \frac{1}{R} (R_1 \delta_1 + R_2 \delta_2), \quad (2)$$

$$\delta_{\text{пар}} = R \left(\frac{\delta_1}{R_1} + \frac{\delta_2}{R_2} \right), \quad (3)$$

где R — общее сопротивление составного резистора; R_1 и R_2 — сопротивления резистивных пленок; δ_1 и δ_2 — относительные изменения сопротивления резистивных пленок во времени.

Из этих выражений следует, что условиями полной компенсации при последовательном и параллельном включении являются следующие выражения соответственно:

$$R_1 \delta_1 = -R_2 \delta_2, \quad (4)$$

$$R_1 \delta_2 = -R_2 \delta_1. \quad (5)$$

Таким образом, при заранее выбранных R и δ , в случае, если кинетика процессов деградации пленок в составе резистора имеет противоположный характер, появляется возможность компенсации отклонения сопротивления резистора с течением

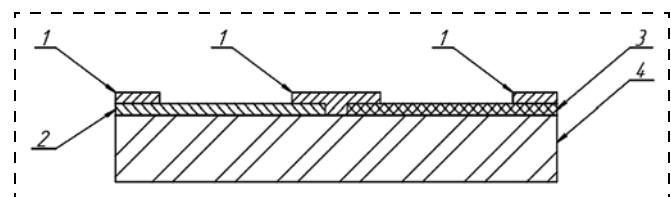


Рис. 1. Структура составного тонкопленочного резистора:

1 — контактный слой; 2 — пленка с положительным времененным "дрейфом" сопротивления; 3 — пленка с отрицательным времененным "дрейфом" сопротивления; 4 — диэлектрическая подложка

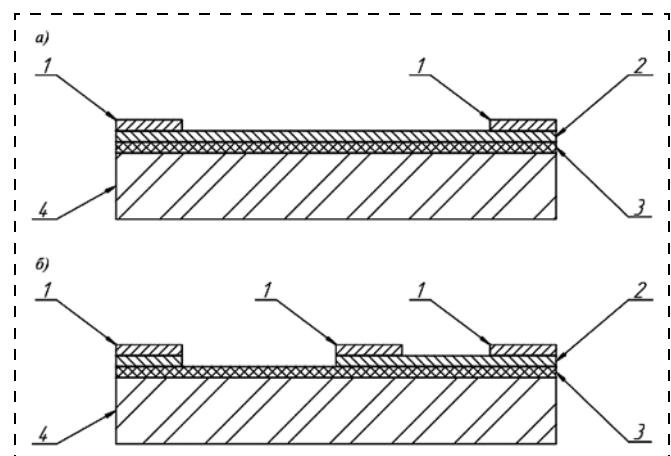


Рис. 2. Многослойная (а) и комбинированная (б) структуры тонкопленочного резистора:

1 — контактный слой; 2 — пленка с положительным времененным "дрейфом" сопротивления; 3 — пленка с отрицательным времененным "дрейфом" сопротивления; 4 — диэлектрическая подложка

времени, в том числе и близкой к нулю. Однако данные соотношения для отдельно взятых тонких пленок справедливы и могут быть заранее рассчитаны только в случае, когда пленки расположены в различных частях подложки и объединены контактным слоем с высокой проводимостью, как показано на рис. 1.

Представленная структура является сложной в изготовлении, так как не может быть сформирована в едином технологическом цикле вакуумного напыления. Поэтому, как правило, тонкопленочные резисторы, имеющие в своем составе несколько резистивных пленок, являются многослойными или комбинированными (рис. 2) [9, 10].

Добавление дополнительных слоев тонких пленок подобным образом в значительной степени уменьшает, либо полностью исключает свободную площадь одной из резистивных пленок, доступную для проникновения активных газов, в том числе кислорода, что резко снижает вклад окисления в временную стабильность электрических параметров [11]. Наряду с этим в кинетику деградации многослойных тонкопленочных структур вносят вза-

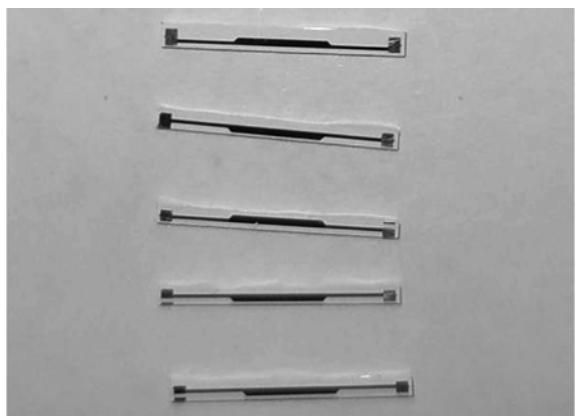


Рис. 3. Полученные многослойные резисторы

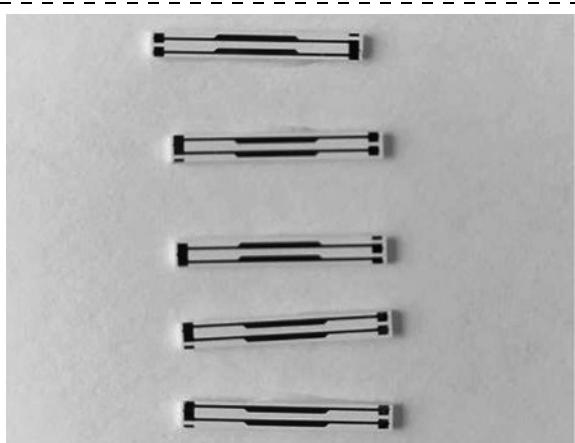


Рис. 4. Полученные составные резисторы

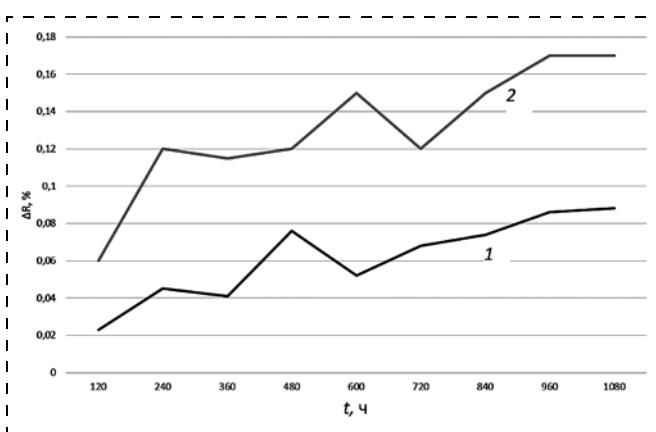


Рис. 5. Кривые старения составного (1) и многослойного (2) тонкопленочных резисторов

имная диффузия и образование соединений на границе раздела пленок.

В силу указанных причин расчет компенсации отклонения с течением времени сопротивления тонкопленочных резисторов, имеющих в своем составе многослойные участки, по формулам (2)–(5) не представляется возможным, и ее значение может быть получено только экспериментальным путем для каждой отдельно взятой пары материалов и будет зависеть от режимов получения и температурной обработки, metallургической совместимости, толщины и значений сопротивлений тонких пленок.

Экспериментальная часть

Для подтверждения описанных выше возможностей компенсации отклонения сопротивления тонкопленочных резистивных структур с течением времени была изготовлена партия многослойных и составных тонкопленочных резисторов из никрома X20H80 и кермета K-20C.

Многослойную резистивную структуру напыляли на установке УВН 71П3 термическим взрывным испарением в едином технологическом цикле последовательным напылением никрома и никеля на ситалловые подложки. Топологию формировали методами фотолитографии с последующим стабилизирующим отжигом в течение 6 ч при температуре 350 °С. Полученные тонкопленочные резисторы представлены на рис. 3.

Составные тонкопленочные резисторы были получены напылением через свободные маски с последующим стабилизирующим отжигом. Для большей точности эксперимента напыление составных и многослойных резистивных структур проходило при одинаковых режимах, приведенных в таблице.

Полученные составные резисторы представлены на рис. 4.

Временную стабильность сопротивления тонкопленочных резисторов оценивали выдержкой в печи при температуре 150 °С в течение 45 сут. Измерения проводили каждые 5 сут. По полученным результатам построены кривые старения худших образцов многослойных и составных резисторов, представленные на рис. 5.

Из графика видно, что, несмотря на одинаковые режимы напыления, параметры многослойных и составных тонкопленочных резисторов значительно отличаются, тем самым доказывая предпо-

Режимы напыления тонкопленочных резистивных структур

Слой	Ток испарителя $I_{\text{испар}}$, А	Начальное остаточное давление в камере $P_{\text{ост нач}}$, мм рт. ст.	Конечное остаточное давление в камере $P_{\text{ост кон}}$, мм рт. ст.	Температура подложки $T_{\text{подл}}$, °С	Время напыления, с
X20H80	280...350	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	350	60
K-20C	480...500	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	400	200...280

ложение об изменении кинетики деградации тонких пленок в составе многослойной структуры.

Заключение

Кинетика процессов деградации тонких пленок, как правило, имеет двойственный характер. В зависимости от соотношения окисления и рекристаллизации с течением времени временной "дрейф" сопротивлений различных пленок может иметь противоположное направление. При использовании в составе одного резистора нескольких тонких пленок с известным значением временной стабильности сопротивления становится возможным расчет суммарного относительного изменения сопротивления составного тонкопленочного резистора в целях компенсации, в том числе близкой к нулю.

Список литературы

1. Лучинин В. В., Мальцев П. П. Нанотехнологии в новом технологическом укладе // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 1. С. 3–5.
2. Лугин А. Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов. Пенза: Инф. изд. центр ПГУ, 2009. 287 с.
3. Асташенкова О. Н., Корляков А. В. Контроль физико-механических параметров тонких пленок // Нано- и микросистемная техника. 2013, № 2. С. 24–29.
4. Аванесян Р. Р. Резистивные свойства аморфных материалов. Ч. 3. Резистивные свойства тонких пленок. Москва: ЦНИИ "Электроника", 1984. 56 с.

5. Сергеев В. Е., Воротынцев В. М. Разработка модифицированной технологии термостабилизации тонкопленочных резистивных элементов // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 4–9.

6. Chen C., Zhu J., Chen Y., Wang G. Unveiling structural characteristics for ultralow resistance drift in BiSb-Ge₂Sb₂Te₅ materials for phase-change neuron synaptic devices // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 892. 162148.

7. Myagkov V. G., Zhigalov V. S., Bykova L. E., Solov'ev L. A., Bondarenko G. N. Solid-phase synthesis of L10-FePd(001) epitaxial thin films: Structural transformations and magnetic anisotropy // JETP Letters. 2010. Vol. 91 (9). P. 481–485.

8. Аверин И. А., Печерская Р. М. Управление параметрами резистивных структур посредством отжига // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 144–145.

9. Патент № 2326460 С1 Российская Федерация, МПК H01C 17/00, G01L 7/08. Способ изготовления высокотемпературного тонкопленочного резистора: № 2007102533/09: заявл. 23.01.2007: опубл. 10.06.2008 / И. В. Волохов, Е. В. Песков, Д. В. Попченков; заявитель ФГУП "НИИ физических измерений".

10. Патент № 2700592 С1 Российская Федерация, МПК H01C 17/00. Способ изготовления тонкопленочного резистора: № 2018134886: заявл. 02.10.2018: опубл. 18.09.2019 / В. Н. Новожилов; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского".

11. Гурин С. А. Исследование и разработка тонкопленочных гетерогенных структур чувствительных элементов датчиков давлений с экстремальными условиями эксплуатации: специальность 05.27.01 "Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах": дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2016. 157 с.

E. A. Pecherskaya, D. Sc., Professor, Head of the Department of Information and Measurement

Technology and Metrology, e-mail: pea1@list.ru.

Penza State University, Penza, 440026, Russia

S. A. Gurin, Ph. D., Head of the Laboratory, e-mail: teslananoel@rambler.ru

M. D. Novichkov, Process Engineer, e-mail: novichkov1998maks@gmail.com

^b JSC "Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices", Penza, Russia

Corresponding author:

Maksim D. Novichkov, Process Engineer, JSC "Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices",
Penza, 440600 Russia

e-mail: novichkov1998maks@gmail.com

Temporary Stability of Composite Thin-Film Resistive Structures

Received on December 10, 2022

Accepted on December 26, 2022

The processes occurring in the structure of thin films leading to a change in the resistance of a thin-film resistor over time are investigated. The addition of a thin film to the resistor with the opposite direction of the resistance "drift" allows minimizing the effect of aging processes on the total resistance of the composite resistor. Various design options are presented that provide an opportunity to compensate for the temporary instability of a thin-film resistor, including one close to zero. Their advantages and disadvantages are shown.

Keywords: thin-film resistor, resistance, temporary instability, kinetics of degradation of thin films, compensation of "drift" of resistances

For citation:

Pecherskaya E. A., Gurin S. A., Novichkov M. D. Temporary Stability of Composite Thin-Film Resistive Structures, Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 82–86.

DOI: 10.17587/nmst.25.82-86

References

1. **Luchinin V. V., Maltsev P. P.** Nanotechnologies in a new technological way, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 3–5 (in Russian).
2. **Lugin A. N.** Design and technological bases of designing thin-film precision resistors. Monograph. 2009. 287 p. (in Russian).
3. **Astashenkova O. N.** Control of physical and mechanical parameters of thin films / O. N. Astashenkova, A. V. Korlyakov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 2, pp. 24–29 (in Russian).
4. **Avanesyan R. R.** Resistive properties of thin films, 1989, 56 p. (in Russian).
5. **Sergeev V. E., Vorotynsev V. M.** Development of a modified technology for thermal stabilization of thin-film resistive elements, Design and technology of electronic means, 2021, no. 1, pp. 4–9 (in Russian).
6. **Chen C., Zhu J., Chen Y., Wang G.** Unveiling structural characteristics for ultralow resistance drift in $\text{Bi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ materials for phase-change neuron synaptic devices, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 892, 2022. 162148.
7. **Myagkov V. G., Zhigalov V. S., Bykova L. E., Solov'ev L. A., Bondarenko G. N.** Solid-phase synthesis of $\text{L}_{10}\text{-FePd}(001)$ epitaxial thin films: Structural transformations and magnetic anisotropy, *JETP Letters*, 2010, vol. 91 (9), pp. 481–485 (in Russian).
8. **Averin I. A., Pecherskaya R. M.** Control of parameters of resistive structures by annealing / Proceedings of the international symposium "Reliability and Quality", 2008, vol. 2, pp. 144–145 (in Russian).
9. Patent No. 2326460 C1 Russian Federation, IPC H01C 17/00, G01L 7/08. Method of manufacturing a high-temperature thin-film resistor: No. 2007102533/09: application 23.01.2007: publ. 10.06.2008 / I. V. Volokhov, E. V. Peskov, D. V. Popchenkov; applicant FSUE "Research Institute of Physical Measurements" (in Russian).
10. Patent No. 2700592 C1 Russian Federation, IPC H01C 17/00. Method of manufacturing a thin-film resistor: No. 2018134886: application 02.10.2018: publ. 18.09.2019 / V. N. Novozhilov; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky" (in Russian).
11. **Gurin S. A.** Research and development of thin-film heterogeneous structures of sensitive elements of pressure sensors with extreme operating conditions: specialty 05.27.01 "Solid-state electronics, radioelectronic components, micro- and nanoelectronics, devices based on quantum effects": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Gurin Sergey Alexeyovich, St. Petersburg, 2016, 157 p. (in Russian).

УДК 621.318.51, 621.3.049.7

DOI: 10.17587/nmst.25.86-96

А. В. Ткаченко¹, мл. науч. сотрудник, e-mail: alexeytkachenko@sfedu.ru,

И. Е. Лысенко¹, д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, e-mail: ielysenko@sfedu.ru,

А. В. Козлов², канд. техн. наук, руководитель,

¹ Южный федеральный университет, Дизайн-центр микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта, Ростовская область, г. Таганрог, 347922, Российская Федерация,

² Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники" (МИЭТ), Центр коллективного проектирования электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры, г. Москва, Зеленоград, 124498, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЧАСТОТНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ РАБОТЫ В ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ СИСТЕМАХ 5G

Поступила в редакцию 28.10.2022

Представлены результаты экспериментального исследования электромагнитных параметров (параметров рассеяния) изготовленного экспериментального образца емкостного однополюсного одностороннего радиочастотного микромеханического переключателя с электростатическим механизмом активации, предназначенного для работы в приемопередающих радиомодулях мобильных сетей 5G в частотном диапазоне NR FR1, а именно на центральной резонансной электрической частоте 3,6 ГГц. Эффективным диапазоном рабочих частот разработанного и изготовленного экспериментального образца радиочастотного микромеханического переключателя является S-диапазон частот. Основу разработки представленного экспериментального образца составляет методология проектирования емкостных радиочастотных микромеханических переключателей с электростатическим механизмом активации.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, МЭМС, переключатель, радиочастотный, РЧ, РЧ МЭМС, экспериментальный образец, электромагнитные параметры, параметры рассеяния, приемопередающие системы 5G

Введение

За последнее десятилетие устройства, изготовленные с использованием технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), успешно развивались в различных областях информационных и коммуникационных технологий. Одна из наиболее перспективных областей применения устройств на основе МЭМС-технологий связана со схемами и устройствами радиочастотной (РЧ) и сверхвысокочастотной (СВЧ) связи.

В последние годы внедрение и распространение новых стандартов беспроводной мобильной радиосвязи пятого поколения — 5G, поставило новые задачи в разработке аппаратных средств для передатчиков, приемников и приемопередающих устройств [1]. На уровне одного отдельного электронного устройства наиболее важными характеристиками, которые следует учитывать, являются: низкое энергопотребление, высокая линейность и высокая пропускная способность (реконфигурируемость/гибкость), которые должны характеризовать каждый компонент для обеспечения высокой производительности систем беспроводной мобильной радиосвязи 5G. Поскольку в данной технологии используется широкий класс компонентов, таких как широкополосные переключатели, блоки коммутации, многопозиционные преобразователи импеданса и многопозиционные фазовращатели, реконфигурируемые фильтры, а также миниатюрные смарт-антенны и антенные решетки, то эти компоненты потребуют самообновления в целях поддержки высокой производительности беспроводной мобильной радиосвязи 5G [2]. В то же время можно отметить, что во всех РЧ системах или подсистемах 5G с аппаратной точки зрения РЧ переключатель является одним из наиболее фундаментальных и важных РЧ компонентов, который используется для маршрутизации РЧ сигналов по РЧ линиям передачи с высокой степенью эффективности [3].

В настоящее время среди всех классов РЧ устройств коммутации активные полупроводниковые переключатели на основе PIN диодов являются наиболее популярными. На частотах до 10 ГГц им практически нет равных по быстродействию, простоте схемотехнических решений и дешевизне. Однако, начиная с частот 8 ГГц и более, PIN диодные переключатели не способны обеспечить высокую изоляцию в закрытом положении переключателя, даже при каскадировании. Это связано с возрастающим влиянием барьерной емкости. Эта проблема частично решается использованием активных полупроводниковых РЧ переключателей на основе полевых транзисторов (FET), однако на частотах до 40 ГГц в основном используют коаксиальные переключатели, у которых хорошие РЧ параметры, но высокая стоимость. На частотах до 1 ГГц

иногда используют РЧ электромеханические реле, но к их недостаткам относятся крайне низкое быстродействие, высокие энергопотребление и массогабаритные характеристики. РЧ МЭМС-переключатели могут эффективно заменить активные полупроводниковые аналоги на основе PIN-диодов на частотах до 10 ГГц и конкурировать с транзисторными и коаксиальными РЧ переключателями в диапазоне до 40 ГГц и более. Кроме того, в соответствии с концепцией, представленной в работах [4—9], ключевые РЧ системы и подсистемы систем 5G могут быть заменены соответствующими РЧ МЭМС-устройствами в целях существенного повышения их производительности, а также снижения аппаратной сложности, например, путем объединения нескольких функций в одном РЧ устройстве.

Классификация и проблематика РЧ МЭМС-переключателей

РЧ МЭМС-переключатели классифицируют в соответствии с механизмом активации — приведением в движение исполнительного (замыкающего/размыкающего) элемента конструкции, перемещением подвешенных частей, типом контакта, типом используемого механизма и электрической конфигурацией. На сегодняшний день электростатические РЧ МЭМС-переключатели являются наиболее распространенными среди микромеханических переключателей. Это связано с практическим нулевым энергопотреблением в режиме активации (замыкания) РЧ переключателя, небольшим размером конструкции, совместимостью процесса изготовления с технологическими процессами изготовления ИС с использованием кремниевой технологии и технологии на основе соединений $A^{III}B^V$, относительной простотой изготовления и малым временем переключения. В свою очередь, электростатические РЧ МЭМС-переключатели делят на два типа: 1) консольные — резистивный тип контакта металл-металл; 2) мембранные — емкостной тип контакта металл-диэлектрик-металл (МДМ). Емкостной РЧ МЭМС-переключатель более распространен при проектировании [10].

В ряде работ сообщается о разработке емкостных РЧ МЭМС-переключателей с хорошим электромагнитным откликом, однако данные РЧ переключатели имеют высокие значения напряжения активации (в ряде научных работ 20...50 В и более) и занимаемую площадь на чипе [10]. Другой проблемой емкостных РЧ МЭМС-переключателей является несовершенная шероховатость контактирующих тонких пленок металл-диэлектрик, что приводит к снижению коэффициента емкости этого типа РЧ переключателей [10]. Снижение значения коэффициента емкости, в свою очередь, приводит к смещению электрической резонансной частоты

от требуемой и снижению значения изоляции в замкнутом положении РЧ переключателя. Существует ряд исследований, которые были проведены для достижения высокого значения коэффициента емкости и низкого значения напряжения активации. В работе [11] предложена конструкция емкостного РЧ МЭМС-переключателя с использованием керамического диэлектрического слоя с высокой диэлектрической проницаемостью. В работе [12] высокий коэффициент емкости был достигнут за счет использования изогнутой конструкции металлической мембранны. Другим методом, применяемым для достижения высокого значения коэффициента емкости, является увеличение воздушного зазора между металлической мембраной и диэлектрическим слоем [13]. Однако у этих способов есть некоторые очевидные недостатки, которые заключаются в том, что проблема заряда диэлектрического слоя становится более существенной, чем меньше толщина осажденного диэлектрического слоя, и электромеханические параметры переключателя, изменяющиеся при изменении воздушного зазора. В связи с этим методы, используемые в [11–13], не позволяют в полной мере исключить существующие недостатки емкостных РЧ МЭМС-переключателей.

Для того чтобы устранить недостатки, описанные выше, необходимо объединить конструктивные методы проектирования емкостных РЧ МЭМС-переключателей со способами использования диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью для получения высокого значения коэффициента емкости и хорошего РЧ отклика. Между тем, в нескольких работах были предложены некоторые подходы для получения высокого значения коэффициента емкости, который заключается в использовании диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. К таким диэлектрическим материалам относятся: HfO_2 ($\epsilon_r = 20$) [14], STO ($\epsilon_r = 30\ldots120$) [15], Ta_2O_5 ($\epsilon_r = 32$) [16], $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ ($\epsilon_r > 200$) [17], PZT ($\epsilon_r = 190$) [18] и металлоксидные диэлектрики с высокими диэлектрическими характеристиками [18]. В результате значение коэффициента емкости емкостных РЧ МЭМС-переключателей составляет более 100 [18]. Однако значение коэффициента емкости ограничено минимальной толщиной диэлектрического слоя, максимальным значением диэлектрической проницаемости и максимальным значением воздушного зазора между подвижным электродом и РЧ линией передачи КПВ.

Цели и задачи

Цель данной статьи — разработка и изучение электромагнитных параметров конструкции емкостного РЧ МЭМС-переключателя, имеющего

высокий коэффициент емкости и небольшой воздушный зазор, с использованием комбинированного подхода. Такой подход к увеличению величины коэффициента емкости заключается в использовании конструкции плавающего металлического подвижного электрода без ограничений минимальной толщины диэлектрического слоя и минимального значения воздушного зазора, а также в применении диэлектрического материала с высокой диэлектрической проницаемостью. Плавающий металлический слой включен в конструкцию РЧ МЭМС-переключателя для того чтобы исключить снижение величины коэффициента емкости вследствие остаточных механических или термических напряжений и дефектов шероховатости поверхности после технологических операций изготовления устройства. Разработанный РЧ МЭМС-переключатель спроектирован на основе разработанной методологии проектирования высокопроизводительных емкостных РЧ МЭМС-переключателей, которая позволяет проектировать РЧ МЭМС-переключатели с требуемыми электромеханическими и электромагнитными параметрами для определенной области применения, в частности, для РЧ систем и подсистем беспроводной мобильной радиосвязи 5G.

Методология проектирования

РЧ характеристики РЧ МЭМС-переключателей являются важным фактором наряду с электромеханическими характеристиками не только в сценарии их использования в устройствах РЧ систем и подсистем беспроводной мобильной радиосвязи 5G [19]. Традиционная оптимизация конструкций МЭМС-устройств в основном основана на независимых оптимизациях конструкции устройства с одной физикой, соответствующей каждому физическому процессу или явлению, а затем логическая комбинация независимо оптимизированных конструкций обеспечивает общую оптимальную конструкцию МЭМС-устройства, как показано на рис. 1.

Традиционные методы оптимизации ограничены откликом одного выходного параметра МЭМС-устройства и основаны на оптимизации в одной области физики и логической комбинации отдельных конструкций, которая обеспечивает общую оптимизацию [20, 21]. Однако эти методы не являются эффективным подходом для МЭМС-устройств, в частности РЧ МЭМС-устройств, которые представляют собой сложные структуры с мультифизическим взаимодействием. Разработанная методология проектирования высокопроизводительных емкостных РЧ МЭМС-переключателей и оптимизация рабочих параметров основана на мультифизическом моделировании с помощью метода конечных элементов (МКЭ), как показано на рис. 2.

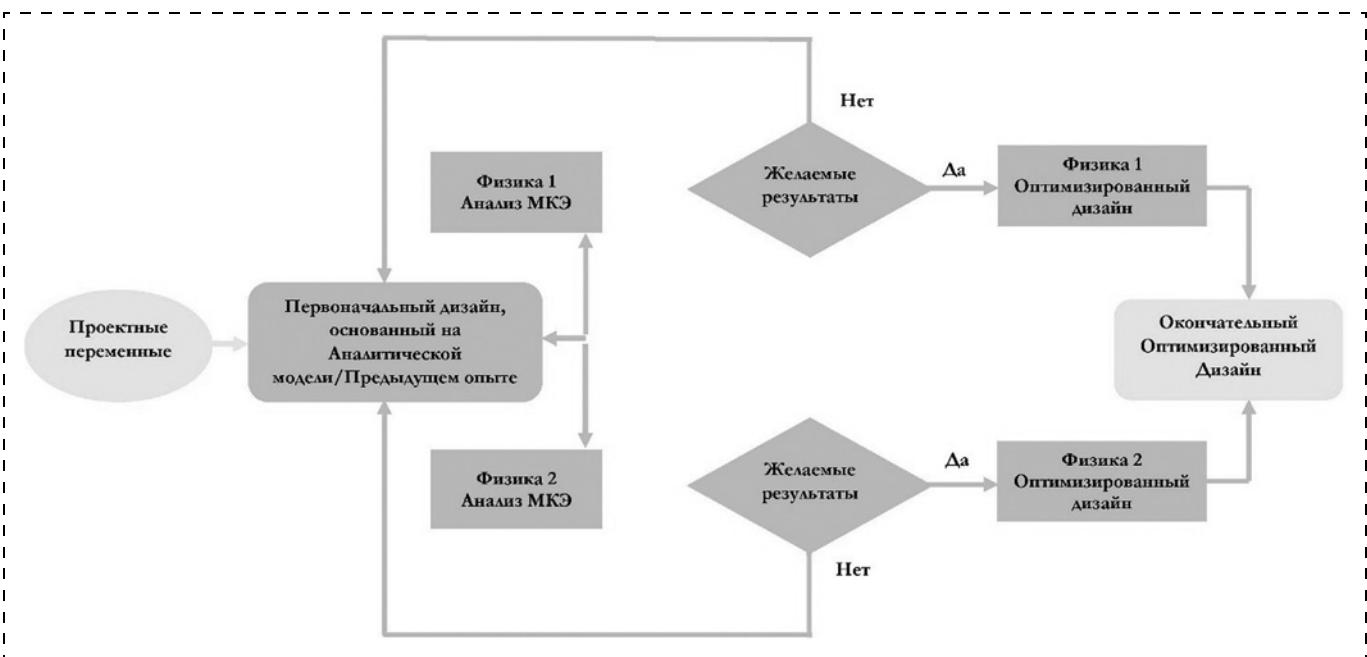


Рис. 1. Традиционный подход к оптимизации конструкций МЭМС-устройств

Основой этого подхода является разработка емкостного РЧ МЭМС-переключателя для передачи РЧ сигнала на основе резонансной частоты для определенных приложений и устройств. РЧ МЭМС-переключатель состоит из пяти уровней. Оптимизация каждого уровня, начиная с КПВ и подложки и заканчивая неподвижным дополнительным конденсатором с диэлектрическим слоем, характеризующимся высоким значением диэлектрической проницаемости (high-k). Рассматриваемая методология является подходящим инструментом для разработки емкостных РЧ МЭМС-переключателей с использованием технологии поверхностной микрообработки. В то же время различные уровни процесса проектирования предусматривают аналитические расчеты и моделирование с использованием программных средств автоматизированного проектирования и МКЭ, с проверкой соответствия ключевым параметрам проектирования. Если ключевые проектные параметры не выполняются на одном из этапов проектирования, уровень возвращается к предыдущему этапу для достижения требуемых значений. В конечном счете достигается оптимизированная конструкция емкостного РЧ МЭМС-переключателя, предназначенного для работы на определенной электрической резонансной частоте или в определенном диапазоне частот.

Апробация методологии, проектирование конструкции емкостного РЧ МЭМС-переключателя

В соответствии с предложенной методологией проектирования (см. рис. 2) была разработана

конструкция емкостного РЧ МЭМС-переключателя, как показано на рис. 3. Данная конструкция представляет собой емкостной РЧ МЭМС-переключатель с традиционным расположением элементов конструкции. Однако в целях увеличения коэффициента емкости в данной конструкции представлен дополнительный неподвижный МДМ-конденсатор высокой емкости, образованный частью металлического слоя РЧ линии передачи КПВ, тонким диэлектрическим слоем TiO_2 ($t_{TiO_2} = 200$ нм) и верхним неподвижным металлическим слоем, расположенным на поверхности диэлектрического слоя. Представленное решение позволяет без увеличения площади элементов РЧ МЭМС-переключателя существенно повысить коэффициент емкости разработанного РЧ МЭМС-переключателя.

Для определения значения коэффициента емкости в разработанной конструкции дополнительного неподвижного МДМ-конденсатора был введен параметр δ , который равен $\frac{A_{MAM}}{A_{MIM}}$, где A_{MAM} —

эффективная площадь переменного конденсатора, образованного подвижной мембраной, верхним неподвижным металлическим слоем дополнительного неподвижного МДМ конденсатора и воздушным пространством между ними; A_{MIM} — площадь дополнительного неподвижного МДМ-конденсатора. Если пренебречь граничными эффектами значения емкости в верхнем C_{up} и нижнем C_{down} положениях подвижной мембранны, то коэффици-

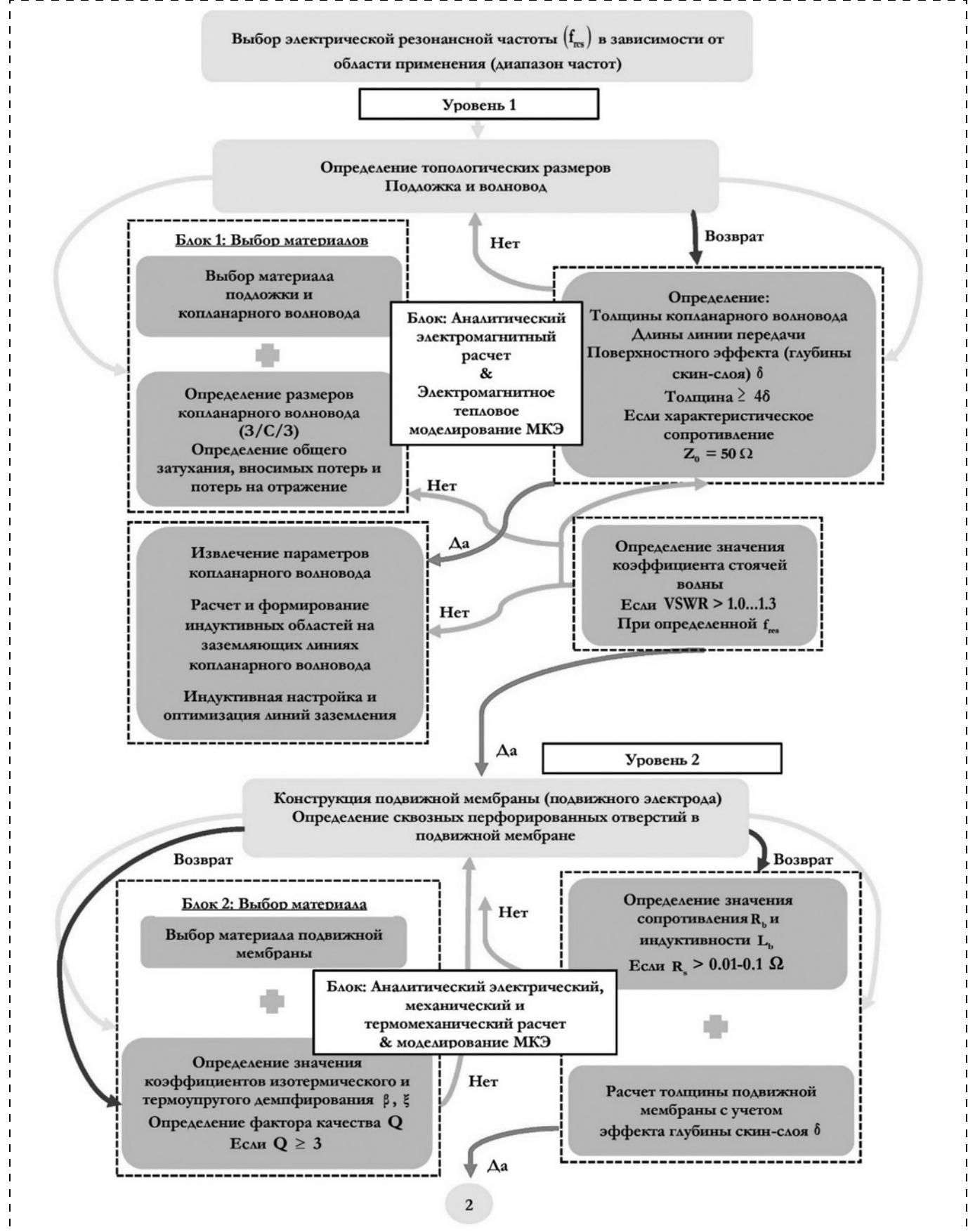
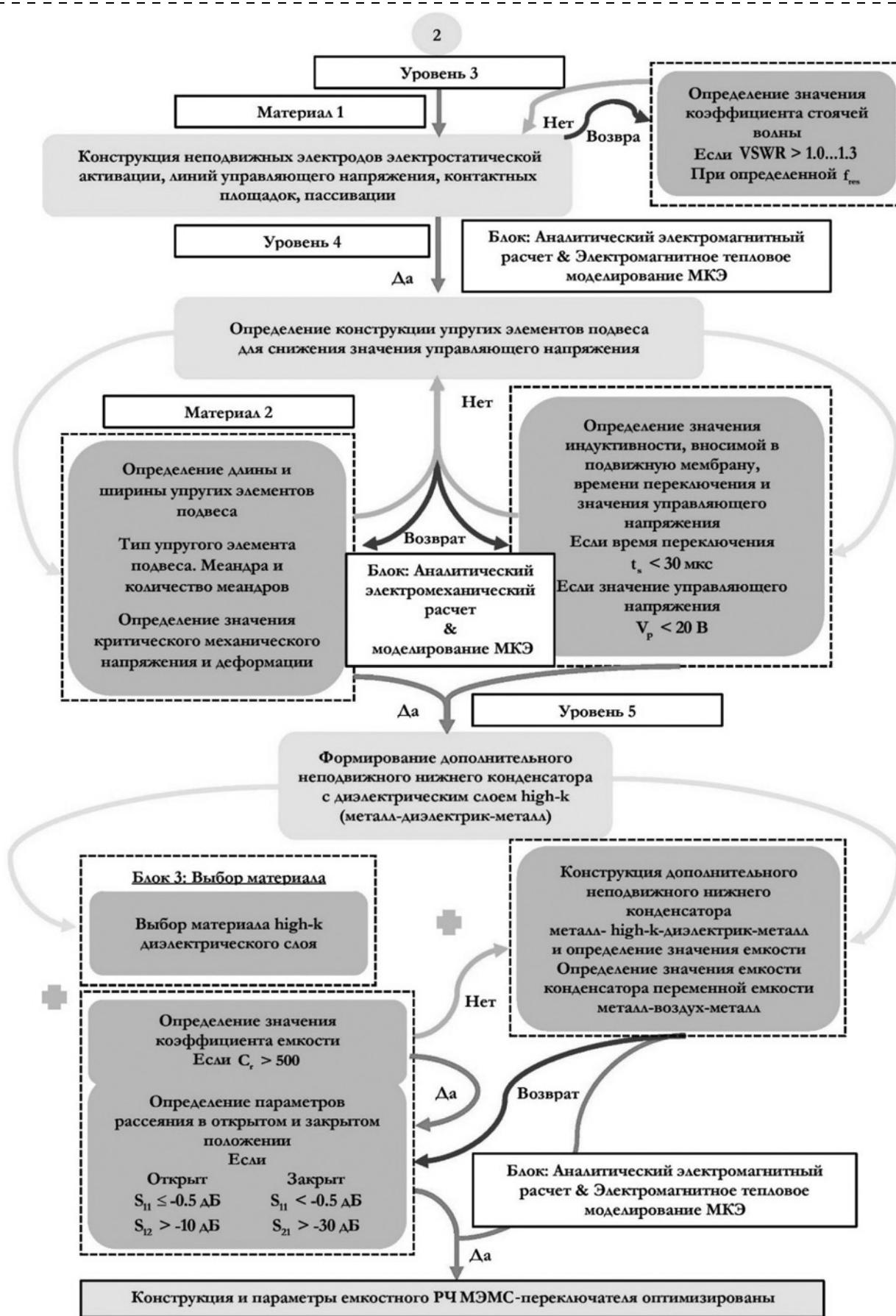


Рис. 2. Разработанная методология проектирования и оптимизации рабочих параметров высокопроизводительных емкостных РЧ МЭМС-переключателей



Окончание рис. 2

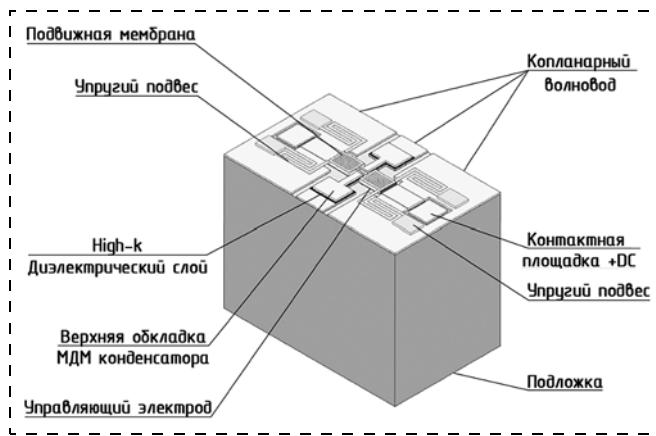


Рис. 3. 3D-модель разработанного емкостного РЧ МЭМС-переключателя

ент емкости C_r может быть определен следующим уравнением:

$$C_r = \frac{C_{\text{up}}}{C_{\text{down}}} = \frac{C_{\text{MIM}}}{C_{\text{MIM}} \parallel C_{\text{MAM}}} = \frac{C_{\text{MIM}}}{C_{\text{MAM}}} + 1 = \\ = \frac{\varepsilon_r g_0}{t_d} \frac{A_{\text{MIM}}}{A_{\text{MAM}}} + 1 = \frac{\varepsilon_r g_0}{t_d} \delta + 1,$$

при этом

$$C_{\text{MIM}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{t_d} A_{\text{MIM}}; \quad C_{\text{MAM}} = \frac{\varepsilon_0}{g_0} A_{\text{MAM}}; \\ g_0 = \frac{\left(\frac{C_r - 1}{\delta}\right) t_d}{\varepsilon_r},$$

где ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость воздушного пространства; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрического слоя ($\varepsilon_r = 80$); t_d — толщина диэлектрического слоя TiO_2 ; g_0 — значение воздушного зазора между подвижной мемброй и верхним неподвижным металлическим слоем дополнительного неподвижного МДМ-конденсатора.

В качестве материала подложки для изготовления разработанного емкостного РЧ МЭМС-переключателя, согласно ранее разработанной методологии выбора материалов [21–23], был выбран сапфир толщиной 0,5 мм, диаметр пластин 100 мм, С-ориентации. Сапфир обладает высокой $\varepsilon_r = 11,5$, что дает возможность уменьшить размеры кристалла переключателя и повысить диапазон рабочих частот, а малый тангенс угла диэлектрических потерь позволяет снизить потери в полосе пропускания.

Последовательность формирования технологических слоев разработанного емкостного РЧ МЭМС-переключателя на сапфировых подложках представлена на рис. 4, a. На рис. 4, б схематически представлена переходная плата, содержащая конструкцию разработанного емкостного РЧ МЭМС-

переключателя, и предназначенная для монтажа в специализированный РЧ корпус с коаксиальными РЧ выводами. Переходная плата закреплена в РЧ корпусе с помощью полиимидного клея. Распайку соответствующих контактов (РЧ выводов и контактных площадок, контактных площадок для подачи управляющего напряжения) выполняют с помощью золотой проволоки $d = 40$ мкм.

На рис. 5 представлены фотографии фрагментов изготовленных экспериментальных образцов емкостного РЧ МЭМС-переключателя в процессе отработки технологических операций, полученные с использованием растрового электронного микроскопа.

На рис. 6 представлена фотография топологии изготовленного экспериментального образца емкостного РЧ МЭМС-переключателя, полученная с помощью оптического электронного микроскопа, при этом в фокусе представлены фрагменты подвижной металлической мембраны и упругий змеевидный подвес.

На рис. 7 дана фотография изготовленных экспериментальных образцов емкостных РЧ МЭМС-переключателей в специализированном РЧ корпусе с коаксиальными выводами с открытой крышкой герметизации. Данный РЧ корпус предназначен для работы в электронных цепях передачи сигнала высокой частоты (до 10 ГГц) с согласованием 50 Ом. РЧ вход и РЧ выход представляют собой РЧ коаксиальные разъемы, позволяющие свести до минимума потери в местах соединения. Контактные

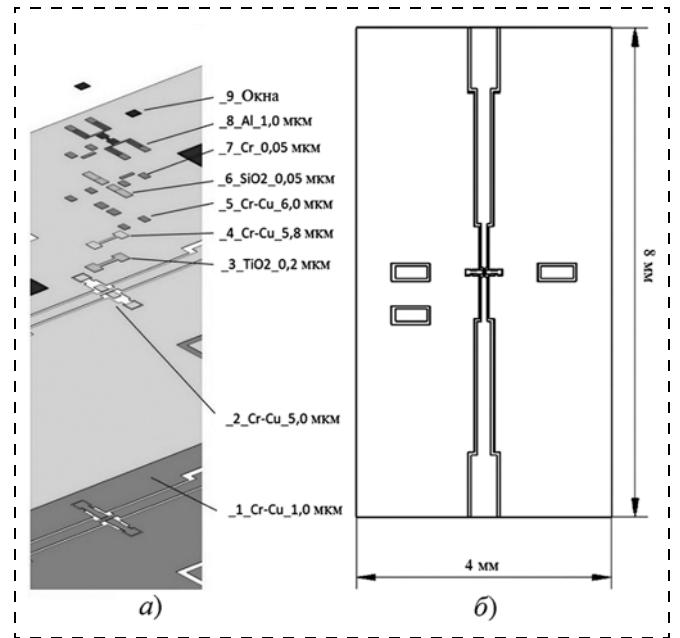


Рис. 4. Схематическое изображение:

а — последовательности технологических слоев разработанного емкостного РЧ МЭМС-переключателя; б — переходной платы для монтажа в коаксиальный РЧ корпус

площадки для подачи постоянного управляющего напряжения в целях обеспечения электростатической активации РЧ МЭМС-переключателя представляют собой тонкопленочные покрытия, выведенные на поверхность данного РЧ корпуса. Кроме того, одним из достоинств выбранного метода корпусирования является возможность проведения последующих лабораторных испытаний и измерений изготовленных экспериментальных образцов РЧ МЭМС-переключателей с помощью лабораторного оборудования, а также без применения специализированных отладочных СВЧ плат.

Параметры передачи РЧ сигнала разработанным емкостным РЧ МЭМС-переключателем измеряли с помощью векторного анализатора электрических цепей Rohde & Schwarz ZVB-20 и линейного источника питания GW Insteek GPD-73303S. На рис. 8 представлены параметры передачи РЧ сигнала изготовленными экспериментальными образцами емкостного РЧ МЭМС-переключателя. Электромагнитные параметры измеряют в двух устойчивых состояниях: открытое состояние (исходное, напряжение активации отсутствует) и закрытое состояние (замкнутое — электростатическая активация).

Согласно проведенным экспериментальным измерениям электромагнитных характеристик изготовленных экспериментальных образцов емкостных РЧ МЭМС-переключателей в широком диапазоне частот от 0 Гц (DC) до 50 ГГц. Центральная электрическая резонансная частота для экспериментального образца составляет 3,6 ГГц. В открытом состоянии значение вносимых потерь S_{11} составляет $-0,07$ дБ, потеря на отражение S_{12} не более $-44,2$ дБ. В закрытом состоянии значение изоляции S_{21} на центральной резонансной частоте составляет $-43,25$ дБ. Значение контактного сопротивления составляет 0,7 Ом.

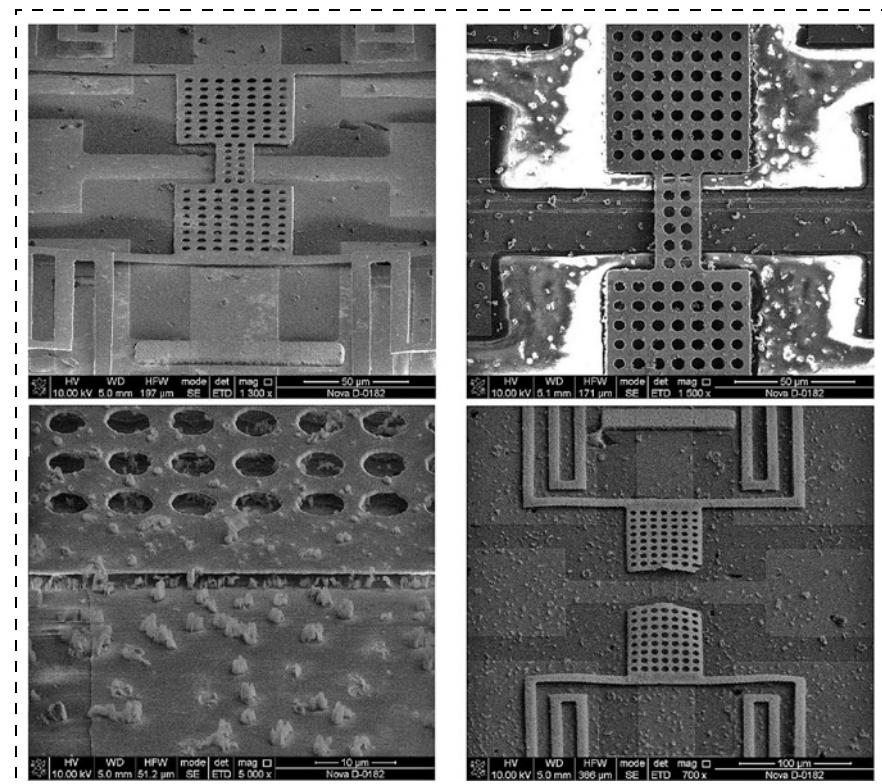


Рис. 5. Фотографии с растрового электронного микроскопа процесса отработки этапов технологического процесса изготовления экспериментальных образцов емкостного РЧ МЭМС-переключателя

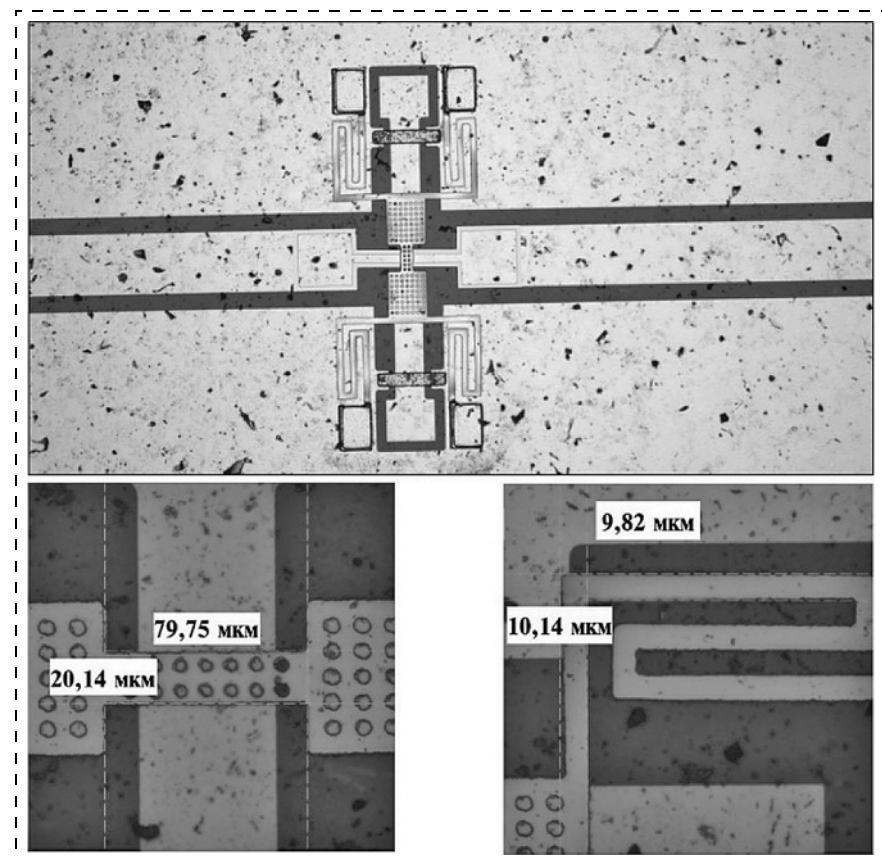


Рис. 6. Фотография с оптического электронного микроскопа топологии экспериментального образца емкостного РЧ МЭМС-переключателя



Рис. 7. Фотографии изготовленных экспериментальных образцов емкостных РЧ МЭМС-переключателей в специализированном РЧ корпусе с коаксиальными выводами и открытой крышкой герметизации

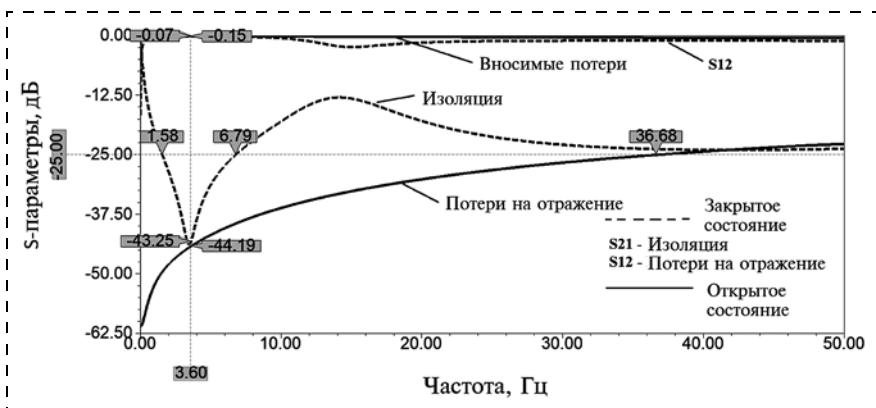


Рис. 8. Результаты электромагнитного исследования изготовленных экспериментальных образцов емкостных РЧ МЭМС-переключателей в специализированном РЧ корпусе

Значение управляющего напряжения — напряжение замыкания переключателя составляет 5 В. Эффективным рабочим диапазоном частот является S-частотный диапазон, который полностью соответствует частотному диапазону РЧ систем и подсистем мобильных сетей 5G NR FR1.

Заключение

В данной работе представлены результаты проектирования и измерения электромагнитных параметров изготовленных экспериментальных образцов высокопроизводительного емкостного РЧ МЭМС-переключателя, предназначенного для работы в приемопередающих РЧ системах мобильных сетей 5G, в частности, для диапазона частот 5G NR FR1 3,6 ГГц. Представленный в данной работе емкостной РЧ МЭМС-переключатель разработан в соответствии с представленной методологией проектирования, которая позволяет проектировать и оптимизировать параметры емкостных РЧ МЭМС-переключателей для определенной элект-

рической резонансной частоты, полосы частот или области применения, например, для спутниковых и наземных РЧ систем, радаров, автоматизированного измерительного и испытательного оборудования, медицинских систем, и т. д.

Выражается благодарность Центру коллективного проектирования электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры Национального исследовательского университета "Московский институт электронной техники" (МИЭТ) за помощь в проведении части технологических операций по изготовлению экспериментальных образцов емкостных РЧ МЭМС-переключателей, а также в проведении ряда экспериментальных исследований.

Научные исследования выполнены за счет средств федерального бюджета, в рамках научной деятельности по теме "Разработка и исследование методов и средств мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния инженерных объектов на основе искусственного интеллекта" (задание № FENW-2020-0022).

Список литературы

1. GSMA. 5G Implementation Guidelines // [Электронный ресурс], 2019. URL: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2019/03/5G-Implementation-Guideline-v2.0-July-2019.pdf> (дата обращения 13.02.2023).
2. SkyWorks. SkyWorks: 5G in Perspective A Pragmatic Guide to What's Next // [Электронный ресурс], 2021. URL: <https://www.skyworksinc.com/-/media/skyworks/documents/products/2701-2800/5g-white-paper.pdf> (дата обращения 13.02.2023).
3. OMDIA. First-generation 5G designs highlight critical importance of modem and RF integration in future smartphones // [Электронный ресурс], 2019. URL: [https://omdia.tech.informa.com/-/media/tech/omdia/assetfamily/2019/08/12/first-generation-5g-designs-highlight-critical-importance-of-modem-and-rf-integration-in-future-smart/pdf.pdf?sc_lang=en](https://omdia.tech.informa.com/-/media/tech/omdia/assetfamily/2019/08/12/first-generation-5g-designs-highlight-critical-importance-of-modem-and-rf-integration-in-future-smart/exported/firstgeneration-5g-designs-highlight-critical-importance-of-modem-and-rf-integration-in-future-smart-pdf.pdf?sc_lang=en) (дата обращения 13.02.2023).
4. Nguyen C. T.-C. Microelectromechanical devices for wireless communications // Proceedings MEMS 98. IEEE. Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems. 1998. P. 1—7.
5. Nguyen C. T.-C. Transceiver front-end architectures using vibrating micromechanical signal processors // Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. Digest of Papers. 2001. P. 23—32.

6. **Nguyen C. T.-C.** RF MEMS for wireless applications // In 60th DRC. Conference Digest Device Research Conference. 2002. P. 9–12.
7. **Nguyen C. T.-C.** Integrated micromechanical circuits for RF front ends // Proceedings of the 32nd European Solid-State Circuits Conference. 2006. P. 7–16.
8. **Nguyen C. T.-C.** MEMS technology for timing and frequency control // In IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2007. Vol. 54. No. 2. P. 251–270.
9. **Nguyen C. T.-C.** MEMS-based RF channel selection for true software-defined cognitive radio and low-power sensor communications // In IEEE Communications Magazine. 2013. Vol. 51. No. 4. P. 110–119.
10. **Rebeiz G. M.** RF MEMS: Theory, Design, and Technology // John Wiley & Sons: New York, NY, USA. 2004. P. 1–21.
11. **Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W., Bu J. U.** Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2000. Vol. 1. P. 283–286.
12. **Al-Dahleh R., Mansour R. R.** High-capacitance-ratio warped-beam capacitive MEMS switch designs // Journal of Microelectromechanical Systems. 2010. Vol. 19. P. 538–547.
13. **Chang C., Chang P.** Innovative micromachined microwave switch with very low insertion loss // Sensors and Actuators A: Physical. 2010. Vol. 79. P. 71–75.
14. **Angira M., Sundram G. M., Bansal D.** et al. On the investigation of an interdigitated, high capacitance ratio shunt RF-MEMS switch for X-band applications // Proceeding of NSTI Nanotechnology. 2013. Vol. 2. P. 189–192.
15. **Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W., Bu J. U.** Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applica-
- tions // EEE MTT-S Int Microwave Symposium Digest. 2000. P. 283–286.
16. **Persano A., Quaranta F., Cola A.** et al. Ta₂O₅ thin films for capacitive RF MEMS switches // Journal of Sensors. 2010. P. 1–6.
17. **Liu Y., Taylor T. R., Speck J. S.** et al. High-isolation BST-MEMS switches // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2002. Vol. 1. P. 227–230.
18. **Ziae A., Dean T., Mancuso Y.** Lifetime characterization of capacitive power RF MEMS switches // European Gallium Arsenide and Other Semiconductor Application Symposium. 2005. Vol. 3. P. 227–230.
19. **Giacomozzi F., Calaza C., Colpo S., Mulloni V.** et al. Development of high coefficient ratio RF MEMS shunt switches // Romanian Journal of Information. 2008. Vol. 11. No. 2. P. 143–151.
20. **Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W., Bu J. U.** Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2000. Vol. 1. P. 283–286.
21. **Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Ezhova O. A.** Research of the microelectromechanical switch with different materials of metal membrane // Proceedings of SPIE. 2019. Vol. 10226. P. 1–12.
22. **Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Ezhova O. A., Kono-plev B. G., Ryndin E. A., Sherova E. V.** The Mechanical Effects Influencing on the Design of RF MEMS Switches // Electronics. 2020. Vol. 9, No. 2. P. 1–26.
23. **Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Sherova E. V., Nikitin A. V.** Analytical Approach in the Development of RF MEMS Switches Electronics // Electronics. 2018. Vol. 7, No. 12. P. 1–23.

A. V. Tkachenko¹, Research Assistant, e-mail: alexeytkachenko@sfedu.ru,
I. E. Lysenko¹, Doctor of Engineering Sciences, Chief Research Officer, e-mail: ielysenko@sfedu.ru,
A. V. Kozlov², Ph.D. of Engineering Sciences, Head of the Division,

¹ Southern Federal University, Design Center of the Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems, Rostov-on-Don region, Taganrog, 347922, Russia,

² National Research University of Electronic Technology (MIET), Center for Collective Design of Electronic component Base and Electronic Equipment, Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation

Corresponding author:

Aleksey V. Tkachenko, Research Assistant, Southern Federal University, Design Center of the Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems, Rostov-on-Don region, Taganrog, 347922, Russia, e-mail: alexeytkachenko@sfedu.ru

Research of Electromagnetic Parameters of the Radio-Frequency Micromechanical Switch Designed for Operation in 5G Transceiver Systems

Received on October 28, 2022

Accepted on November 20, 2022

This article presents the results of an experimental study of the electromagnetic parameters (scattering parameters) of a manufactured experimental sample of a capacitive single-pole single-throw radio-frequency micromechanical switch with an electrostatic activation mechanism designed to operate in the transceiver radio-modules of 5G mobile networks in the frequency range NR FR1, namely at a central resonant electrical frequency of 3,6 GHz. The effective operating frequency range of the developed and manufactured experimental sample of a radio-frequency micromechanical switch is the S-frequency range. The basis for the development of the presented experimental sample is the developed methodology for designing capacitive radio-frequency micromechanical switches with an electrostatic activation mechanism.

Keywords: microelectromechanical systems, MEMS, switch, radio-frequency, RF, RF MEMS, experimental sample, electromagnetic parameters, scattering parameters, 5G

For citation:

Tkachenko A. V., Lysenko I. E., Kozlov A. V. Research of Electromagnetic Parameters of the Radio-Frequency Micromechanical Switch Designed for Operation in 5G Transceiver Systems, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 86–96.

DOI: 10.17587/nmst.25.86-96

References

1. **GSMA.** 5G Implementation Guidelines, 2019. Available at: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2019/03/5G-Implementation-Guideline-v2.0-July-2019.pdf> (accessed 13.02.2023).
2. **SkyWorks.** SkyWorks: 5G in Perspective A Pragmatic Guide to What's Next, 2021. Available at: <https://www.skyworksinc.com/-/media/skyworks/documents/products/2701-2800/5g-white-paper.pdf> (accessed 13.02.2023).
3. **OMDIA.** First-generation 5G designs highlight critical importance of modem and RF integration in future smartphones, 2019. Available at: https://omdia.tech.informa.com/-/media/tech/omdia/assetfamily/2019/08/12/firstgeneration-5g-designs-highlight-critical-importance-of-modem-and-rf-integration-in-future-smart/exported/firstgeneration-5g-designs-highlight-critical-importance-of-modem-and-rf-integration-in-future-smart-pdf.pdf?sc_lang=en (accessed 13.02.2023).
4. **Nguyen C. T.-C.** Microelectromechanical devices for wireless communications, *Proceedings MEMS 98. IEEE. Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems*, 1998. pp. 1–7.
5. **Nguyen C. T.-C.** Transceiver front-end architectures using vibrating micromechanical signal processors, *Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. Digest of Papers*, 2001. pp. 23–32.
6. **Nguyen C. T.-C.** RF MEMS for wireless applications, *In 60th DRC. Conference Digest Device Research Conference*, 2002. pp. 9–12.
7. **Nguyen C. T.-C.** Integrated micromechanical circuits for RF front ends, *Proceedings of the 32nd European Solid-State Circuits Conference*, 2006. pp. 7–16.
8. **Nguyen C. T.-C.** MEMS technology for timing and frequency control, *In IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, vol. 54, no. 2, pp. 251–270.
9. **Nguyen C. T.-C.** MEMS-based RF channel selection for true software-defined cognitive radio and low-power sensor communications, *In IEEE Communications Magazine*, 2013, vol. 51, no. 4, pp. 110–119.
10. **Rebeiz G. M.** RF MEMS: Theory, Design, and Technology. John Wiley & Sons: New York, 2004, NY, USA, pp. 1–21.
11. **Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W., Bu J. U.** Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2000, vol. 1, pp. 283–286.
12. **Al-Dahleh R., Mansour R. R.** High-capacitance-ratio warped-beam capacitive MEMS switch designs, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, vol. 19, pp. 538–547.
13. **Chang C., Chang P.** Innovative micromachined microwave switch with very low insertion loss, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, vol. 79, pp. 71–75.
14. **Angira M., Sundram G. M., Bansal D.** et al. On the investigation of an interdigitated, high capacitance ratio shunt RF-MEMS switch for X-band applications, *Proceeding of NSTI Nanotechnology*, 2013, vol. 2, pp. 189–192.
15. **Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W., Bu J. U.** Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications, *IEEE MTT-S Int Microwave Symposium Digest*, 2000, pp. 283–286.
16. **Persano A., Quaranta F., Cola A.** et al. Ta₂O₅ thin films for capacitive RF MEMS switches, *Journal of Sensors*, 2010, pp. 1–6.
17. **Liu Y., Taylor T. R., Speck J. S.** et al. High-isolation BST-MEMS switches, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2002, vol. 1, pp. 227–230.
18. **Ziae A., Dean T., Mancuso Y.** Lifetime characterization of capacitive power RF MEMS switches, *European Gallium Arsenide and Other Semiconductor Application Symposium*, 2005, vol. 3, pp. 227–230.
19. **Giacomozi F., Calaza C., Colpo S., Mulloni V.** et al. Development of high coefficient ratio RF MEMS shunt switches, *Romanian Journal of Information*, 2008, vol. 11, no. 2, pp. 143–151.
20. **Park J. Y., Kim G. H., Chung K. W., Bu J. U.** Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2000, vol. 1, pp. 283–286.
21. **Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Ezhova O. A.** Research of the microelectromechanical switch with different materials of metal membrane, *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 10226, pp. 1–12.
22. **Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Ezhova O. A., Konoplev B. G., Ryndin E. A., Sherova E. V.** The Mechanical Effects Influencing on the Design of RF MEMS Switches, *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 1–26.
23. **Lysenko I. E., Tkachenko A. V., Sherova E. V., Nikitin A. V.** Analytical Approach in the Development of RF MEMS Switches Electronics, *Electronics*, 2018, vol. 7, no. 12, pp. 1–23.

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 14.02.2023. Подписано в печать 28.03.2023. Формат 60×88 1/8. Заказ МС223. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунок к статье Н. В. Андреевой, А. Е. Петухова, Е. А. Рындиной, В. В. Лучинина, В. М. Айвазяна
«СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ КАК МЕТОД АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В МЕМРИСТИВНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ»

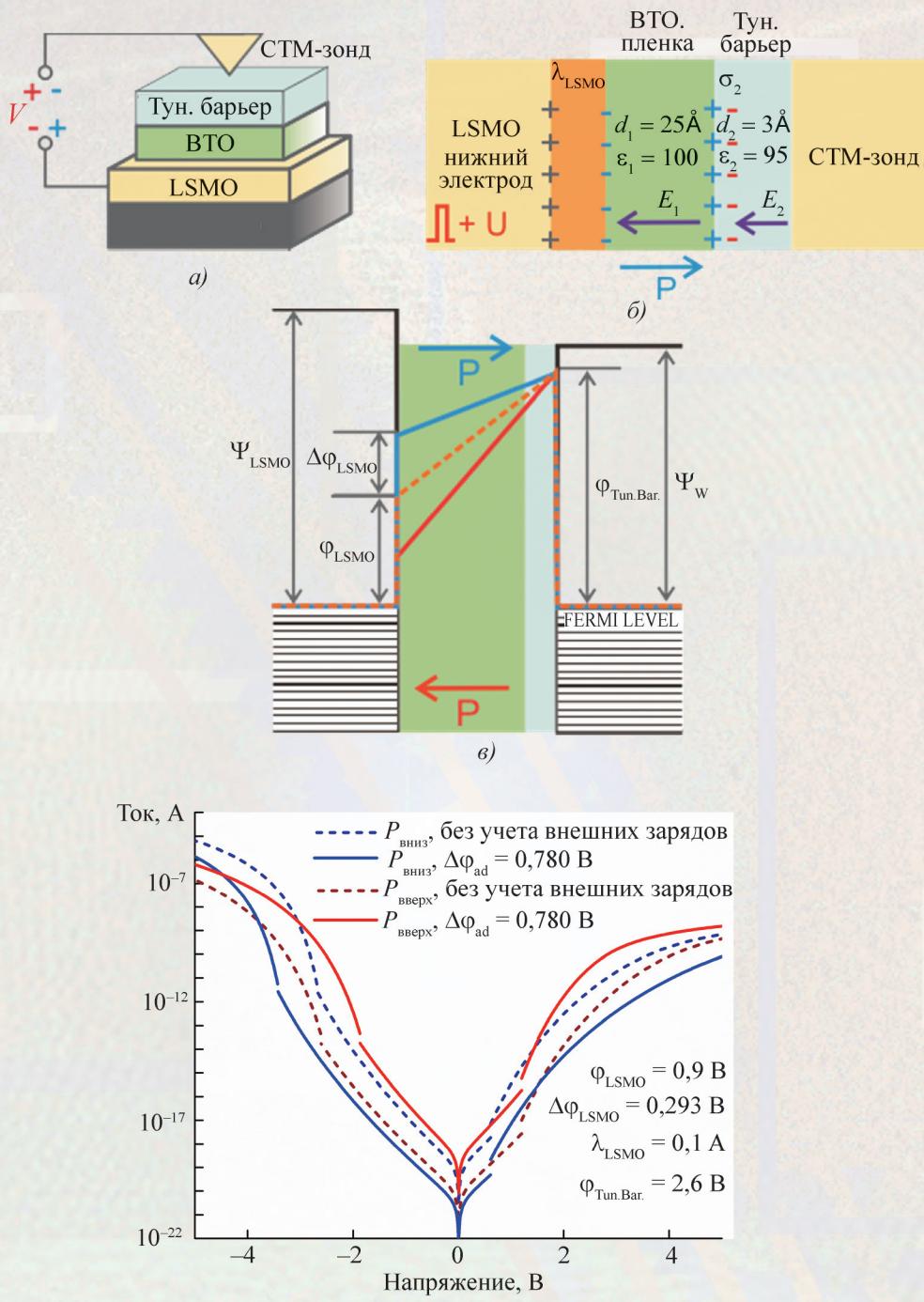


Рис. 5. Моделирование ВАХ STO/LSMO/BTO:

а – схема измерения ВАХ в СТС режиме; *б* – энергетическая диаграмма туннельного контакта «СТМ-зонд – нижний LSMO-электрод образца» при разной ориентации поляризации в ВТО-пленке без учета влияния «внешних» зарядов адсорбата; *в* – схематичное пояснение к учету вклада поверхности плотности «внешних» зарядов адсорбата σ_2 в скачок потенциала на поверхности СЭ-пленки в изменение потенциального барьера на интерфейсе с верхним электродом (СТМ-зондом); *г* – модельные ВАХ структур, полученные с учетом особенностей экранирования поляризационных зарядов на поверхности СЭ-пленки «внешними» зарядами адсорбата. Вклад в потенциал σ_2 обозначен $\Delta\varphi_{\text{ad}}$ и соответствует поверхности плотности заряда, полученной после приложения к структуре импульса напряжения амплитудой 7 В

Рисунок к статье Н. В. Андреевой, А. Е. Петухова,
Е. А. Рындина, В. В. Лучинина, В. М. Айвазяна

**«СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ
КАК МЕТОД АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ
И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В МЕМРИСТИВНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ»**

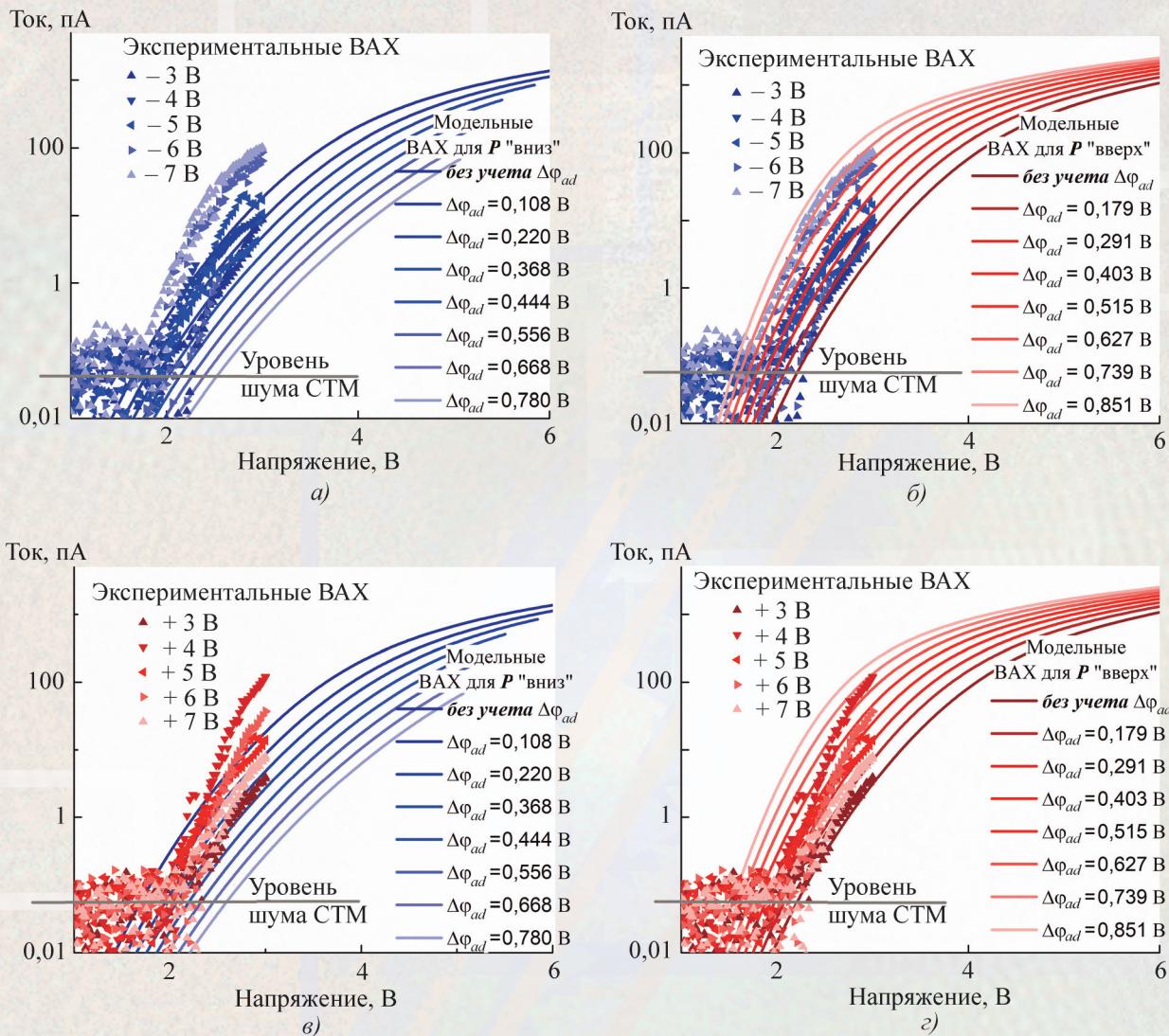


Рис. 6. Сравнение модельных и экспериментальных ВАХ структуры STO/LSMO/BTO, измеренных с использованием СТС при $T = 30$ K:

a – модельные ВАХ, полученные для ориентации поляризации «вниз», экспериментальные ВАХ, измеренные после приложения импульсов напряжения с амплитудой $-3\ldots-7$ В; *б* – модельные ВАХ, полученные для ориентации поляризации «вверх», экспериментальные ВАХ, соответствующие (*a*); *в* – модельные ВАХ, полученные для ориентации поляризации «вниз», экспериментальные ВАХ, измеренные после приложения импульсов напряжения с амплитудой $+3\ldots+7$ В; *г* – модельные ВАХ, полученные для ориентации поляризации «вверх», экспериментальные ВАХ, соответствующие (*в*). Полярность импульсов напряжения указана относительно нижнего LSMO-электрода структуры