ISSN 1813-8586

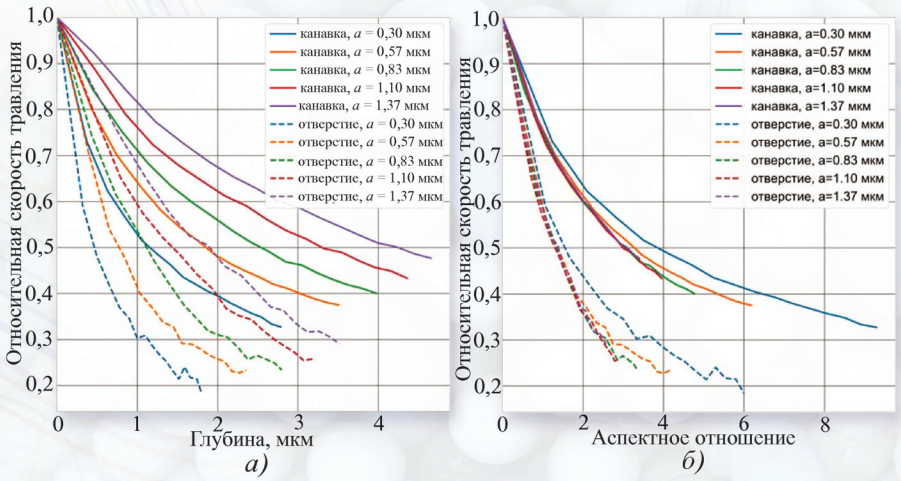
НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

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

Том 25. № 1. 2023

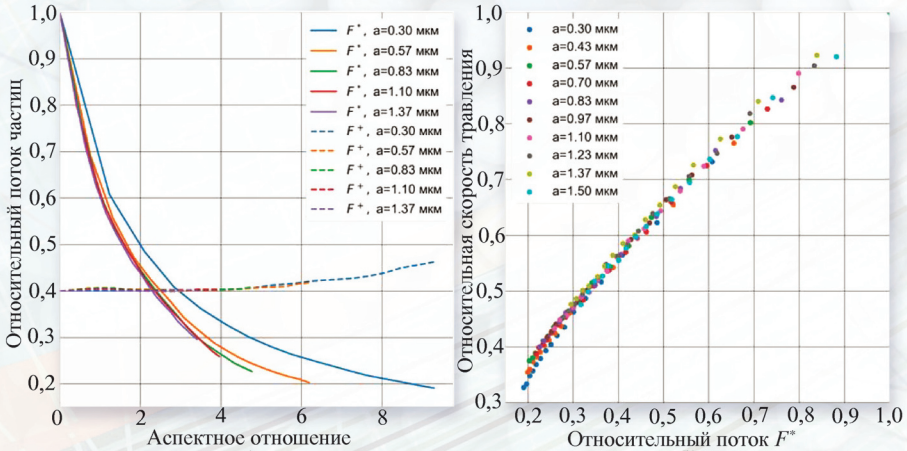
Рисунки к статье М. К. Руденко, А. В. Мяконьких, В. Ф. Лукичева

«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСПЕКТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ГЛУБОКОГО КРИОГЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ТОПОЛОГИИ МАСКИ»



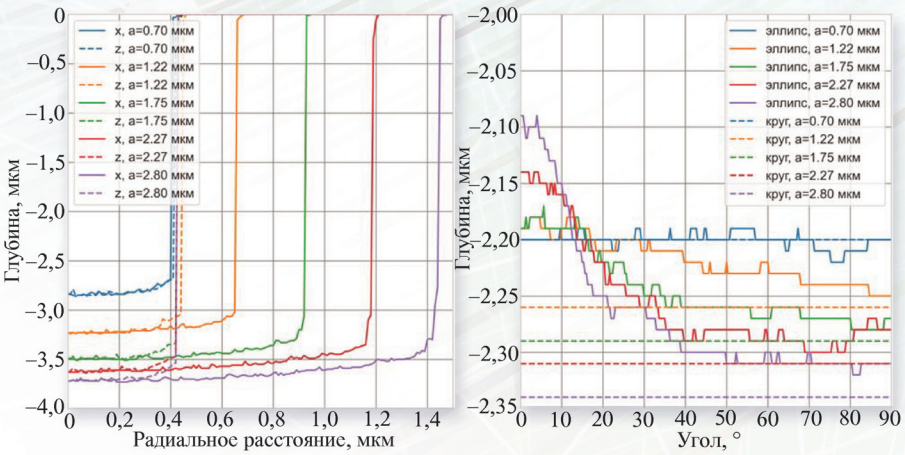
а) *б)*

Рис. 2. Зависимость скорости травления:
а – от глубины структуры; *б* – от аспектного отношения



а) *б)*

Рис. 3. Потоки частиц на различной глубине (*а*) и зависимость скорости травления от потоков фтора (*б*)



а) *б)*

Рис. 4. Профили травления эллиптических отверстий (*а*) и канавок (*б*).
Угол измеряется от большой полуоси эллипса

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 25. № 1 ✧ 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.)
и 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (физ.-мат., техн.).
Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук
Статьи имеют DOI

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора
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

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Руденко М. К., Мяконьких А. В., Лукичев В. Ф. Математическое моделирование аспектной зависимости глубокого криогенного травления кремния для различных вариантов топологии маски 3

Лысенко И. Е., Денисенко М. А., Исаева А. С., Козлов А. В. Разработка и моделирование двухмассового двухосевого инерциального МЭМС-сенсора 10

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Дубов Е. А., Пронин И. А., Комолов А. С., Якушова Н. Д. Исследование эволюции поверхностных свойств порошков ZnO под действием механоактивации 15

Оракова М. М., Нагаплежева Р. Р., Цеева Ф. М., Караф Д. А., Бозиев Э. Х. Исследование угла скольжения капли воды с поверхности КЭМ (111) 19

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Вострецова Л. Н., Рибенек В. А., Вострецов Д. Я. Эффект переключения резистивных состояний в светодиодных структурах на основе InGaN/GaN 23

Семенистая Т. В., Бережная В. Е. Разработка системы обнаружения метана бытовым газосигнализатором 28

Просянюк В. В., Суворов И. С., Паршиков Б. Ю., Прудников Н. В. Тенденции развития и технический уровень резервных источников тока на основе энергетических конденсированных систем 33

БИОЭЛЕКТРОНИКА

Абрамов И. И. Возможна ли искусственная реализация сознания? . . 42

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"

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2023

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 25
No. 1
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

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Rudenko M. K., Miakonkikh A. V., Lukichev V. F. Numerical Study of Aperture Shape Effects in Deep Cryogenic Etching of Silicon 3

Lysenko I. E., Denisenko M. A., Isaeva A. S., Kozlov A. V. Design and Simulation of the Dual-Mass Two-Axis MEMS Inertial Sensor 10

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Dubov E. A., Pronin I. A., Komolov A. S., Yakushova N. D. Study of the Evolution of the Surface Properties of ZnO Powders under the Action of Mechanoactivation 15

Orakova M. M., Nagaplegeva R. R., Ceeva F. M., Karaf D. A., Boziev E. H. Investigation of the Angle of Sliding a Drop of Water from the Surface of the SI (111) 19

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Vostretsova L. N., Rebenek V. A. Vostretsov D. Ya. The effect of Switching Resistive States in LED Structures based on InGaN/GaN 23

Semenistaya T. V., Berezhnaya V. E. Development of a Methane Detection System by a Household Gas Detector 28

Prosyanyuk V. V., Suvorov I. S., Prudnikov N. V., Parshikov B. Yu. On the Issue of Development Trends and the Technical Level of Backup Current Sources Based on Energy Condensed Systems 33

BIOELECTRONICS

Abramov I. I. Is it Possible to Realize Consciousness Artificially? 42

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

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2023

УДК 544.558 DOI: 10.17587/nmst.25.3-9

М. К. Руденко, мл. науч. сотр., mikhail.rudenko@ftian.ru, **А. В. Мяконьких,** ст. науч. сотрудник, **В. Ф. Лукичев,** чл.-корр. РАН, директор
Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН, 117218, Москва

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСПЕКТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ГЛУБОКОГО КРИОГЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ТОПОЛОГИИ МАСКИ

Поступила в редакцию 10.11.2022

Криогенное травление кремния в плазме SF_6/O_2 является предпочтительным процессом для изготовления глубоких структур с высоким аспектным отношением, со строгими требованиями к углу наклона боковых стенок, шероховатости поверхности и загрязнению, таких как МЭМС, рентгеновская оптика и интегральные конденсаторы высокой емкости. Необходимость изготовления структур различной глубины и топологии с разными аспектными отношениями ставит новые задачи перед оптимизацией процесса травления, поскольку ключевые параметры получаемых структур зависят от локального аспектного отношения и топологии апертуры маски. В качестве вспомогательного средства для оптимизации процесса авторами предложена трехмерная математическая модель криогенного травления сложных структур. В ней использован модуль поверхностной кинетики, оптимизированный для процесса SF_6/O_2 в геометрии 2,5D, и представлении области моделирования в виде совокупности кубических ячеек. Проведено систематическое исследование криогенного травления тестовых структур с различными топологиями масок и аспектными отношениями и выявлены основные механизмы, влияющие на результаты травления.

Ключевые слова: *глубокое травление кремния, криогенное травление, моделирование профиля травления, структуры с высоким аспектным отношением, сквозные соединения в кремнии (TSV), интегральные конденсаторы, рентгеновская оптика*

Введение

Криогенное травление кремния — это процесс плазменного травления, при котором обрабатываемая структура охлаждается до температуры −120 °С и подвергается воздействию плазмы SF_6/O_2 низкого давления высокой плотности с постоянным смещением на пластине. Анизотропия травления достигается в результате предотвращения спонтанной реакции травления кремния за счет слоя $Si_xF_yO_z$, образующегося на боковых стенках. В то же время ионно-стимулированное травление на дне структуры позволяет достичь высоких скоростей вертикального травления. Такие особенности определяют возможности применения криогенного травления для глубокого травления структур с высоким аспектным отношением, со строгими требованиями к углу наклона боковых стенок, шероховатости поверхности и поверхностному загрязнению как микроструктур, так и камеры реактора.

Многочисленные новые приложения с высокими требованиями к геометрии структур, включая новые устройства динамической памяти (DRAM) [1], микро- и наноэлектромеханические системы (MEMS/NEMS) [2] и рентгеновскую оптику [3—5], создают новые проблемы в оптимизации процесса травления. Эти структуры объединяет то, что они состоят из многочисленных элементов с геометрическими формами, выходящими за рамки хорошо изученных канавок и цилиндрических отверстий. К таким элементам относятся клинья, ребра, стол-

бики, канавки различной ширины и формы, а также их массивы. Во время травления они подвергаются воздействию разных по значению потоков частиц, что приводит к различиям в скорости травления, зависимости от аспектного отношения и угла наклона боковой стенки. Таким образом, важно иметь возможность подбирать оптимальные условия травления для различных структур.

Одним из возможных решений этой проблемы является компьютерное моделирование процесса травления. Как отмечалось выше, многие представляющие интерес элементы имеют топологию маски, отличную от линии постоянной ширины (канавки) или круга (цилиндрические отверстия), что препятствует сведению задачи к двумерной. Таким образом, необходимо реализовать трехмерный симулятор травления, позволяющий использовать произвольную топологию.

Трехмерные симуляторы травления стали возможными, как только появилась необходимая вычислительная мощность. Методы уровня профиля, используемые в этих симуляторах [6, 7], основаны на классических двумерных методах, наиболее важными из которых являются метод *ячеек*, метод *струны* и метод *множества уровня*. Эти методы отличаются представлением поверхности и алгоритмом ее продвижения. Каждый из них имеет как плюсы, так и минусы.

Метод ячеек представляет область моделирования в виде массива вокселей (кубических ячеек), и каждый воксель либо пуст (вакуум), либо заполнен. Информация об атомном составе отслеживается для каждой ячейки, и поверхность травления продвигается, когда ячейка становится вакуумной в результате взаимодействия с падающими частицами плазмы. Потоки частиц обычно оценивают с помощью метода Монте-Карло. Его недостатками являются высокие вычислительные затраты и сложности при получении нормалей поверхности из дискретного представления.

В *методе струны* используются полигональная сетка в качестве представления поверхности и переменные состояния поверхности, определенные для каждого полигона. Этим методом решают интегральные уравнения для переноса частиц совместно с кинетическими уравнениями для поверхностных реакций, таким образом получая скорость травления и осуществляя продвижение поверхности. Этот метод относительно эффективен в вычислительном отношении, но страдает от невозможности отслеживать объемный состав и сложные алгоритмы устранения петель.

В *методе множества уровня* поверхность представлена как множество нулей вещественной функции в вычислительной области, и проблема эволюции поверхности становится проблемой решения системы уравнений в частных производных с учетом поля скорости травления. Метод позволил получить важные результаты, особенно в моделировании изотропного травления, но довольно сложен в реализации, однако результат расчета может быть подвержен осцилляциям при неоптимальном выборе конечно-разностной схемы.

В последние годы были разработаны двухмерные симуляторы криогенного травления, основанные как на методе ячеек [8, 9], так и на методе струны [10, 11]. Они демонстрируют высокий уровень согласия с экспериментами по травлению не ограниченных по длине канавок, но не подходят для описания травления с нетривиальной топологией маски. Вместе с тем недавно было продемонстрировано применение трехмерных симуляторов, основанных на методе ячеек, для моделирования плазменного травления $Ar/Cl_2/He$ [12, 13]. В настоящей работе рассматривается возможность применения предложенного ранее 2,5D-симулятора криогенного травления [14] в случае трех измерений. Представленный симулятор используют для изучения криогенного травления с различными топологиями масок.

Модель

Модель процесса криогенного травления, рассмотренная в настоящей работе, основана на методе ячеек и использует вычисление потока частиц методом Монте-Карло. Это трехмерное расширение 2,5D-модели на основе ячеек с отложенной десорбцией, подробно описанной в нашей статье [14].

Область моделирования модели представляет собой параллелепипед, ориентированный по осям координат, с осью y, перпендикулярной пластине, в то время как x и z — ширина и глубина. По сравнению с моделью 2,5D частицы плазмы в модели порождаются как со скоростями, так и с координатами, имеющими ненулевую составляющую z. Область порождения частиц обычно определяется апертурой маски, но может охватывать всю область вычислений с координатами x и z в случае сложной топологии маски. Поскольку свободный пробег частиц значительно превышает размер области моделирования, а эффект зарядки незначителен, радикалы и ионы в нашей модели движутся по прямым линиям до тех пор, пока они либо не ударятся о поверхность структуры, либо не покинут область моделирования. Траектории частиц вычисляют с использованием алгоритма формирования лучей, основанного на вложенных декартовых сетках. Базовая сетка формируется кубическими ячейками модели и сохраняется в трехмерном растровом изображении. Сетки верхнего уровня имеют размеры ячеек, равные размеру ячеек нижнего уровня, умноженному на настраиваемый коэффициент. Они хранятся в виде трехмерных массивов

счетчиков заполнения. При вычислении траектории частицы сетки используют рекурсивный алгоритм, подобный алгоритму Брезенхэма, который переключается на сетку более низкого уровня, когда соответствующий счетчик заполнения сетки более высокого уровня отличается от нуля. Это позволяет быстро пропускать пустые области, обеспечивая высокую эффективность расчета траектории.

Когда частица попадает в занятую ячейку или отражается, локальная нормаль поверхности должна оцениваться по заполненности соседних ячеек. В зависимости от состояния поверхности и вида частиц используют один из двух вариантов алгоритма: *грубый* или *точный*. *Грубый* алгоритм использует нормаль грани ячейки, в которую попала частица, в качестве приближения к нормали поверхности. Этот метод применяют для радикалов фтора и кислорода, подчиняющихся закону диффузного отражения. *Точный* алгоритм использует положения окружающих поверхностных ячеек (заполненных, но имеющих пустого соседа) для оценки нормали поверхности. Если их координаты r_i, а их число N, то можно определить матрицу S размером 3×3:

$$m = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} r_i, \quad Y = [r_1 - m, ..., r_N - m),$$
$$S = YY^T. \qquad (1)$$

Нормаль находится как собственный вектор S, соответствующий наименьшему собственному значению.

Аналогично модели 2,5D, трехмерная модель применяет периодические граничные условия к переносу частиц. Однако некоторые структуры (например, канавки) также требуют наложения периодических граничных условий на связность ячеек, нарушая фундаментальные предположения алгоритма продвижения поверхности 2,5D. Поэтому потребовалось реализовать новый алгоритм продвижения поверхности в трехмерном пространстве. Его цель состоит в том, чтобы поддерживать связный объем непустых ячеек, уничтожая несвязанные фрагменты, если они появляются в процессе удаления ячейки, становящейся пустой. Эту задачу можно рассматривать как задачу удаления ребер графа [15]. При инициализации выбирают опорную ячейку (мы используем ближний левый нижний угол вычислительной области) и вычисляют расстояния, соответствующие кратчайшим путям от нее до всех непустых ячеек. Когда ячейка становится пустой, она удаляется из графа, и затем идентифицируются потенциально несвязанные фрагменты. Далее для каждого такого фрагмента параллельно выполняются два обхода графа: первый проверяет, что фрагмент отсоединен, а второй ищет другой способ прикрепления фрагмента к опорной ячейке. Если это удается, то расстояния до опорной ячейки обновляются и фрагмент сохраняется; в противном случае он помечается как пустой.

Параметры модели

Обозначение	Параметр	Значение
V_{dc}, В	Постоянное смещение	80
T, К	Температура нейтральных частиц	600
a, нм	Размер ячейки	10
n	Число атомов в ячейке	40
$E_{th,\mathrm{Si/O}}$, эВ	Порог распыления	15/10
σ_α, °	Расходимость потока ионов	1/5
$A_{(\mathrm{Si/O})}$	Эффективность распыления	4,0/1,0
$S_{(\mathrm{F/O})}$	Коэффициенты прилипания	0,75/1,0
$\theta_{(\mathrm{Si/O})}$, °	Угловой параметр 1	60/36
$\psi_{(\mathrm{Si/O})}$, °	Угловой параметр 2	86/67
$\Phi_{(\mathrm{O/F})}$, см$^2 \cdot$ с$^{-1}$	Потоки нейтральных частиц	$10^{16}...10^{18}$
Φ_I, см$^2 \cdot$ с$^{-1}$	Поток ионов	$10^{16}...10^{18}$

Модуль поверхностной кинетики использует схему отложенной десорбции [14]. Соответствующие значения параметров представлены в таблице.

Результаты и обсуждение

Тестовые структуры и параметры модели. В настоящем исследовании мы используем несколько наборов топологий масок, параметризованных параметром размера a, которые показаны на рис. 1. Во всех случаях область моделирования имеет ширину и глубину 3 мкм, высоту 6 мкм, а ячейки имеют размер 10 нм. Значение параметра a варьируется в зависимости от топографии разного типа. Для канавок это ширина, а для круглых отверстий — диаметр отверстия. Все эллиптические отверстия имеют размер большей оси a, в то время как их меньшая ось фиксирована и составляет 0,7 мкм. Как круговые, так и эллиптические канавки имеют постоянную ширину 100 нм, а их форма соответствует круглым и эллиптическим отверстиям с одинаковым значением a.

Все численные эксперименты, касающиеся скорости и глубины травления, проводили в аналогичных условиях, соответствующих оптимальному криогенному процессу. Потоки радикалов F^* и O^* были равны $1 \cdot 10^{17}$ см$^2 \cdot$ с$^{-1}$ и $2 \cdot 10^{16}$ см$^2 \cdot$ с$^{-1}$ соответственно, а поток ионов F^+ составлял $4 \cdot 10^{16}$ см$^2 \cdot$ с$^{-1}$. Предполагалось, что поток ионов моноэнергетический, с энергией 65 эВ и полярным углом, имеющим гауссово распределение со стандартным отклонением 1,5°. Время моделирования было уста-

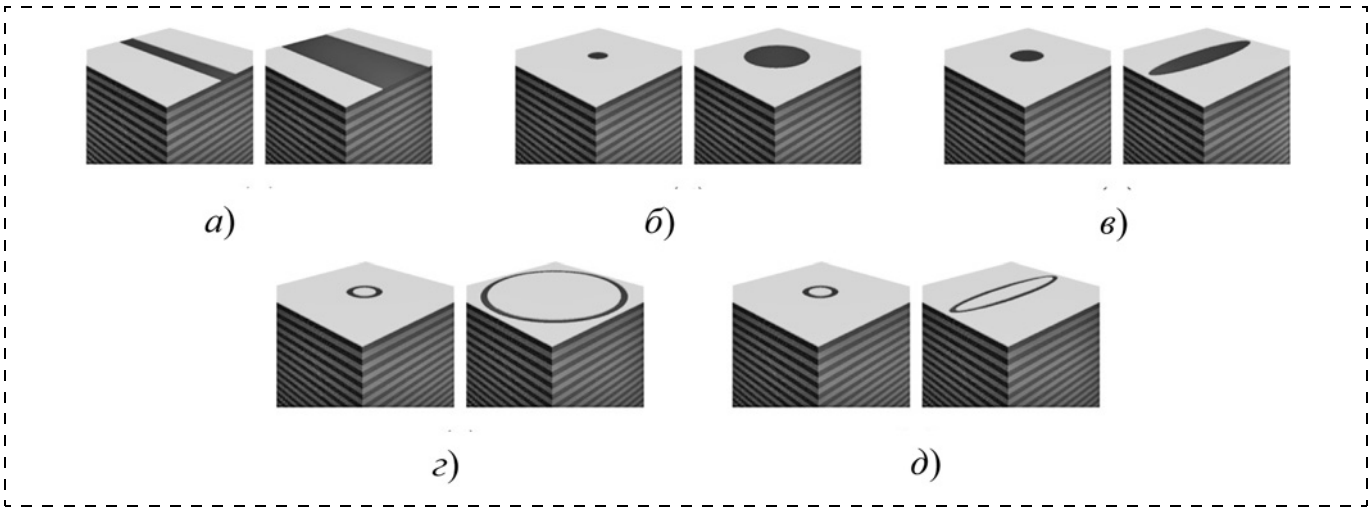


Рис. 1. Топологии масок тестовых структур:
а — канавки; *б* — круговые отверстия; *в* — эллиптические отверстия; *г* — кольцевые канавки; *д* — эллиптические канавки

новлено на 200 с, а скорость травления открытой поверхности откалибрована на 2,15 мкм · мин$^{-1}$.

В целях анализа потоков частиц плазмы по всему профилю во время процесса травления в код симулятора был внедрен расчет трехмерной кумулятивной гистограммы событий частиц с уменьшенным разрешением. События, представляющие интерес, такие как генерирование частиц, адсорбция на поверхностной ячейке или отражение от нее и выход из области моделирования, разрушение ячеек в результате спонтанного или ионно-стимулированного травления. Поскольку число таких событий превышает несколько миллиардов за один прогон, непрактично хранить их и анализировать, когда прогон завершен. Вместо этого в ходе моделирования число событий суммируется по приблизительной позиции (блок из ячеек 5 × 5 × 5), виду частицы и временному срезу. Это позволяет значительно снизить требования к объему хранимых данных и затраты на последующую обработку, сохраняя при этом достаточное количество информации для анализа.

Аспектно-зависимое криогенное травление. Одной из важных особенностей, присущих глубокому плазменному травлению, является зависимость скорости травления от аспектного отношения (*aspect ratio dependent etching* — ARDE). Оно проявляется в изменении глубины структуры для геометрически подобных элементов при идентичных в остальном процессах травления. Чтобы изучить ARDE в нашей модели, мы провели моделирование травления с использованием набора масок канавок и круглых отверстий с параметром размера *a* в диапазоне 0,7...1,5 мкм.

Первым показателем, представляющим интерес, была зависимость скорости травления от глубины структуры. Глубина травления здесь вычисляется как минимальная координата *y* всех пустых ячеек относительно верхней части структуры. Можно было бы оценить скорость травления, используя конечные разности глубины травления, но этот метод восприимчив к шуму дискретизации. Вместо этого определяем прямоугольную область, которая включает ячейки дна профиля травления во время всего моделирования, и интегрируем число событий разрушения ячеек по площади и всему диапазону высот. Скорость травления может быть приблизительно рассчитана как число разрушенных клеток, деленное на размер тестовой области.

Соответствующий график показан на рис. 2, *а* (см. вторую сторону обложки). Можно видеть, что скорость травления резко уменьшается с глубиной, и эффект более выражен для объектов с низким параметром размера. Эффект также сильнее для отверстий, чем для канавок. Рис. 2, *б* показывает, что снижение скорости травления в основном определяется достигнутым аспектным отношением, и эта зависимость согласуется для геометрически подобных структур с различными абсолютными размерами. Чтобы лучше понять природу этой связи, был исследован механизм переноса частиц в процессе травления.

Зависимость скорости травления от потоков. Наиболее значимыми факторами, влияющими на скорость травления, являются локальная плотность и угловое распределение потоков частиц. Как уже было отмечено, спонтанное травление боковых стенок в значительной степени предотвращается слоем $Si_xF_yO_z$, а ионно-стимулированное травление невозможно ввиду скользящего угла падения ионов. Таким образом, как только образуется пассивирующий слой, он начинает эффективно отражать практически все падающие частицы (диффузно отражаются нейтралы, а зеркально —

ионы). В случае недостаточной пассивации образуется небольшой положительный наклон боковой стенки. Вместе с тем ионно-стимулированное травление на дне профиля травления приводит к поглощению и радикалов фтора, и ионов. Таким образом, можно предположить, что изучение транспорта F^* и F^+ к нижней части структуры является ключевым для понимания явления аспектно-зависимого травления.

Для анализа потоков в области дна профиля травления мы используем метод, аналогичный тому, который применяют для оценки скорости травления. В той же области интегрировали счетчики отражений и поглощений частиц. Интегральные потоки делили на площадь и длительность временного среза для оценки мгновенной плотности потока. Соответствующие графики для канавок показаны на рис. 3, *а* (см. вторую сторону обложки).

Видим, что поток F^* быстро уменьшается по мере увеличения аспектного отношения. Более того, для всех структур аспектное отношение является единственным фактором, влияющим на плотность потока нейтралов. Это согласуется с теорией молекулярного переноса в режиме Кнудсена, в котором плотность потока определяется по формуле

$$\frac{\Phi_b}{\Phi_t} = \frac{K}{K + S - KS}, \qquad (2)$$

где Φ_b и Φ_t — плотности потока в нижней и верхней частях объекта соответственно; K — вероятность прохождения, зависящая только от соотношения сторон; S — эффективный коэффициент прилипания [16]. И наоборот, плотность потока ионов остается в основном постоянной, лишь слегка увеличиваясь при более высоком аспектном отношении. Это увеличение можно понять, если принять во внимание, что поток был рассчитан для центральной части дна структуры. Фокусировка ионов к центру дна происходит в результате сужения канавки, либо в результате расхождения потока ионов.

Таким образом, изменение плотности потока нейтрального фтора, определяемое уравнением (2), является основным механизмом изменения скорости травления и ARDE в условиях криогенного травления. Все данные, касающиеся скорости травления и плотности потока F^* в структурах с различными параметрами размера и временем обработки, представлены на рис. 3, *б* (см. вторую сторону обложки). Можно видеть, что изменение плотности потока объясняет большую часть различий в скорости травления.

Травление эллиптических отверстий и канавок. Одной из структур, представляющих проблему для оптимизации процесса криогенного травления, являются рентгеновские линзы. Они имеют форму одномерной цепочки бипараболических отверстий. К этим конструкциям предъявляют строгие требования по равномерности травления вдоль боковой стенки, которые вступают в противоречие с различными условиями транспорта частиц плазмы. Одним из возможных решений является замена бипараболы бипараболической канавкой постоянной ширины, что делает травление в интересующей области более равномерным. Затем внутреннюю часть линзы вытравливают на глубину, превышающую требования к стенкам, а оставшуюся стенку канавки удаляют изотропным травлением.

Чтобы исследовать условия травления в такого рода структурах, аппроксимируем топологию бипараболической маски эллиптической, а бипараболические канавки эллиптическими. Профили травления эллиптических отверстий с фиксированной шириной и переменной длиной (параметр размера a) вдоль осей x и z показаны на рис. 4 (см. вторую сторону обложки). Можно видеть, что различия в параметрах размера существенно влияют как на конечную глубину в центре структуры, так и на изменение глубины вдоль боковой стенки. Начиная с круглого отверстия при a = 0,7 мкм, профиль стремится к профилю канавки при увеличении a.

Проверим, является ли использование канавок фиксированной ширины эффективным средством уменьшения вариабельности результатов травления. Были выполнены две серии численных экспериментов. В первой серии проводим моделирование для круглых канавок с различной кривизной, а во второй серии — для эллиптических канавок одинаковой ширины. Рис. 4, *б* (см. вторую сторону обложки) показывает, что вариабельность глубины травления значительно уменьшается для интересного диапазона кривизны. Диапазон глубины эллиптических канавок немного превышает диапазон глубины круглых канавок вблизи вершин эллипса, но все еще находится в узком диапазоне. Это можно объяснить тем, что кривизна эллипса в его вершинных точках превышает кривизну вписанной окружности. Подводя итог, можем констатировать, что канавки постоянной ширины являются эффективным методом уменьшения вариабельности результатов травления при криогенном травлении.

Заключение

Предложена и реализована трехмерная модель для моделирования эволюции профиля структуры при криогенном травлении кремния в плазме SF_6/O_2, основанная на методе Монте-Карло для вычисления потоков частиц и представления профиля на основе ячеек. Были использованы параметры поверхностной кинетики, полученные ра-

нее при верификации 2,5D-модели. Было проведено исследование процесса травления с различными видами топологий масок.

Установлено, что в реальных условиях плазмы поток атомарного фтора к нижней части структур изменяется в соответствии с уравнением переноса Кнудсена, в то время как поток ионов остается примерно таким же, с небольшим увеличением при высоких соотношениях сторон вследствие фокусировки боковыми стенками во всех тестовых структурах. Скорость вертикального травления пропорциональна потоку атомарного фтора и слабо зависит от потока ионов на дно структуры, что дает объяснение аспектно-зависимого криогенного травления. Изучалось травление узких канавок постоянной ширины с переменной кривизной. Показано, что такие канавки, сформированные вдоль края области подвергаемой травлению, являются эффективным средством поддержания одинаковой глубины травления вдоль сложных контуров. Возможные направления будущих исследований включают изучение структур с более высоким аспектным отношением, фокусировки ионного потока, различных типов структур, включая наноколонны и их массивы, а также зависимости наклона боковых стенок от поперечного размера структуры.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН по Программе № FFNN-2022-0019.

Список литературы

1. **Rueger N. R., McGinnis A., Good F.** et al. Patterning and etch challenges for future DRAM and other high aspect ratio memory device fabrication // Advanced etch technology for nanopatterning II / ed. Zhang Y., Oehrlein G. S., Lin Q. International Society for Optics; Photonics // SPIE, 2013. Vol. 8685. P. 79—93.

2. **Ngo H.-D., Hiess A., Seidemann V.** et al. Plasma etching of tapered features in silicon for MEMS and wafer level packaging applications // Journal of Physics: Conference Series. 2006. Vol. 34. P. 271—276.

3. **Stöhr F., Wright J., Simons H.** et al. Optimizing shape uniformity and increasing structure heights of deep reactive ion etched silicon x-ray lenses // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2015. Vol. 25, N. 12. P. 125013.

4. **Stöhr F., Michael-Lindhard J., Hübner J.** et al. Sacrificial structures for deep reactive ion etching of high-aspect ratio kinoform silicon x-ray lenses // Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. 2015. Vol. 33, N. 6. P. 062001.

5. **Miakonkikh A. V., Rogozhin A. E., Rudenko K. V.** et al. Elements for hard X-ray optics produced by cryogenic plasma etching of silicon // International conference on micro- and nano-electronics 2016 / Ed. Lukichev V. F., Rudenko K. V. International Society for Optics; Photonics // SPIE. 2016. Vol. 10224. P. 1022421.

6. **Toh K. K. H., Neureuther A. R., Scheckler E. W.** Algorithms for simulation of three-dimensional etching // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1994. Vol. 13, N. 5. P. 616—624.

7. **Hoekstra R. J., Kushner M. J.** Comparison of two-dimensional and three-dimensional models for profile simulation of poly-Si etching of finite length trenches // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 1998. Vol. 16, N. 6. P. 3274—3280.

8. **Marcos G., Rhallabi A., Ranson P.** Monte Carlo simulation method for etching of deep trenches in Si by a SF_6/O_2 plasma mixture // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2003. Vol. 21, N. 1. P. 87—95.

9. **Mahorowala A. P., Sawin H. H.** Etching of polysilicon in inductively coupled Cl_2 and HBr discharges. II. Simulation of profile evolution using cellular representation of feature composition and Monte Carlo computation of flux and surface kinetics // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. 2002. Vol. 20, N. 3. P. 1064.

10. **Lukichev V. F., Yunkin V. A.** Scaling of silicon trench etch rates and profiles in plasma etching // Microelectronic Engineering. 1999. Vol. 46, N. 1. P. 315—318.

11. **Ishchuk V., Olynick D. L., Liu Z., Rangelow I. W.** Profile simulation model for sub-50 nm cryogenic etching of silicon using SF_6/O_2 inductively coupled plasma // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118, N. 5. P. 053302.

12. **Huard C. M., Zhang Y., Sriraman S.** et al. Role of neutral transport in aspect ratio dependent plasma etching of three-dimensional features // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2017. Vol. 35, N. 5. P. 05C301.

13. **Zhang Y., Huard C., Sriraman S.** et al. Investigation of feature orientation and consequences of ion tilting during plasma etching with a three-dimensional feature profile simulator // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2017. Vol. 35, N. 2. P. 021303.

14. **Rudenko M. K., Myakon'kikh A. V., Lukichev V. F.** Numerical simulation of cryogenic etching: Model with delayed desorption // Russian Microelectronics. 2021. Vol. 50, N. 1. P. 54—62.

15. **Shiloach Y., Even S.** An on-line edge-deletion problem // Journal of the ACM. 1981. Vol. 28, N. 1. P. 1—4.

16. **Coburn J. W., Winters H. F.** Conductance considerations in the reactive ion etching of high aspect ratio features // Applied Physics Letters. 1989. Vol. 55, N. 26. P. 2730—2732.

M. K. Rudenko, Junior Scientist, mikhail.rudenko@ftian.ru, **A. V. Miakonkikh,** Senior Scientist, **V. F. Lukichev,** Director
Valiev Institute of Physics and Technology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Corresponding author:
Rudenko Mikhail K., Junior Scientist, Valiev Institute of Physics and Technology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: mikhail.rudenko@ftian.ru

Numerical Study of Aperture Shape Effects in Deep Cryogenic Etching of Silicon

Received on November 10, 2022
Accepted on November 30, 2022

Cryogenic etching of silicon in SF_6/O_2 plasma is the process of choice for fabrication of deep high aspect ratio structures with strict requirements for the sidewall angle, surface roughness and contamination, including MEMS, X-ray optics, and supercapacitors. The manufacturing of such structures, containing features of various size and shape, poses new challenges for the etching process optimization, since the key parameters of the resulting structures depend on the local aspect ratio and the shape of the mask aperture. As an aid in process optimization, we propose a three-dimensional Monte-Carlo simulator for the cryogenic etching of complex structures. It employs a surface kinetics model tuned to SF_6/O_2 process in 2.5D geometry and cubic voxel representations of the simulation domain. Systematic study on cryogenic etching of test structures with different mask shapes and aspect ratios is performed and principal mechanisms affecting etching results are identified.

Keywords: *deep silicon etching, cryogenic etching, etching profile simulation, high aspect ratio structures, through silicon via, integral capacitors, X-ray optics*

For citation:
Rudenko M. K., Miakonkikh A. V., Lukichev V. F. Numerical Study of Aperture Shape Effects in Deep Cryogenic Etching of Silicon, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 3—9.

DOI: 10.17587/nmst.25.3-9

References

1. **Rueger N. R., McGinnis A., Good F.,** et al. Patterning and etch challenges for future DRAM and other high aspect ratio memory device fabrication, *Advanced etch technology for nanopatterning II* / ed. Zhang Y., Oehrlein G. S., Lin Q. International Society for Optics; Photonics, *SPIE*, 2013. Vol. 8685. P. 79—93.

2. **Ngo H.-D., Hiess A., Seidemann V.,** et al. Plasma etching of tapered features in silicon for MEMS and wafer level packaging applications, *Journal of Physics*, *Conference Series*, 2006, vol. 34, pp. 271—276.

3. **Stöhr F., Wright J., Simons H.,** et al. Optimizing shape uniformity and increasing structure heights of deep reactive ion etched silicon x-ray lenses, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, vol. 25, no. 12, pp. 125013.

4. **Stöhr F., Michael-Lindhard J., Hübner J.,** et al. Sacrificial structures for deep reactive ion etching of high-aspect ratio kinoform silicon x-ray lenses, *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2015, vol. 33, no. 6, p. 062001.

5. **Miakonkikh A. V., Rogozhin A. E., Rudenko K. V.,** et al. Elements for hard X-ray optics produced by cryogenic plasma etching of silicon, *International conference on micro- and nanoelectronics 2016* / ed. Lukichev V. F., Rudenko K. V. *International Society for Optics; Photonics; SPIE*, 2016, vol. 10224, p. 1022421.

6. **Toh K. K.H., Neureuther A. R., Scheckler E. W.** Algorithms for simulation of three-dimensional etching, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1994, vol. 13, no. 5, pp. 616—624.

7. **Hoekstra R. J., Kushner M. J.** Comparison of two-dimensional and three-dimensional models for profile simulation of poly-Si etching of finite length trenches, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1998, vol. 16, no. 6, pp. 3274—3280.

8. **Marcos G., Rhallabi A., Ranson P.** Monte Carlo simulation method for etching of deep trenches in Si by a SF_6/O_2 plasma mixture, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2003, vol. 21, no. 1, pp. 87—95.

9. **Mahorowala A. P., Sawin H. H.** Etching of polysilicon in inductively coupled Cl_2 and HBr discharges. II. Simulation of profile evolution using cellular representation of feature composition and Monte Carlo computation of flux and surface kinetics, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2002, vol. 20, no. 3, p. 1064.

10. **Lukichev V. F., Yunkin V. A.** Scaling of silicon trench etch rates and profiles in plasma etching, *Microelectronic Engineering*, 1999, vol. 46, no. 1, pp. 315—318.

11. **Ishchuk V., Olynick D. L., Liu Z., Rangelow I. W.** Profile simulation model for sub-50 nm cryogenic etching of silicon using SF_6/O_2 inductively coupled plasma, *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 118, no. 5, p. 053302.

12. **Huard C. M., Zhang Y., Sriraman S.,** et al. Role of neutral transport in aspect ratio dependent plasma etching of three-dimensional features, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2017, vol. 35, no. 5, p. 05C301.

13. **Zhang Y., Huard C., Sriraman S.,** et al. Investigation of feature orientation and consequences of ion tilting during plasma etching with a three-dimensional feature profile simulator, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2017, vol. 35, no. 2, p. 021303.

14. **Rudenko M. K., Myakon'kikh A. V., Lukichev V. F.** Numerical simulation of cryogenic etching: Model with delayed desorption, *Russian Microelectronics*, 2021, vol. 50, no. 1, pp. 54—62.

15. **Shiloach Y., Even S.** An on-line edge-deletion problem, *Journal of the ACM*, 1981, vol. 28, no. 1, pp. 1—4.

16. **Coburn J. W., Winters H. F.** Conductance considerations in the reactive ion etching of high aspect ratio features, *Applied Physics Letters*, 1989, vol. 55, no. 26, pp. 2730—2732.

УДК 621.382.211 DOI: 10.17587/nmst.25.10-14

И. Е. Лысенко[1], д-р техн. наук, доц., руководитель Центра трансфера технологий ЮФУ, ielysenko@sfedu.ru,
М. А. Денисенко[1], канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Дизайн-центра микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта ЮФУ, dema@sfedu.ru,
А. С. Исаева[1], канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Дизайн-центра микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта ЮФУ, isaevaas@sfedu.ru,
А. В. Козлов[2], канд. техн. наук, доц. Кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ, anton@dsd.miee.ru
[1] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Южный федеральный университет, г. Таганрог,
[2] Национальный исследовательский университет МИЭТ, г. Зеленоград

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХМАССОВОГО ДВУХОСЕВОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО МЭМС-СЕНСОРА

Поступила в редакцию 25.10.2022

Описывается разработанный авторами инерциальный датчик, представляющий собой функционально интегрированную микроэлектромеханическую систему, включающую двухмассовый двухосевой гироскоп-акселерометр. Прибор представляет собой высокочувствительный мультисенсор, позволяющий решать задачи ориентации объекта в пространстве и контроля параметров его движения. Представлены конструкция и топология чувствительного элемента, а также результаты моделирования.

Ключевые слова: *микроэлектромеханические системы, гироскоп, акселерометр, инерциальный датчик*

Введение

Инерциальные датчики являются одним из основных сегментов рынка микроэлектромеханических систем. МЭМС-акселерометры и гироскопы широко используют во всех высокотехнологичных областях: от детских игрушек и носимой электроники до автомобильной и авиационной промышленности, тяжелого машиностроения и космоса [1—5].

Важным направлением применения современных достижений в области проектирования инерциальных МЭМС-датчиков являются всевозможные диагностические системы, системы контроля и управления параметрами инженерных объектов, например объектов железнодорожного транспорта. Чувствительные элементы можно использовать не только для мониторинга текущего состояния, но и в составе систем с применением методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей, позволяющих прогнозировать будущее состояние объектов исследования [6].

Материалы и методы изготовления

Предлагаемая конструкция двухмассового двухосного гироскопа-акселерометра представлена на рис. 1, где использованы следующие обозначения: *C*1, *C*2, *C*3, *C*4 — емкостные преобразователи акселерометров; *A*1, *A*3 — актюаторы гироскопов; *M*1, *M*2 — инерционные массы. Контакты расположены следующим образом: *1*, *5*, *9*, *11*, *15*, *19*, *23*, *26* — соответствующие вспомогательные обкладки гребенчатых конденсаторов; *2*, *4* — ротор актюатора *A*1; *3* — основная обкладка актюатора *A*1; *6*, *8* — обкладки емкости *C*2; *10* — центральная обкладка; *12*, *14* — обкладки емкости *C*3; *13* — ротор емкости *C*3; *16*, *18* — ротор актюатора *A*3; *17* — основная обкладка актюатора *A*3; *20*, *22* — обкладки емкости *C*4; *21* — ротор емкости *C*4; *24* — ротор *2*; *25* — ротор *3*; *27*, *29* — обкладки емкости *C*1; *28* — ротор емкости *C*1.

Перемещения датчиков по оси *X* выполняются в режиме движения, а по осям *Y* и *Z* — в режиме чувствительности. Таким образом, разработанное микромеханическое устройство представляет собой интегрированный микромеханический гироскоп, обеспечивающий возможность измерения значений угловой скорости по оси *Y*, расположенной в плоскости подложки, и оси *Z*, направленной нормально к плоскости подложки устройства. В режиме акселерометра устройство может регистрировать ускорения по всем осям (*X*, *Y* и *Z*).

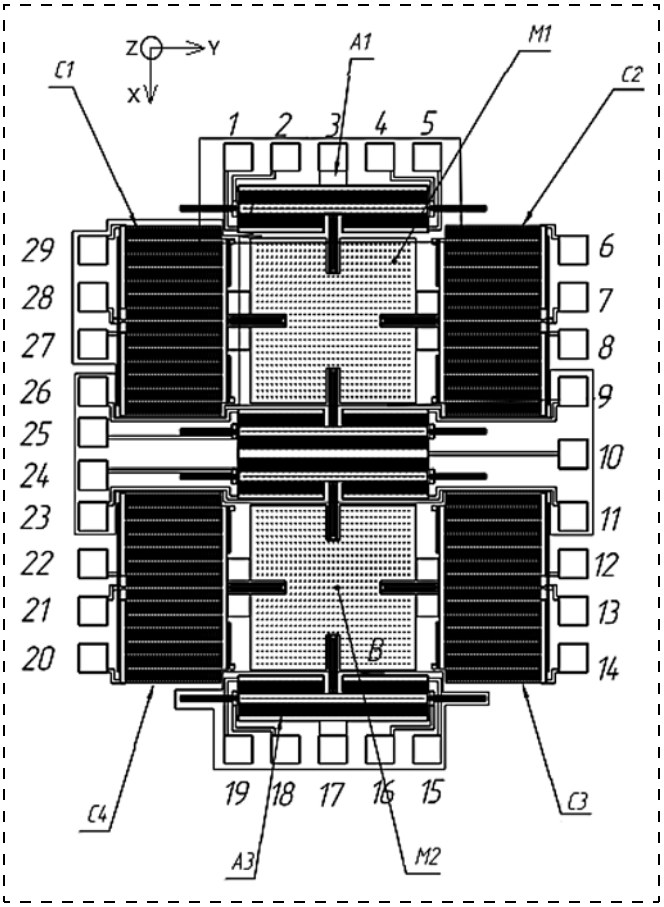


Рис. 1. Интегральный микромеханический инерционный датчик с двумя чувствительными осями

Топология разработана с использованием программного продукта Tanner L-Edit для последующего изготовления структуры MEMS с использованием технологии PolyMUMPs, в соответствии с руководством по проектированию PolyMUMPs [7]. Результат показан на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

Разработку топологии по существующей геометрической модели выполняли следующим образом:

— структура была разделена на простые объекты, которые проектировали отдельно как самостоятельные элементы библиотеки. Такие объекты могут быть как графическими примитивами, например, пальцы гребенки емкостного преобразователя сохраняли в виде прямоугольников соответствующих размеров, так и представлять собой сборочные единицы из нескольких элементов;

— при необходимости ячейка может иметь несколько уровней вложенности и представлять собой сборку сборочных единиц;

— повторяющиеся элементы (например, в гребенках) задавали с помощью геометрических массивов. Ряд компонентов получены с помощью специально разработанных макросов, что упростило процесс проектирования топологии и обеспечило возможность ее параметризации.

Таким образом, формируется иерархия проекта методом проектирования "от частного к общему", определяются связи между составляющими, их расположение друг относительно друга.

Особенностью разработанного датчика угловых скоростей и линейных ускорений является то, что упругие подвесы, инерционная масса, подвижные и неподвижные гребенчатые электроды электростатических приводов, неподвижные электроды емкостных преобразователей перемещений выполнены в едином конструктивном слое. Использование двух подвесов позволяет исключить взаимное влияние первичных и вторичных колебаний датчиков.

Особенности производства по технологии PolyMUMPs таковы, что размер активной области, т. е. области, на которой может быть изготовлена дискретная МЭМС-структура на пластине, составляет 9900 × 9900 мкм. В связи с тем, что габаритные размеры полученной топологии более чем в 3 раза меньше допустимых размеров активной области, было принято решение размещать несколько датчиков на одной активной области. В результате была выбрана конфигурация, предполагающая размещение четырех чипов на одной активной области, как показано на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Результаты и выводы

Авторами разработана модель представленного микромеханического устройства, позволяющая определять перемещения инерционных масс датчика под действием электростатических сил, угловых скоростей по двум осям чувствительности и линейных ускорений по трем осям чувствительности с погрешностью менее чем 10 %. Также предложены модели расчета жесткости упругого подвеса чувствительных элементов МЭМС-устройства, позволяющие рассчитывать собственные частоты колебаний упругого подвеса по оси движения *Y*, по осям чувствительности *X* и *Z*.

Для расчета микромеханического устройства разработаны макросы построения параметризуемых геометрических и конечно-элементных моделей для численного моделирования в программном комплексе ANSYS.

Геометрическая модель МЭМС-гироскопа-акселерометра разработана с использованием программного модуля ANSYS Mechanical APDL.

Чувствительность к угловой скорости составляет 0,1 мВ/град/с, а к линейному ускорению *az* — 1,5 мВ/м/с^2.

На рис. 4 представлены результаты моделирования изменения угловых скоростей и линейных ускорений во всем динамическом диапазоне.

Как видно на рис. 4, при подаче управляющих напряжений инерционные массы начинают совершать противофазные вынужденные колебания с амплитудой 8,7 мкм. Время установления вынужденных колебаний составляет 15 мс.

При действии угловых скоростей Ωx, Ωz инерционные массы совершают противофазные колебания вдоль осей Z и X, соответственно. Амплитуда колебаний инерционных масс пропорциональна значению внешнего воздействия и составляет 150 нм

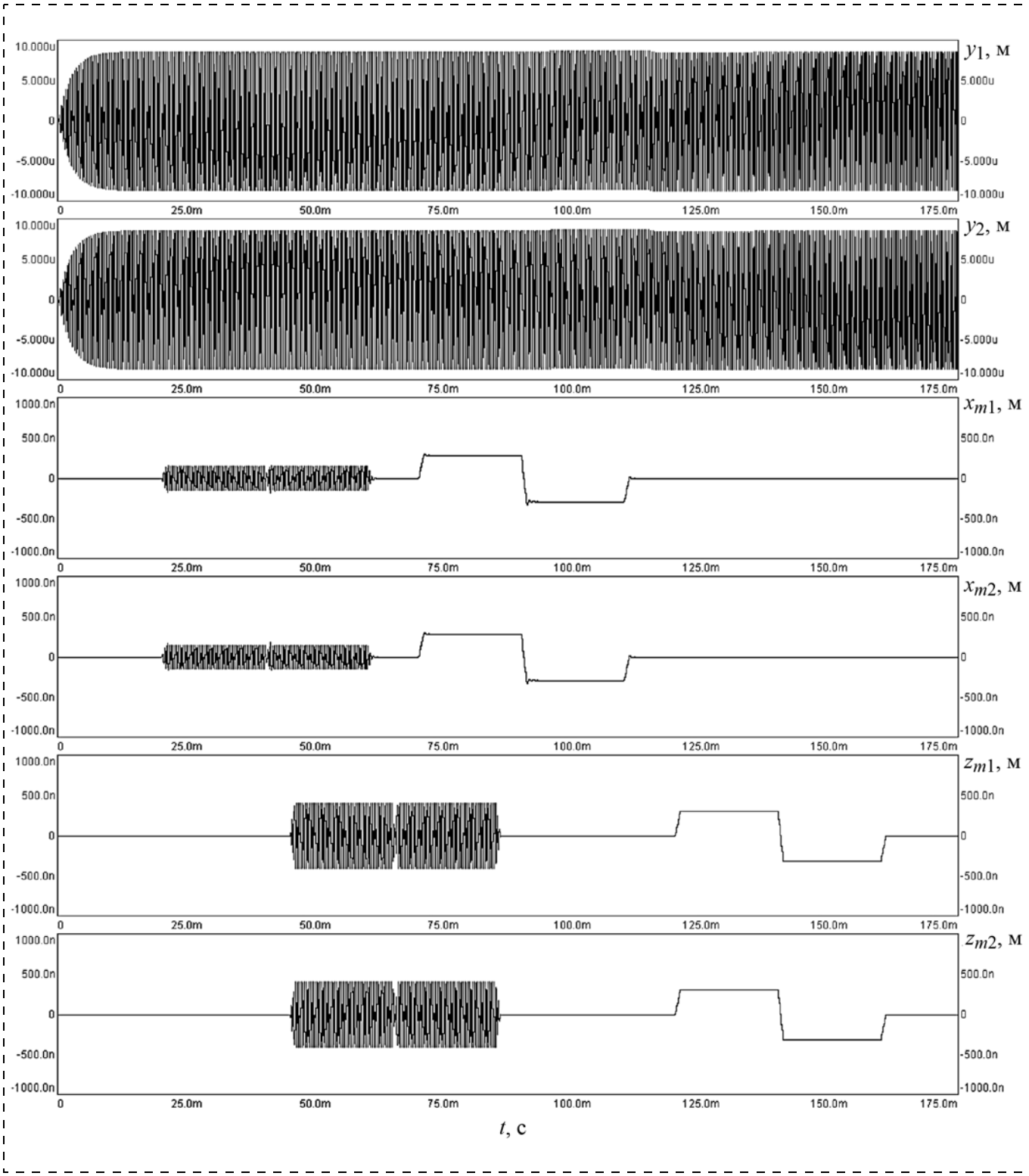


Рис. 4. Движение чувствительных элементов ММГА в полном динамическом диапазоне

по оси X и 408 нм по оси Z. Направление действия угловых скоростей будет определять фазу колебаний инерционных масс. При действии линейных ускорений ax, az инерционные массы совершают синхронные перемещения вдоль осей X и Z, соответственно. Амплитуда перемещений инерционных масс пропорциональна значению действующего воздействия и составляет 290 нм по оси X и 312 нм по оси Z. Направление действия линейных ускорений будет определять фазу перемещений инерционных масс. Время действия переходных процессов по оси чувствительности X — 2 мс, а по оси Z — менее 1 мс.

Заключение

Таким образом, по результатам моделирования получен окончательный вариант конструкции инерциального МЭМС-датчика. В программном модуле Tanner L-Edit была разработана топология в соответствии с правилами проектирования МЭМС-устройств с использованием технологии PolyMUMPs [7], проведена проверка на соответствие производственным требованиям (DRC). Полученный файл проекта в формате GDSII был передан в производство. Результаты исследования показали, что при приложении ускорения или угловой скорости по одной из осей влияние на две другие оси практически отсутствует, а изменение емкости по двум другим осям происходит в пределах допустимых погрешностей.

Выражаем 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. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие. Тула: Тульский государственный университет, 2007.

2. **Ramadoss R.** MEMS devices for biomedical applications // Solid State Tech. 2013. N. 10. P. 10—13.

3. **Shaeffer D. K.** MEMS Inertial Sensors: A Tutorial Overview // IEEE Communications Magazine. 2013. N. 4. P. 100—109.

4. **Konoplev B. G., Lysenko I. E., Ezhova O. A.** Criteria of equality of modal frequency of micromechanical gyroscopes-accelerometers sensitive elements // Modern Appl. Sci. 2016. N. 10. P. 52—55.

5. **Konoplev B. G., Lysenko I. E., Ezhova O. A.** Evolution Criteria Fingers Hardness Electrode MEMS Comb Converters // Bioscience Biotech. Res. Asia. 2015. N. 12. P. 2345—2350.

6. **Jing Y., Li S., Wang Z., Dong H., Wang J., Tang S.** Using Deep Learning to Detect Defects in Manufacturing: A Comprehensive Survey and Current Challenges. Materials. 2020. Vol. 13. P. 1—23.

7. **Koester D. A., Cowen A., Mahadevan R., Stonefield M., Hardy B.** PolyMUMPs Design Handbook: A MUMPsfi process // MEMSCAP, 2011.

I. E. Lysenko[1], Dc. Sc., Associate Professor, Head of the Technology Transfer Center of the Southern Federal University, e-mail: ielysenko@sfedu.ru,
M. A. Denisenko[1], Ph. D., Leading Researcher of Design Center for Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems of the Southern Federal University, e-mail: dema@sfedu.ru,
A. S. Isaeva[1], Ph. D., Senior Researcher of Design Center for Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems of the Southern Federal University, e-mail: isaevaas@sfedu.ru,
A. V. Kozlov[2], Ph. D., Associate Professor of the Department of Integrated Electronics and Microsystems MIET, e-mail: anton@dsd.miee.ru
[1] Southern Federal University, Taganrog, 347922, Russian Federation,
[2] National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, 124498, Russian Federation

Corresponding author:
Mark A. Denisenko, Ph. D., Leading Researcher of Design Center for Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems of the Southern Federal University, Taganrog, 347922, Russian Federation
E-mail: dema@sfedu.ru

Design and Simulation of the Dual-Mass Two-Axis MEMS Inertial Sensor

Received on 25 October, 2022
Accepted on 11 November 2022

We have developed an inertial sensor, which is a functionally integrated microelectromechanical system that includes a two-mass two-axis gyroscope-accelerometer. The device is a highly sensitive multisensor that allows solving problems of object orientation in space and control of its movement parameters. The article presents the design and topology of the sensor element. The results of modeling obtained using CAD ANSYS are presented. The scope of this inertial sensor is diagnostic systems for the needs of railway transport.

Keywords: *microelectromechanical systems, gyroscope, accelerometer, inertial sensor*

Acknowledgements: *Thanks are expressed to the Center for the Collective Design of Electronic Component Base and Radioelectronic Equipment of the National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology" (MIET) for assistance in carrying out part of the technological operations for the manufacture of experimental samples of capacitive RF MEMS switches, as well as in conducting a number of experimental studies.*

The work was carried out at the expense of funds, task No. FENW-2020-0022 for the implementation of scientific research carrying out scientific research at the expense of the Federal budget, in terms of scientific activities on the topic "Development and research of methods and means of monitoring, diagnostics and forecasting state of engineering objects based on artificial intelligence".

For citation:
Lysenko I. E., Denisenko M. A., Isaeva A. S., Kozlov A. V. Design and Simulation of the Dual-Mass Two-Axis MEMS Inertial Sensor, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 10—14.

DOI: 10.17587/nmst.25.10-14

References

1. **Raspopov V. Ya.** Micromechanicheskie pribory: uchebnoye posobie, Tula: Tulskiy gos. Universitet, 2007 (in Russian).

2. **Ramadoss R.** MEMS devices for biomedical applications, *Solid State Tech.*, 2013, no. 10, pp. 10—13.

3. **Shaeffer D. K.** MEMS Inertial Sensors: A Tutorial Overview, *IEEE Communications Magazine*, 2013, no. 4, pp. 100—109.

4. **Konoplev B. G., Lysenko I. E., Ezhova O. A.** Criteria of equality of modal frequency of micromechanical gyroscopes-accelerometers sensitive elements, *Modern Appl. Sci.*, 2016, no. 10, pp. 52—55.

5. **Konoplev B. G., Lysenko I. E., Ezhova O. A.** Evolution Criteria Fingers Hardness Electrode MEMS Comb Converters, *Bioscience Biotech. Res. Asia*, 2015, no. 12, pp. 2345—2350.

6. **Jing Y., Li S., Wang Z., Dong H., Wang J., Tang S.** Using Deep Learning to Detect Defects in Manufacturing: A Comprehensive Survey and Current Challenges. Materials, no. 13, 2020, pp. 1—23.

7. **Koester D. A., Cowen A., Mahadevan R., Stonefield M., Hardy B.** PolyMUMPs Design Handbook: A MUMPsfi process, MEMSCAP, 2011.

УДК 621.315.5 DOI: 10.17587/nmst.25.15-19

Е. А. Дубов[1], бакалавр, eugene.dbv@gmail.com, **И. А. Пронин[1],** д-р техн. наук, проф., pronin_i90@mail.ru, **А. С. Комолов[2],** д-р техн. наук, проф., akomolov07@ya.ru,
Н. Д. Якушова[1], ст. преподаватель, yand93@mail.ru
[1] Пензенский государственный университет, г. Пенза,
[2] Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ ZnO ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕХАНОАКТИВАЦИИ

Поступила в редакцию 30.05.2022

Исследованы закономерности эволюции дефектности и химических особенностей поверхности под действием механоактивации в аттриторе. С помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) были исследованы образцы, размолотые в течение 1, 3 и 5 ч. Было установлено, что соотношения между элементами и их фазами коррелируют со стехиометрией образца.

Ключевые слова: *диспергирование, аттритор, оксид цинка, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, дефекты, углерод, кислород, стехиометрия, механоактивация*

Введение

Оксид цинка ZnO является широкозонным полупроводником, широко используемым для катализаторов, фотокатализаторов, сенсорных элементов, а также в качестве материала, интенсивно адсорбирующего парниковые газы. В настоящее время разработка полупроводниковых сенсорных элементов, детектирующих оксиды углерода (CO, CO_2), является актуальной научно-технической задачей. Обычно в качестве чувствительной матрицы используют широкозонные оксиды металлов: ZnO, CuO и т. д. [1, 2]. В наши дни существует большое число подходов по синтезу, модификации газочувствительных полупроводников с возможностью очувствления к угарному и углекислому газам. В работе [3] показано, что состояние поверхности и виды адсорбированных форм углерода, преимущественно находящихся на этой поверхности, вносят решающий вклад в хеморезистивный отклик прибора. Например, в случае взаимодействия угарного газа с поверхностью оксида олова в температурном диапазоне 150...450 °С происходит взаимодействие молекулы CO с хемосорбированной заряженной формой кислорода и последующей десорбцией углекислого газа как продукта реакции и переноса электрона в зону проводимости полупроводника.

Одним из распространенных способов модификации поверхностных свойств материала является механоактивация с помощью размола. В данной работе использовали размол в аттриторе в связи с низкой стоимостью и возможностью получать желаемую структуру поверхности в зависимости от условий диспергирования.

1. Материалы и методы

Диспергирование коммерческих порошков оксида цинка проводили в аттриторе *BATCH-LAB*, *model*: *HD*/01 с использованием корундового стакана объемом 2 л и мелющих тел из ZrO_2 с диаметром 3 мм. Итоговое соотношение массы мелющих тел к массе оксида цинка составило 18:1. Измельчение проводили в среде изопропилового спирта с использованием следующих параметров: скорость измельчения — 400 об/мин; время размола — 1, 3 и 5 ч. Полученные порошки высушивали в течение 24 ч при температуре 70 °С в воздушной атмосфере. Никакой дополнительной химической обработки не проводили.

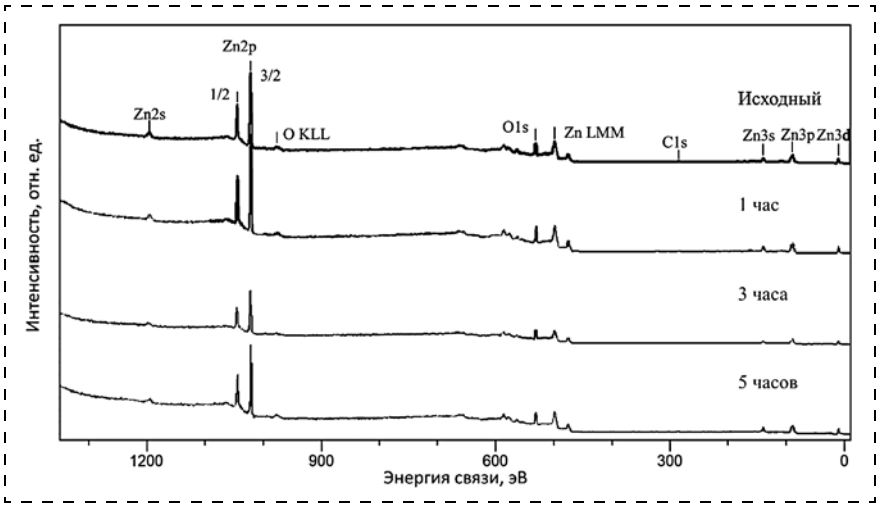


Рис. 1. Спектр поверхности ZnO для разного времени обработки

После механической обработки выполняли измерение рентгеновских фотоэлектронных спектров в сверхвысоковакуумных условиях (давление $\sim 10^{-7}$ Па) на комплексном фотоэлектронном спектрометре *Escalab* 250*Xi* с энергией фотонов Al—Kα = 1486 эВ.

Деконволюция пика *XPS* была выполнена посредством вычитания фона Ширли с последующей подгонкой пика к функциям Фойгта, имеющим смешанный характер Гаусса и Лоренца. Для удаления поверхностных загрязнений поверхность ZnO мягко протравливали ионами Ar^+ (I_i = 1 мкА, t_i = 30 с). Обработку результатов проводили с помощью программы *CasaXPS*.

2. Результаты и обсуждения

При рассмотрении полного спектра поверхности оксида цинка можно идентифицировать множество пиков, среди которых присутствуют остовные уровни Zn, O и C, а также пики, соответствующие оже-электронам O *KLL* и Zn *LMM* (рис. 1).

Подробно рассмотрим остовные уровни Zn 2*p* 3/2, O 1*s* и C 1*s*, в связи с тем, что по значениям их энергий связи будут сделаны выводы об особенностях состояния поверхности.

Спектр C 1*s* можно разложить на три формы (рис. 2). Самая низкоэнергетическая форма отвечает связям C—C (графит). Эта форма занимает энергию, равную 285 эВ, с ее помощью проводили нормировку всего спектра. Форма с энергией связи 286,8 эВ принадлежит группе C—H, отвечающей за органические загрязнители. Самая высокоэнергетическая форма с энергией 289,11 эВ относится к карбонатоподобной группе, отвечающей за взаимодействие образца с углекислым газом [4].

Из спектра O 1*s* возможно выделить две формы (рис. 3): высокоэнергетическую и низкоэнергетическую, последняя более интенсивна во всех случаях. Анализ позволяет сказать, что низкоэнергетическая форма соответствует кислороду, занимающему регулярное положение в кристаллической решетке (O 1*s* (*lat*), а высокоэнергетическая форма представляет собой сигнал от кислорода во всех его адсорбированных формах на поверхности (OH-группы, различная органика и непосредственно адсорбированный кислород) [5].

Цинк, находящийся на поверхности и в приповерхностных областях, представлен в одной форме (решеточной) (рис. 4).

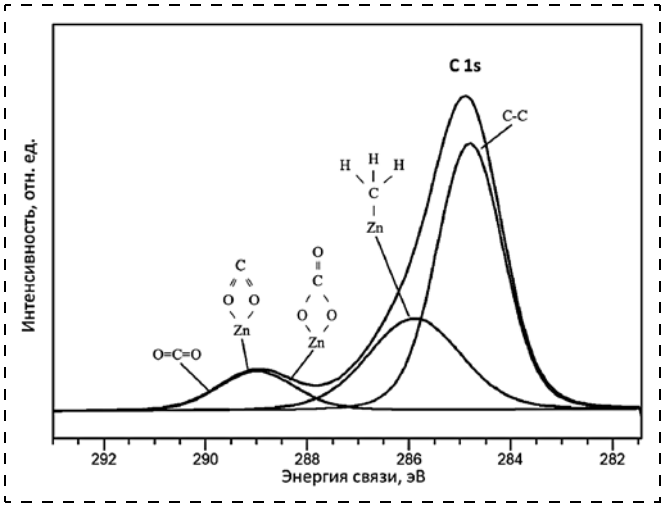


Рис. 2. Деконволюция спектра C 1*s*

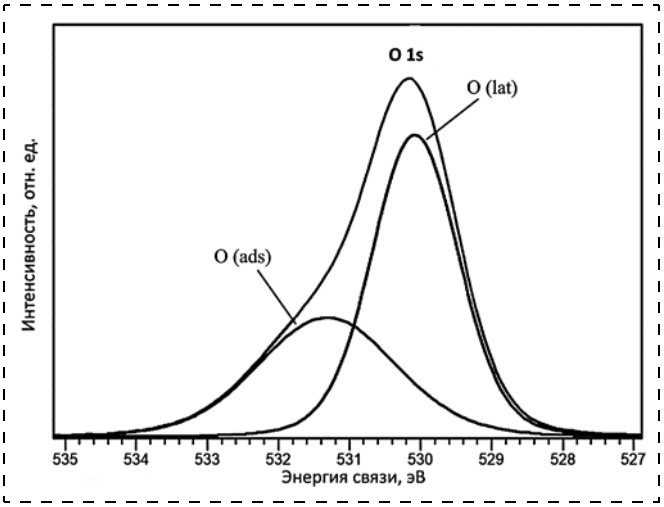


Рис. 3. Деконволюция спектра O 1*s*

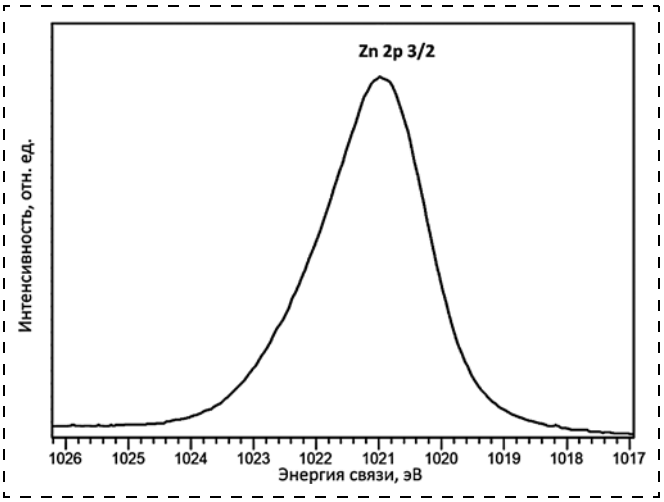


Рис. 4. Спектр Zn 2*p* 3/2

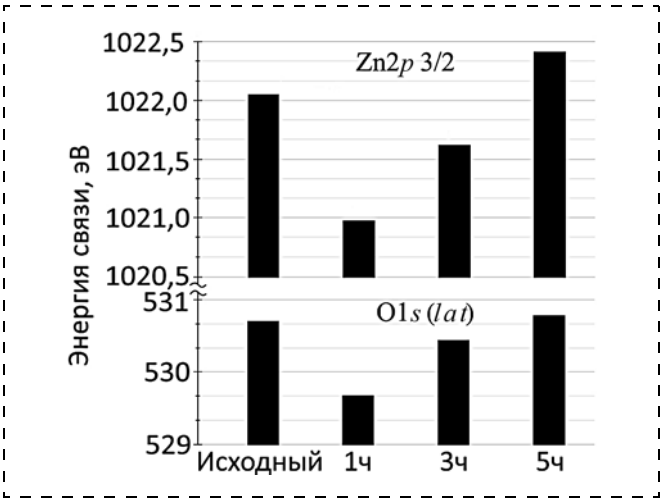


Рис. 5. Зависимость энергии связи у Zn 2*p* 3/2 и O 1*s* (*lat*)

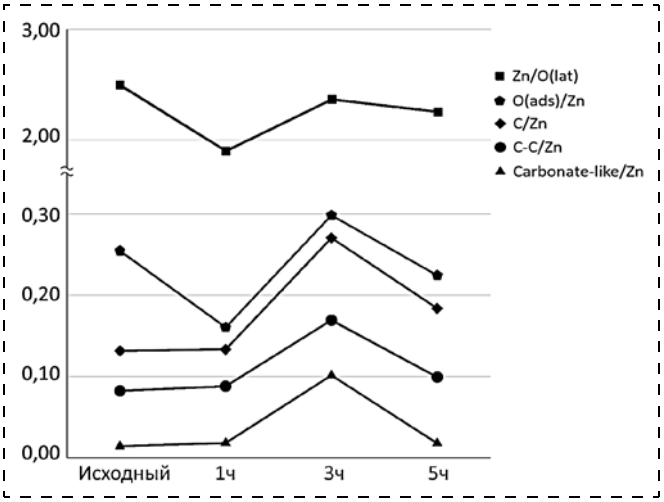


Рис. 6. Стехиометрия (Zn 2*p* 3/2)/(O 1*s* (*lat*)) и соотношения между различными формами химических элементов на поверхности

Рассмотрим изменения энергии связи электронов для Zn 2*p* 3/2 и O 1*s* (*lat*) от различного времени механоактивации (рис. 5).

Как указывалось выше, образцы протравливали аргоном для нивелирования влияния внешних факторов, поэтому будем рассматривать данные только после травления. Информация о цинке и кислороде дублирует друг друга, исходя из это проанализируем изменение связи только для Zn 2*p* 3/2.

Уменьшение энергии связи соответствует увеличению количества цинка или уменьшению количества кислорода. Дальнейшие процессы говорят об обратном: увеличение энергии связи говорит об уменьшении количества цинка или увеличении количества кислорода [6].

Для того чтобы сделать выводы об особенностях эволюции поверхностных свойств из полученных данных, необходимо рассмотреть изменение стехиометрии образца $\left(\frac{[\mathrm{Zn}]}{[\mathrm{O}(lat)]}\right)$ (рис. 6).

Одновременный анализ зависимостей энергии связи Zn 2*p* 3/2 и изменение стехиометрии в течение часового размола говорит о том, что кислород начинает заполнять поверхностные вакансии в подрешетке кислорода, а также возможно достроение решетки кислородом из окружающей среды по типу формирования твердого раствора вычитания.

Дальнейшая механообработка в течение 3 ч приводит к увеличению энергии связи Zn 2*p* 3/2, а также увеличению концентрации цинка на поверхности. Одновременно такие условия могут быть выполнены только при соблюдении двух факторов: приток цинка из объема к поверхности по междоузлиям, либо переход цинка на поверхность из регулярных положений в междоузлие, т. е. формирование межузельных катионов цинка [6].

Заключение

В ходе исследования удалось выяснить, что коммерческий порошок ZnO после механоактивации в течение 1, 3 и 5 ч меняет свои поверхностные свойства. Это может быть обусловлено изменением дефектности структуры, в том числе притока цинка из объема к поверхности по междоузлиям, или переход цинка на поверхность из регулярных положений в междоузлие, т. е. формирование межузельных катионов цинка. После трех часов размола максимальная доза карбонатоподобной формы углерода говорит о самом интенсивном взаимодействии образца с углекислым газом и удержании CO_2 на поверхности.

Авторы благодарят д-ра техн. наук, профессора, зав. кафедрой теоретических основ материаловедения Санкт-Петербургского государственного техно-

логического института (технического университета) М. М. Сычева за помощь при проведении синтеза образцов. Также авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук, профессору Г. С. Коротченкову (Молдавский государственный университет) за плодотворное обсуждение результатов эксперимента.

Работы выполнены при поддержке Минобрнауки РФ (проекты МД-172.2021.4, СП-3720.2021.1).

Список литературы

1. **Chang S. J., Hsueh T. J., Chen I. C., Huang B. R.** Highly sensitive ZnO nanowire CO sensors with the adsorption of Au nanoparticles // Nanotechnology. 2008. Vol. 19. N. 17. P. 175502.

2. **Hsueh T. J., Chen Y. W., Chang S. J., Wang S. F., Hsu C. L., Lin Y. R., Chen I. C.** ZnO nanowire-based CO sensors prepared at various temperatures // Journal of The Electrochemical Society. 2007. Vol. 154. N. 12. P. J393.

3. **Brînzari V., Cho B. K., Korotcenkov G.** Carbon 1s photoemission line analysis of C-based adsorbate on (111) In_2O_3 surface: The influence of reducing and oxidizing conditions // Applied Surface Science. 2016. Vol. 390. P. 897—902.

4. **Alshammari A. S., Chi L., Chen X., Bagabas A., Kramer D., Alromaeh A., Jiang Z.** Visible-light photocatalysis on C-doped ZnO derived from polymer-assisted pyrolysis // RSC advances. 2015. Vol. 5. N. 35. P. 27690—27698.

5. **Beamson G.** High Resolution XPS of Organic Polymers: The Scienta ESCA300 Database. Chichester, UK: Wiley & Sons, 1992. 267 p.

6. **Пронин И. А., Якушова Н. Д., Сычев М. М., Комолов А. С., Мякин С. В., Карманов А. А., Аверин И. А., Мошников В. А.** Эволюция кислотно-основных свойств поверхности порошков оксида цинка, полученных методом размола в аттриторе // Физика и химия стекла. 2019. Т. 45, № 3. С. 274—287.

E. A. Dubov[1], Student, eugene.dbv@gmail.com, **I. A. Pronin[1],** D. Sc., Professor, pronin_i90@mail.ru, **A. S. Komolov[2],** D. Sc., Professor, akomolov07@ya.ru, **N. D. Yakushova[1],** Senior Lecturer, yand93@mail.ru

[1] Penza State University, Penza, 440026, Russian Federation,

[2] St Petersburg University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

Corresponding author:
Evgeniy A. Dubov, Student, Penza State University, Penza, 440026
E-mail: eugene.dbv@gmail.com

Study of the Evolution of the Surface Properties of ZnO Powders under the Action of Mechanoactivation

Received on May 30, 2022
Accepted on June 29, 2022

At present, the development of semiconductor sensor elements that detect hazardous oxides (CO, CO_2) is an urgent scientific and technical task. As a rule, wide-gap metal oxides, such as ZnO, CuO, are used as a sensor matrix. Today, there are a large number of approaches to the synthesis and modification of gas-sensitive semiconductors with the possibility of sensitivity to carbon monoxide and carbon dioxide. The state of the environment and the forms of morbidity that occur in this area. The ultimate goal of the study is to find the optimal conditions for the mechanical grinding of zinc oxide in order to achieve the maximum value of the chemoresistive response.

In this paper, we studied the patterns of evolution of defects and chemical features of the surface under the action of mechanoactivation in the attritor. Using the X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) method, we studied samples ground for 1, 3, and 5 hours using an attritor in an isopropyl alcohol without additional chemical treatment. Deconvolution was carried out by subtracting the Shirley background and then fitting the peak to the Voigt functions, which have a mixed character of Gauss and Lorentz. As a result, it was found that the ratios between the elements and their phases correlate with the stoichiometry of the sample.

Keywords: *milling, attritor, zinc oxide, X-ray photoelectron spectroscopy, defects, carbon, oxygen, stoichiometry, mechanical activation*

For citation:
Dubov E. A., Pronin I. A., Komolov A. S., Yakushova N. D. Study of the Evolution of the Surface Properties of ZnO Powders under the Action of Mechanoactivation, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 1, p. 15—19.

DOI: 10.17587/nmst.25.15-19

References

1. **Chang S. J., Hsueh T. J., Chen I. C., Huang B. R.** Highly sensitive ZnO nanowire CO sensors with the adsorption of Au nanoparticles, *Nanotechnology*, 2008, vol. 19, no. 17, p. 175502.

2. **Hsueh T. J., Chen Y. W., Chang S. J., Wang S. F., Hsu C. L., Lin Y. R., Chen I. C.** ZnO nanowire-based CO sensors prepared at various temperatures, *Journal of The Electrochemical Society*, 2007, vol. 154, no. 12, p. J393.

3. **Brînzari V., Cho B. K., Korotcenkov G.** Carbon 1s photoemission line analysis of C-based adsorbate on (111) In_2O_3 surface: The influence of reducing and oxidizing conditions, *Applied Surface Science*, 2016, vol. 390, pp. 897—902.

4. **Alshammari A. S., Chi L., Chen X., Bagabas A., Kramer D., Alromaeh A., Jiang Z.** Visible-light photocatalysis on C-doped ZnO derived from polymer-assisted pyrolysis, *RSC advances*, 2015, vol. 5, no. 35, pp. 27690—27698.

5. **Beamson G.** High Resolution XPS of Organic Polymers: The Scienta ESCA300 Database, Chichester, UK, Wiley & Sons, 1992, 267 p.

6. **Pronin I. A., Yakushova N. D., Sychev M. M., Komolov A. S., Myakin S. V., Karmanov A. A., Averin I. A., Moshnikov V. A.** Evolyuciya kislotno-osnovnyh svojstv poverhnosti poroshkov oksida cinka, poluchennyh metodom razmola v attritore, *Fizika i himiya stekla*, 2019, vol. 45, no. 3, pp. 274—287 (in Russian).

УДК 539.612 DOI: 10.17587/nmst.25.19-22

М. М. Оракова, ст. преподаватель, uyanaeva1984@rambler.ru,
Р. Р. Нагаплежева, ст. преподаватель, **Ф. М. Цеева,** канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель,
Д. А. Караф, студент, **Э. Х. Бозиев,** студент
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, Нальчик

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛА СКОЛЬЖЕНИЯ КАПЛИ ВОДЫ С ПОВЕРХНОСТИ КЭМ (111)

Поступила в редакцию 07.10.2022

Исследованы зависимости углов скольжения воды с поверхности кремния от режимов их подготовки. Объектами исследования были пластины КЭМ (111). Для очистки поверхности от загрязнений и естественного оксида применяли водный раствор HF. Для оценки эффективности очистки и состояния исследуемых поверхностей измеряли динамический краевой угол смачивания. Установлено, что пластины, для которых в процедуре подготовки используется этанол, лучше смачиваются водой. Полученные экспериментальные данные подтверждаются АСМ-снимками.

Ключевые слова: *угол стекания, динамический краевой угол, КЭМ (111), плавиковая кислота, АСМ-изображение, поверхностное натяжение, смачиваемость, поверхностные загрязнения*

Введение

В современной микро- и наноэлектронике основным перспективным материалом в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем продолжает оставаться кремний различного типа проводимости, уровня легирования и ориентации [1, 2]. Сырье для его получения практически неисчерпаемо: содержание в земной коре составляет около 30 %. Высокие механические, химические, тепловые, оптические и электрофизические свойства кремния обеспечили ему лидирующее место в производстве как дискретных полупроводниковых приборов, так и в производстве интегральных микросхем на протяжении 50 лет [3—6].

Многостадийная обработка кремния приводит к неизбежным загрязнениям поверхности, а функциональность прибора, согласно современным представлениям, определяет практически всегда только приповерхностный слой кристалла, что обусловливает весьма специфические требования именно к обработке поверхности [7, 8].

Требования к чистоте поверхности, предъявляемые на различных этапах изготовления полупроводниковых приборов и микросхем, неодинаковы. Поверхность, чистая для одной операции, может оказаться недопустимо грязной для другой [9—11]. Поэтому исследование влияния обработки поверхности на свойства кремния на сегодняшний день актуально.

Энергетическая характеристика поверхности может быть оценена смачиванием поверхности жидкостью с определенным поверхностным натяжением. Количественной мерой смачивания служит краевой угол смачивания [12—14]. На значение краевого угла существенное влияние оказывают как свойства жидкости, так и чистота поверхности. По этой причине к состоянию поверхности и сте-

пени ее чистоты предъявляют высокие требования [15].

Таким образом, целью данной работы явилось исследование зависимости углов стекания воды с поверхности кремния от режимов подготовки исследуемой поверхности.

Методика проведения эксперимента

В качестве образцов были использованы пластины монокристаллического кремния электронной проводимости КЭМ с ориентацией поверхности (111). В качестве смачивающей жидкости использовали дистиллированную воду.

Для удаления загрязнений с поверхности используют сухие и жидкостные методы [16]. В полупроводниковом производстве наиболее распространены жидкостные химические методы очистки поверхности. Преимущество жидкостной очистки кремниевых поверхностей в промышленности наноэлектроники — способность получить атомарно однородные поверхности в дополнение к чистым и инертным.

Так как внешняя поверхность пластины должна быть свободной от посторонних частиц и загрязнений, в производстве кремниевые пластины подвергают следующим стадиям очистки [17]:

— промывка деионизованной водой и моющими средствами;

— растворители: изопропиловый спирт, ацетон, этанол, терпены;

— кислоты: плавиковая HF, серная H_2SO_4, перекись водорода H_2O_2, соляная HCl, азотная HNO_3 и их смеси.

Травление диоксида кремния проводят в травителях на основе плавиковой кислоты, оно описывается уравнением

$$SiO_2 + 4HF \rightarrow SiF_4 + 2H_2O.$$

Травящей частицей в растворах HF является свободная кислота. Травление кремния в растворах HF эффективно удаляет любой оксидный слой и создает устойчивую, завершенную водородом поверхность [18]. Поэтому в нашем случае для очистки поверхности от естественного оксида мы использовали водный раствор плавиковой кислоты.

Для исследований были подготовлены три группы образцов:

1) исследуемые образцы погружали в 10 %-ный водный раствор плавиковой кислоты при комнатной температуре на 2 мин. Далее образцы промывали в трехкаскадной ванне с проточной деионизованной водой по 10 мин в каждой. Затем проводили сушку образцов при 300 °С в течение 10 мин;

2) образцы второй группы, в отличие от первой, перед операцией травления обезжиривали в мыльном растворе;

3) третью группу образцов перед травлением промывали в этаноле.

После полного удаления оксида поверхность кремния начинает покрываться слоем естественного оксида SiO_x приблизительно через 100 мин пребывания в обычных атмосферных условиях. Этот слой оксида в течение нескольких часов достигает толщины 1,5 нм [19], поэтому исследования на поверхности кремния проводили сразу после химической очистки.

Далее для оценки эффективности очистки и состояния исследуемых твердых поверхностей мы измеряли динамический краевой угол.

Краевой угол определяли по следующей методике. На образец наносили каплю воды постоянного объема и наклонением образца фиксировали угол θ, при котором капля начинает стекать с поверхности. При такой постановке эксперимента большему углу θ будет соответствовать лучшая смачиваемость поверхности [20]. Известно, что угол стекания незначительно зависит от массы капли, поэтому мы на поверхности кремниевой подложки с помощью микрошприца через специальное отверстие в термостате формировали каплю жидкости с фиксированным объемом 5 мл. Угол стекания θ определялся наклонением образца.

Значение угла стекания рассчитывали, как среднее из не менее 12 значений. Среднее квадратичное отклонение при этом составило ±2°.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости углов стекания капли при различных способах обработки пластин КЭМ (111).

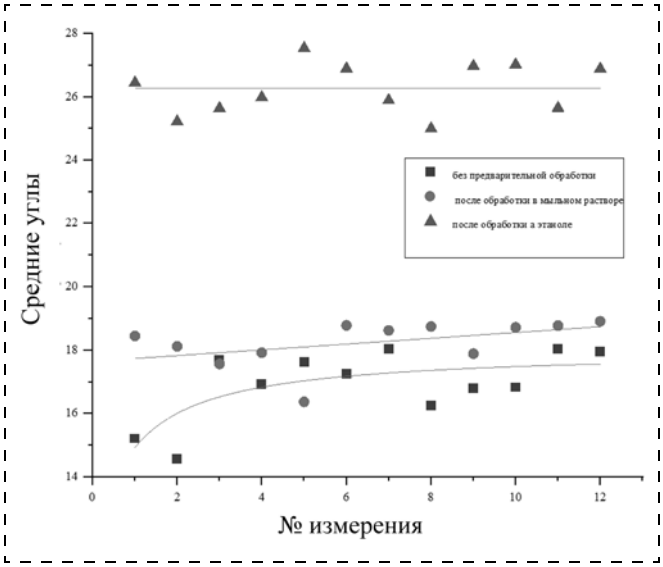


Рис. 1. Угол стекания капли с поверхности пластины КЭМ (111) при различных режимах обработки пластин

Из графика видно, что пластины, для которых в процедуре подготовки используется этанол, лучше смачиваются водой. Этот результат хорошо согласуется с результатами, полученными на атомно-силовом микроскопе (рис. 2, 3, 4, см. четвертую сторону обложки).

Поверхность образцов КЭМ (111) была исследована с помощью атомно-силового микроскопа сразу после удаления естественного оксида (рис. 2), после обезжиривания в мыльном растворе (рис. 3) и после обезжиривания в этаноле (рис. 4).

Результаты, приведенные на рис. 2, 3 и 4 также свидетельствуют о влиянии способа химической подготовки на качество поверхности.

Таким образом, установлено, что предварительная обработка кремния этанолом приводит к существенному изменению свойств поверхностного слоя. Видно, что пластины, для которых в процедуре подготовки использован этанол, лучше смачиваются водой. Этот результат также подтверждается АСМ-снимками.

Список литературы

1. **Dong-Won Kim, Sungbo Hwang, Eolgar T. F., Sanjoy Banerjee.** Characterization of SiGe Quantum Dots on SiO_2 and HfO_2 Grown by Rapid Thermal Chemical Preposition for Nanoelectronic Devicer // Journal of Electrochemical Society. 2003. Vol. 150, N. 4. P. 240—243.

2. **Никифоров В. В., Ульянов В. В., Пчеляков О. П.** и др. Рост и структура наноостровков Ge на атомарно чистой поверхности окиси Si // ФТТ. 2004. Т. 46, № 1. С. 80—82.

3. **Kovalevskii A., Strogova A., Strogova N., Babushkina N.** Correlation between the size of three-dimensional nanoclusters and C—V characteristics // Proceedings of International conference nanomeeting. 2013. P. 629—631.

4. https://ostec-materials.ru/materials/dlya-proizvodstva-mi/plastiny-dlya-kristalnogo-proi.php

5. **Соловьева Е. С., Паршин А. С.** Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов кремниевых пластин в процессе термической очистки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т. 1, № 9, С.142—143.

6. **Ковалевский А. А., Строгова А. С., Комар О. М.** Исследование влияния чистоты поверхности подложек на процесс образования и трансформацию нанокластеров кремний-германий. // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 3. С. 149—158.

7. **Востоков Н. В., Дроздов Ю. Н., Красильник З. Ф.** и др. Влияние предосаждения $Si_{1-x}Ge_x$ слоя на рост SiGe/Si самоформирующихся островков // ФТТ. 2005. Т.47, № 1. С. 29—32.

8. **Яремко А. М., Валах М. Я., Джаган В. Н.** и др. Взаимосвязь минимумов поверхностной энергии самоиндуцированных наноостровков SiGe и их формы // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40, Вып. 4. С. 391—396.

9. **Kovalevskii A. A.** Suppression of Recrystallization Processes in Polycrystalline Silicon Films by Thin Layers of Amorphous Silicon // Russian Microelectronics. 1998. Vol. 27, N. 1. P. 16—21

10. **Samoilov A. V., Du Bois D., Comita P. B., Carlson D.** Delicated Pre-clean Reduces Epi's Thermal Budget // Semiconductor International. 2000. N. 11. P. 73.

11. **Kovalevskii A., Strogova A., Strogova N., Babushkina N.** Investigation of Electrical Properties of MOS Structures with Silicon Nitride Films Doped with Rare Earth Elements // Russian Microelectronics. 2014. Vol. 43, N. 4. P. 246—251.

12. **Satoru Watanabe, Noriaki Nakayama, Takashi Ito.** Homogeneous hydrogen-terminated Si(111) surface formed using aqueous HF solution and water // Applied Physics Letters. 1991. September 16. Vol. 59. Is. 12. P. 1458—1460.

13. **Braun E. A.** Photoresist stripping faces low-k challenges // Semiconductor international. 1999. Vol. 22, N. 12. P. 64—74.

14. **Kern W., Puotinen D. A.** Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology // RCA review. 1970. Vol. 31. P. 187—206.

15. **Полтавцев Ю. Г.** Технология обработки поверхностей в микроэлектронике. Киев: Техника, 1990. 205 с.

16. **Kern W.** Radiochemical study of semiconductor surface contamination. I. Adsorption reagent compounds // RCA review. 1970. Vol. 31. P. 207—233.

17. **Моро У.** Микролитография. Ч. 1 / Пер. с. англ. М.: Мир, 1990. 351 с.

18. **Калинина Н. В., Соколов С. М., Ашхотов О. Г., Чагай Е. О.** Подготовка воды и методика измерения краевого угла смачивания поверхности свинцовосиликатного стекла 6Ба4 // Вестник КБГУ. Серия Физические науки. 2005. Вып. 10. С. 35—37.

19. **Воронов А. Н.** Коллоидная химия. М.: Высшая школа, 1987. 357 с.

20. **Коробцов В. В., Фидянин О. Н., Шапоренко А. П., Балашев В. В.** Влияние способа химической обработки на смачиваемость поверхности Si (111) // Журнал технической физики. 1996. Т. 66, № 12. С. 57—59.

M. M. Orakova, Lecturer, uyanaeva1984@rambler.ru, **R. R. Nagaplegeva,** Senior Lecturer,
F. M. Ceeva, Senior Lecturer, **D. A. Karaf,** Student, **E. H. Boziev**, Student
Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik

Corresponding author:
Orakova Mariyam M., Lecturer, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik
E-mail: uyanaeva1984@ranbler.ru

Investigation of the Angle of Sliding a Drop of Water from the Surface of the SI (111)

Received on October 07, 2022
Accepted on October 31, 2022

Abstract. *Silicon is the main raw material for micro- and nanoelectronics. Achievements in these areas are based to a sufficient extent on knowledge of the processes occurring on the surface. Therefore, the study of these processes on a silicon surface is topical today. In this work, the dependences of the angles of water runoff from the silicon surface on the modes of their preparation are experimentally studied. The objects of study were Si single-crystal silicon wafers with (111) surface orientation. An aqueous solution of hydrofluoric acid was used to clean the surface from contamination and natural oxide. To assess the efficiency of cleaning and the state of the studied solid surfaces, the dynamic wetting angle was measured. Distilled water was used as a wetting liquid. It has been found that plates for which ethanol is used in the preparation procedure are better wetted with water. The obtained experimental data are confirmed by the Auger analysis — the plates treated with ethanol contain a smaller amount of carbon-containing impurities. The obtained surface topograms also indicate the effect of surface chemical treatment on its roughness.*

Keywords: *runoff angle, dynamic contact angle, Si (111), hydrofluoric acid, surface tension, wettability, surface contamination, HF etching, surface oxide*

For citation:
Orakova M. M., Nagaplegeva R. R., Ceeva F. M., Karaf D. A., Boziev E. H. Investigation of the Angle of Sliding a Drop of Water from the Surface of the SI (111), *Nano- i mikrosistemnaja tehnika,* 2023, vol. 25, no. 1, pp. 19—22.

DOI: 10.1785/nmst.25.19-22

References

1. **Dong-Won Kim, Sungbo Hwang, Eolgar T. F., Sanjoy Banerjee.** Characterization of SiGe Quantum Dots on SiO_2 and HfO_2 Grown by Rapid Thermal Chemical Preposition for Nanoelectronic Devicer, *Journal of Electrochemical Society*, 2003, vol. 150, no. 4, pp. 240—243.

2. **Nikiforov V. V., Uljanov V. V., Pcheljakov O. P.** et al. Rost i struktura nanoostrovkov Ge na atomarno chistoj poverhnosti okisi Si, *FTT*, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 80—82 (in Russian).

3. **Kovalevskii A., Strogova A., Strogova N., Babushkina N.** Correlation between the size of three-dimensional nanoclusters and C-V characteristics, *Proceedings of International conference nanomeeting-2013 Reviews and Short notes. Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*, 2013, pp. 629—631.

4. https://ostec-materials.ru/materials/dlya-proizvodstva-mi/plastiny-dlya-kristalnogo-proi.php

5. **Soloveva E. S., Parshin A. S.** Spektroskopija harakteristicheskih poter jenergii jelektronov kremnievyh plastin v processe termicheskoj ochistki, *Aktualnye problemy aviacii i kosmonavtiki*, 2013, no. 9, vol. 1, pp. 142—143 (in Russian).

6. **Kovalevskij A. A., Strogova A. S., Komar O. M.** Issledovanie vlijanija chistoty poverhnosti podlozhek na process obrazovanija i transformaciju nanoklasterov kremnij-germanij, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, vol. 19, no. 3, 2017, pp. 149—158 (in Russian).

7. **Vostokov N. V., Drozdov Ju. N., Krasilnik Z. F.** et al. Vlijanie predosazhdenija Si1 — xGex sloja na rost SiGe/Si samoformirujushhihsja ostrovkov, *FTT*, 2005, vol. 47, no. 1, pp. 29—32 (in Russian)

8. **Jaremko A. M., Valah M. Ja., Dzhagan V. N.** et al. Vzaimosvjaz minimumov poverhnostnoj jenergii samoinducirovannyh nanoostrovkov SiGe i ih formy, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2006, vol. 40, no. 4, pp. 391—396 (in Russian).

9. **Kovalevskii A. A.** Suppression of Recrystallization Processes in Polycrystalline Silicon Films by Thin Layers of Amorphous Silicon, *Russian Microelectronics*, 1998, vol. 27, no. 1, pp. 16—21.

10. **Samoilov A. V., Du Bois D., Comita P. B., Carlson D.** Delicated Preclean Reduces Epi's Thermal Budget, *Semiconductor International*, 2000, no. 11, pp. 73.

11. **Kovalevskii A., Strogova A., Strogova N., Babushkina N.** Investigation of Electrical Properties of MOS Structures with Silicon Nitride Films Doped with Rare Earth Elements, *Russian Microelectronics*, 2014, vol. 43, no. 4, pp. 246—251.

12. **Satoru Watanabe, Noriaki Nakayama, Takashi Ito.** Homogeneous hydrogen-terminated Si(111) surface formed using aqueous HF solution and water, *Applied Physics Letters*, 1991, September 16, vol. 59, no. 12, pp. 1458—1460.

13. **Braun E. A.** Photoresist stripping faces low-k challenges, *Semiconductor international*, 1999, vol. 22, no. 12, pp. 64—74.

14. **Kern W., Puotinen D. A.** Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology, *RCA review*, 1970, vol. 31, pp. 187—206.

15. **Poltavcev Ju. G., Knjazev A. S.** Tehnologija obrabotki poverhnostej v mikrojelektronike, Kiev: Tehnika, 1990. 205 p. (in Russian).

16. **Kern W.** Radiochemical study of semiconductor surface contamination. I. Adsorption reagent compounds, *RCA review*, 1970, vol. 31, pp. 207—233.

17. **Moro U.** Mikrolitografija. V 2-ch. Ch. 1 / Per. s. angl. Moscow, Mir, 1990, 351 p. (in Russian).

18. **Kalinina N. V., Sokolov S. M., Ashhotov O. G., Chagaj E. O.** Podgotovka vody i metodika izmerenija kraevogo ugla smachivanija poverhnosti svincovosilikatnogo stekla 6Ba4, *Vestnik KBGU. Serija Fizicheskie nauki*, vol. 10, 2005, pp. 35—37 (in Russian).

19. **Voronov A. N.** Kolloidnaja himija. Moscow, Vysshaja shkola, 1987, 357 p. (in Russian).

20. **Korobcov V. V., Fidjanin O. N., Shaporenko A. P., Balashev V. V.** Vlijanie sposoba himicheskoj obrabotki na smachivaemost' poverhnosti Si (111), *Zhurnal tekhnicheskoj fiziki*, 1996, vol. 66, no. 12 (in Russian).

УДК 538.935 DOI: 10.17587/nmst.25.23-28

Л. Н. Вострецова[1], канд. физ.-мат. наук, доц., kapiton04@yandex.ru,
В. А. Рибенек[1], мл. науч. сотр., ribl98@mail.ru,
Д. Я. Вострецов[2], канд. физ.-мат. наук, стар. науч. сотр., dimka97@mail.ru
[1] Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Российская Федерация,
[2] НПК "Технологический центр", Москва, Зеленоград, Российская Федерация

ЭФФЕКТ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ СОСТОЯНИЙ В СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ InGaN/GaN

Поступила в редакцию 09.08.2022

Исследовано изменение электрических характеристик светодиодных структур на основе InGaN/GaN, вызванное протеканием тока большого значения в импульсном режиме. Обнаружено устойчивое переключение между высокопроводящим (резистивным) и низкопроводящим (светоизлучающим) состояниями, сопровождающееся сменой механизмов токопереноса. В качестве основного механизма переключения рассматривается перемещение подвижных дефектов и образование проводящих нитей (каналов) в области пространственного заряда.

Ключевые слова: *светодиод, квантовая яма, токоперенос, эффект проводящей нити*

Введение

Структуры на основе InGaN/GaN являются основой современных устройств оптоэлектроники, таких как светодиоды (СД) и лазерные диоды. В настоящее время ведутся разработки дисплеев на основе синих и зеленых микроСД [1—3]. СД также представляют интерес для оптической связи, обеспечивающей передачу данных со скоростью более 1 Гбит/с [4, 5]. Широкое распространение таких структур обусловливает высокие требования к надежности. Надежность полупроводниковых структур напрямую связана с внутренними дефектами, оказывающими влияние на электрические и оптические характеристики СД [6]. В настоящее время известно, что внутренние дефекты в СД на основе InGaN приводят к падению эффективности в области высоких токов. Так в работе [7] установлено, что высокая плотность глубоких центров в GaN приводит к возникновению прыжковой проводимости через область пространственного заряда (ОПЗ). Падение эффективности связано с безызлучательной рекомбинацией в барьерной области вследствие увеличения туннельной составляющей тока из квантовой ямы (КЯ). В работах [8—10] падение эффективности объясняют увеличением доли рекомбинации Шокли—Рида—Холла в дефектных участках квантовой ямы. В работе [11] показано, что падение эффективности структур на основе InGaN/GaN в области больших токов вызвано уменьшением времени жизни для безызлучательной рекомбинации Шокли—Рида—Холла. В работе [12] уменьшение КПД структур в области больших токов объясняют увеличением прыжковой проводимости через обедненную *n*-область, которая вызывает туннельные утечки тока по протяженным дефектам.

Вместе с тем дефекты в структурах InGaN/GaN можно использовать для улучшения эксплуатационных характеристик. В работе [13] предложен способ получения квантовых точек со значительно более высокой концентрацией индия, основанный на использовании уже существующих дефектов в СД на основе InGaN (V-образных ямок, которые образуются вследствие естественных дислокаций в материале). В работе [14] показано существование в таких структурах подвижных дефектов, которые могут быть использованы для создания переключающихся устройств, например резистивной памяти с произвольным доступом (сокр. ReRAM от англ. *resistive random-access memory*). Принцип ра-

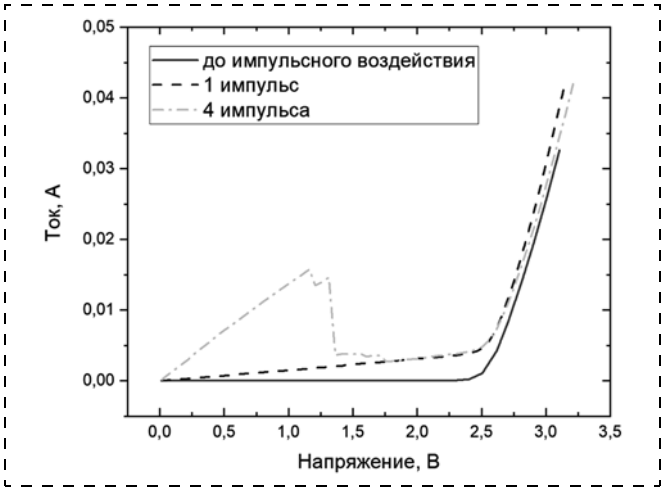


Рис. 1. Прямые вольт-амперные характеристики исследуемых структур до и после импульсного воздействия

боты данных устройств [15—21] связан с подвижными дефектами, образующими под действием напряжения проводящие нити (каналы), способные быстро изменить сопротивление прибора.

В работах [24—26] предложены конфигурации устройств, объединяющие в себе ReRAM на базе "металл—изолятор—металл" и СД, а также запоминающее устройство на базе диода с множественными квантовыми ямами [25, 26].

В данной работе рассмотрена возможность образования в структуре на основе СД InGaN/GaN проводящих каналов за счет дефектов, образованных при протекании тока большого значения в импульсном режиме.

Исследуемые образцы и методика эксперимента

Исследовали СД производства Taiwan Oasis Technology Co., Ltd синего свечения ($\hbar\omega_{max}$ = 2,66 эВ, λ_{max} = 468 нм при комнатной температуре) на основе твердого раствора InGaN.

Измерение прямых и обратных вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводили на автоматизированном измерительном комплексе, который предусматривает измерение малых токов с помощью Picoammeter Keithley 6485 (до 10 мА) и измерение больших токов с помощью В7-78. Исследуемые СД на основе InGaN/GaN подвергают импульсному воздействию с помощью источника переменного напряжения Г5-63 (длительность импульса 40 мкс, амплитуда импульса 15 В).

На рис. 1 приведены прямые ВАХ исследуемых СД до и после импульсного воздействия.

Как видно из рис. 1, на ВАХ исследуемой структуры до и после воздействия можно выделить два участка. В области напряжений до 2 В наблюдается слабая зависимость тока от напряжения (кривые 0 и 1 импульс на рис. 1). Это свидетельствует о туннельном механизме токопереноса в данном диапазоне напряжений [27]. В работе [27] показано, что в этом случае ток через структуру определяется значением вероятности туннелирования и концентрацией глубоких уровней в запрещенной зоне. Следовательно, при импульсном воздействии происходит увеличение концентрации дефектов, которое и приводит к росту тока в этом диапазоне напряжений. Кривая, соответствующая воздействию четырех импульсов, на рис. 1 демонстрирует наличие эффекта переключения из резистивного состояния в диодное. Для определения причины этого эффекта были проанализированы обратные ВАХ и температурные зависимости прямых ВАХ.

Результаты и обсуждение

Обратные ВАХ (рис. 2, *а*) обычно используют для диагностики уровней, участвующих в формировании токопереноса, в том числе и при туннельном механизме [28]. В работе [28] показано, что параметры рекомбинационных центров, участвующих в процессе токопереноса, можно определять по по-

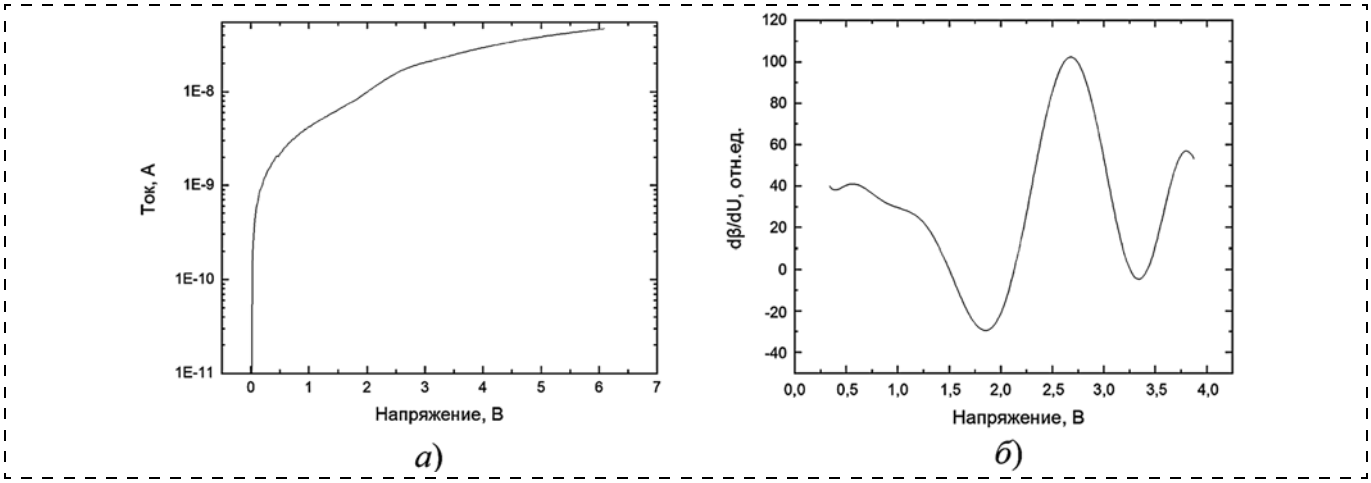


Рис. 2. Обратная ВАХ до импульсного воздействия (*а*) и зависимость $d\beta/dU = f(U)$ для исследуемых СД (*б*)

ложению максимумов зависимости $d\beta/dU = f(U)$, где β — дифференциальный показатель наклона ВАХ, в том числе и для структур с КЯ. На рис. 2, *б* приведена зависимость $d\beta/dU = f(U)$ для исследуемых СД. Из рис. 2 видно, что на зависимости $d\beta/dU = f(U)$ наблюдается максимум при напряжении 2,6 В, которому соответствует уровень с энергией 0,45 эВ. Приведенная в работе [28] методика определения положения уровня нечувствительна к зоне, от которой отсчитывается энергия. Если предположить, что отсчет идет от потолка валентной зоны, то согласно [14] найденный уровень можно идентифицировать как глубокий уровень, созданный вакансией азота в состоянии + или 2+.

Можно предположить, что при импульсном воздействии на структуру образуются дополнительные подвижные дефекты, за счет которых становятся возможными эффекты переключения и памяти в СД. В частности, обнаруженная по зависимости $d\beta/dU = f(U)$ (рис. 2) вакансия азота при сообщении энергии может перейти состояние 3+, которое является уже подвижным дефектом (уровень находится в валентной зоне) [14]. При прямом смещении (0...1,5 В) дефекты в *p—n*-переходе образуют проводящий канал (токопроводящую нить). Ток через диод протекает свободно, а поведение прибора можно охарактеризовать как резистивное. На ВАХ этот участок выглядит как прямая с наклоном 1,1 ± 0,1 Ом$^{-1}$, следовательно, описывается законом Ома. При увеличении прямого напряжения смещения подвижные заряженные дефекты начинают отталкиваться от границы *p—n*-перехода, "уходить" вглубь *p*- и *n*-областей полупроводника, к электродам, что приводит к разрыву проводящей нити. На ВАХ данная зависимость будет выглядеть как прямая ветвь ВАХ диода. При этом ток через диод уменьшается на порядок, а светоизлучающая способность восстанавливается вследствие преобладания излучательной рекомбинации. Для повторного переключения структуры необходимо вернуться в резистивное состояние, т. е. провести измерения обратной ВАХ (рис. 3).

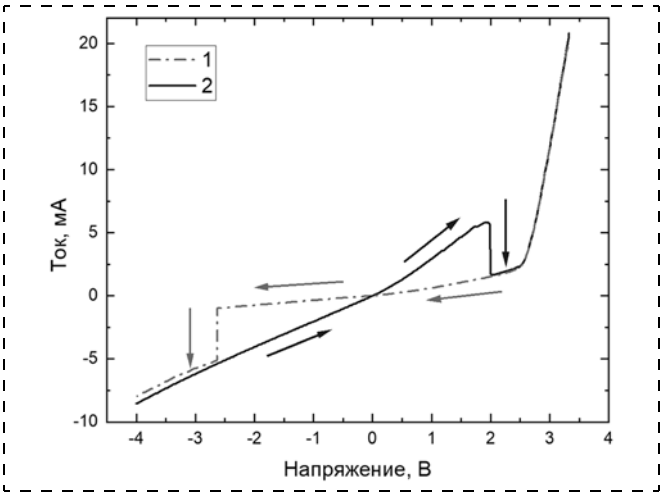


Рис. 3. Эффект переключения на прямой и обратной ВАХ исследуемой структуры:

1 — измерения от прямого напряжения смещения к обратному; *2* — измерения от обратного напряжения смещения к прямому

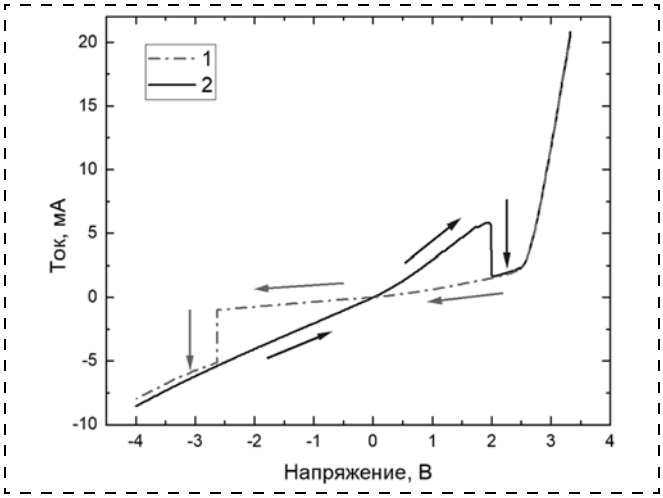


Рис. 4. Температурные ВАХ импульсно-модифицированного СД

На рис. 3 видно, что на обратной ВАХ происходит переключение, аналогичное наблюдаемому на прямой ветви ВАХ, но в состояние с более низким сопротивлением (резистивное). Возможно, при смене полярности приложенного напряжения заряженные подвижные дефекты притягиваются в область пространственного заряда (ОПЗ) *p—n*-перехода и вновь образуют проводящую нить. В работах [22—26] подчеркивается, что процесс образования нити является случайным как для полупроводниковых структур, так и для структур металл—диэлектрик—металл, поэтому переключение происходит при разных значениях прямого напряжения.

Различные механизмы формирования тока подтверждают и температурные зависимости прямых ВАХ (рис. 4).

Как видно из рис. 4, участок ВАХ до переключения слабо зависит от температуры, и может быть связан с образованием проводящего (металлического) канала за счет подвижных дефектов. Участок ВАХ после переключения демонстрирует увеличение тока с ростом температуры образца, и может быть связан с разрушением при росте прямого напряжения смещения на структуре проводящего канала и формированием тока по механизму полупроводникового *p—n*-перехода.

Заключение

В работе исследованы светодиодные структуры InGaN/GaN, модифицированные с помощью импульсного воздействия. Показана возможность на-

блюдения в таких структурах эффекта переключения, связанного с переключением резистивных состояний. В качестве возможного механизма, ответственного за резистивное переключение, было рассмотрено образование проводящих нитей в области пространственного заряда, появление которых связано с перемещением подвижных дефектов. Наличие канала с омической проводимостью демонстрируют и температурные зависимости прямых ВАХ, на которых до момента переключения наблюдается участок, слабо зависящий от температуры. После переключения ток через структуры увеличивается с ростом температуры, что характерно для диодной ветви ВАХ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FNRM-2022-0008).

Список литературы

1. **Huang Y., Hsiang E.-L., Deng M.-Y., Wu S.-T.** Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives // Light: Science & Applications. 2020. Vol. 9. P. 105—121.

2. **Parbrook P. J., Corbett B., Han J., Seong T.-Y., Amano H.** Micro-Light Emitting Diode: From Chips to Applications // Laser & Photonics Reviews. 2021. Vol. 15, is. 5, 2000133.

3. **Lee S.-L., Cheng C.-C., Liu C.-J., Yeh C.-N., Lin Y.-C.** 9.4-inch 228-ppi flexible micro-LED display // Journal of Society for Information Display. 2021. Vol. 29, is. 5. P. 360—369.

4. **Shi J. W., Chi K. L., Wun J. M., Bowers J. E., Sheu J. K.** GaN based Cyan light-emitting diodes with GHz bandwidth // IEEE International Photonics Conference. 2016. P. 623—624.

5. **Pepe A., Chen C.-J., Fu H. Y., Chen K.-C., Wang L., Zhang L., Wu M.-C., Liu X., Luo Y., Dong Y., Wei Z.** 2 Gbps/3 m air—underwater optical wireless communication based on a single-layer quantum dot blue micro-LED // Optics Letters. 2020. Vol. 45, is. 9. P. 2616—2619.

6. **Buffolo M., Caria A., Piva F., Roccato N., Casu C., De Santi C., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M.** Defects and Reliability of GaN-Based LEDs: Review and Perspectives // Phys. Status Solidi A. 2022. Vol. 219, is. 8, 2100727.

7. **Бочкарева Н. И., Шретер Ю. Г.** Влияние глубоких центров на конфаймент носителей в квантовых ямах InGaN/GaN и эффективность светодиодов // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, вып. 7. С. 796—803.

8. **Pavesi M., Manfredi M., Rossi F., Meneghini M., Zanoni E., Zehnder U., Strauss U.** Temperature dependence of the electrical activity of localized defects in InGaN-based light emitting diodes // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. 041 917.

9. **Peter M., Laubsch A., Bergbauer W., Meyer T., Sabathil M., Baur J., Hahn B.** New developments in green LEDs, Phys. Status Solidi A. 2009. Vol. 206. 1125.

10. **Bochkareva N. I., Rebane Y. T., Shreter Y. G.** Efficiency droop and incomplete carrier localization in InGaN/GaN quantum well light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103. 191101.

11. **Бочкарева Н. И., Ребане Ю. Т., Шретер Ю. Г.** Рост скорости рекомбинации Шокли-Рида-Холла в квантовых ямах InGaN/GaN как основной механизм падения эффективности светодиодов при высоких уровнях инжекции // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, вып. 12. С. 1714—1719.

12. **Бочкарева Н. И., Ребане Ю. Т., Шретер Ю. Г.** Падение эффективности GaN-светодиодов при высоких плотностях тока: туннельные токи утечки и неполная латеральная локализация носителей в квантовых ямах InGaN/GaN // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, вып. 8. С. 1107—1116.

13. **Chung J.-Y, Li Z., Goodman S. A., So J., Syaranamual G. J., Mishra T. P., Fitzgerald E. A., Bosman M., Lee K., Pennycook S. J., Gradečak S.** Light-Emitting V-Pits: An Alternative Approach toward Luminescent Indium-Rich InGaN Quantum Dots // ACS Photonics. 2021, is. 8 (10). P. 2853—2860.

14. **Buckeridge J., Catlow C. R. A., Scanlon D. O., Keal T. W., Sherwood P., Miskufova M., Walsh A., Woodley S. M., Sokol A. A.** Determination of the Nitrogen Vacancy as a Shallow Compensating Center in GaN Doped with Divalent Metals // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 114, 016405.

15. **Kumar D., Aluguri R., Chand U., Tseng T. Y.** Metal Oxide Resistive Switching Memory: Materials, Properties, and Switching Mechanisms // Ceramics International. 2017. Vol. 43. P. S547—S556.

16. **Zahoor F., Zainal T., Zulkifli A., Khanday F. A.** Resistive Random Access Memory (RRAM): an Overview of Materials, Switching Mechanism, Performance, Multilevel Cell (mlc) Storage, Modeling, and Applications // Nanoscale Research Letters. 2020. Vol. 15, 90.

17. **Kim J., Jung K., Kim Y., Jo Y., Cho S., Woo H., Lee S., Inamdar A. I., Hong J., Lee J. K., Kim H.** Switching Power Universality in Unipolar Resistive Switching Memories // Scientific Reports. 2016. Vol. 6, 23930.

18. **Kaswan J., Shukla A. K., Kumar A.** Unipolar resistive switching behavior in sol—gel synthesized FeSrTiO3 thin films // RSC Advances. 2017. Vol. 85, is. 7. P. 54111—54116.

19. **Chen Yi., Song H., Jiang H., Li Zh., Zhang Zh., Sun X., Lia D., Miao G.** Reproducible bipolar resistive switching in entire nitride AlN/n-GaN metal-insulator-semiconductor device and its mechanism // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. 193502.

20. **Nagase M., Takahashi T., Shimizu M.** Growth and Characterization of GaN/AlN Resonant Tunneling Diodes for High-Performance Nonvolatile Memory // Phys. Status Solidi A. 2021. Vol. 218, is. 3, 2000495.

21. **Zhang L., Zhu L., Li X., Xu Z., Wang W., Bai X.** Resistive switching mechanism in the one diode-one resistor memory based on p+-Si/n-ZnO heterostructure revealed by in-situ TEM // Scientific Reports. 2017. Vol. 7, 45143.

22. **Chang C.-W., Tan W.-C., Lu M.-L., Pan T.-C., Yang Y.-J., Chen Y.-F.** Electrically and Optically Readable Light Emitting Memories // Scientific Reports. 2014. Vol. 4, 5121.

23. **Liou Y.-R., Haider G., Cai S.-Y., Wu C.-L., Chen Y.-F.** High-Performance Light-Emitting Memories: Multifunctional Devices for Unveiling Information by Optical and Electrical Detection // Advanced Optical Materials. 2016. Vol. 4, is. 11. P. 1744—1749.

24. **Park Y. R., Choi W. K., Hong Y. J.** Resistive switching functional quantum-dot light-emitting diodes // Current Applied Physics. 2019. Vol. 19, is. 2. P. 102—107.

25. **Zheng K., Zhao J. L., Zhang Z. H., Ji Y., Zhu B. B., Tan S. T., Demir H. V., Teo K. L., Sun X. W.** An Optically Readable InGaN/GaN RRAM // IEEE Transactions on electron devices. 2016. Vol. 63, is. 6. P. 2328—2333.

26. **Fu K., Fu H., Huang X., Yang T.-H., Chen H., Baranowski I., Montes J., Yang C., Zhou J., Zhao Y.** Threshold Switching and Memory Behaviors of Epitaxially Regrown GaN-on-GaN Vertical p-n Diodes With High Temperature Stability // IEEE Electron Device Letters. 2019. Vol. 40, is. 3. P. 375—378.

27. **Булярский С. В., Рудь Ю. В., Вострецова Л. Н., Кагарманов А. С., Трифонов О. Ю.** Туннельная рекомбинация в полупроводниковых структурах с наноразупорядочением // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, вып. 4. С. 460—466.

28. **Булярский С. В., Грушко Н. С.** Обобщенная модель рекомбинации в неоднородных полупроводниковых структурах // ЖЭТФ. 2000. Т. 118, вып. 5. С. 1222—1237.

L. N. Vostretsova[1], Ph. D., Associate Professor, kapiton04@yandex.ru,
V. A. Rebenek[1], Junior Researcher, ribl98@mail.ru, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, 432017, Russian Federation, **D. Ya. Vostretsov[2],** Ph. D., Senior Researcher, dimka97@mail.ru
Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Zelenograd, Moscow, 124498, Russian Federation

Corresponding author:
Vostretsova Liubov N., Associate Professor, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, 432017, Russian Federation
E-mail: kapiton04@yandex.ru

The Effect of Switching Resistive States in LED Structures based on InGaN/GaN

Received on August, 09, 2022
Accepted on September, 26, 2022

In this paper, we study the change in the electrical characteristics of InGaN/GaN-based LED structures caused by the flow of a large current in the pulsed mode. A stable switching between high-conducting (resistive) and low-conducting (light-emitting) states was found, accompanied by a change in current transfer mechanisms. The movement of mobile defects and the formation of conductive filaments (channels) in the region of spatial charge is considered as the main switching mechanism.

Keywords: *LED, quantum well, current transfer, conductive filament effect*

For citation:
Vostretsova L. N., Rebenek V. A., Vostretsov D. Ya. The effect of Switching Resistive States in LED Structures based on InGaN/GaN, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 1, p. 23—28.

DOI: 10.17587/nmst.25.23-28

References

1. **Huang Y., Hsiang E.-L., Deng M.-Y., Wu S.-T.** Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives, *Light: Science & Applications*. 2020, vol. 9, pp. 105—121.
2. **Parbrook P. J., Corbett B., Han J., Seong T.-Y., Amano H.** Micro-Light Emitting Diode: From Chips to Applications, *Laser & Photonics Reviews*. 2021, vol. 15, is. 5, 2000133.
3. **Lee S.-L., Cheng C.-C., Liu C.-J., Yeh C.-N., Lin Y.-C.** 9.4-inch 228-ppi flexible micro-LED display, *Journal of Society for Information Display*. 2021, vol. 29, is. 5, pp. 360—369.
4. **Shi J. W., Chi K. L., Wun J. M., Bowers J. E., Sheu J. K.** GaN based Cyan light-emitting diodes with GHz bandwidth, *IEEE International Photonics Conference*, 2016, pp. 623—624.
5. **Pepe A., Chen C.-J., Fu H. Y., Chen K.-C., Wang L., Zhang L., Wu M.-C., Liu X., Luo Y., Dong Y., Wei Z.** 2 Gbps/3 m air—underwater optical wireless communication based on a single-layer quantum dot blue micro-LED, *Optics Letters*. 2020, vol. 45, is. 9, pp. 2616—2619.
6. **Buffolo M., Caria A., Piva F., Roccato N., Casu C., De Santi C., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M.** Defects and Reliability of GaN-Based LEDs: Review and Perspectives, *Phys. Status Solidi A*, 2022, vol. 219, is. 8, 2100727.
7. **Bochkareva N. I., Schroeter Yu. G.** Effect of Deep Centers on Charge-Carrier Confinement in InGaN/GaN Quantum Wells and on LED Efficiency, *Semiconductors*, 2018, vol. 52, is. 7, pp. 934—941 (in Russian)
8. **Pavesi M., Manfredi M., Rossi F., Meneghini M., Zanoni E., Zehnder U., Strauss U.** Temperature dependence of the electrical activity of localized defects in InGaN-based light emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, 041 917.
9. **Peter M., Laubsch A., Bergbauer W., Meyer T., Sabathil M., Baur J., Hahn B.** New developments in green LEDs, *Phys. Status Solidi A.*, 2009, vol. 206, 1125.
10. **Bochkareva N. I., Rebane Y. T., Shreter Y. G.** Efficiency droop and incomplete carrier localization in InGaN/GaN quantum well light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 103, 191101.
11. **Bochkareva N. I., Rebane Y. T., Schroeter Y. G.** Increase in the Shockley—Read—Hall recombination rate in InGaN/GaN QWs as the main mechanism of the efficiency droop in LEDs at high injection levels, *Semiconductors*, vol. 49, is. 12, pp. 1665—1670 (in Russian).
12. **Bochkareva N. I., Rebane Y. T., Schroeter Y. G.** Efficiency droop in GaN LEDs at high current densities: Tunneling leakage currents and incomplete lateral carrier localization in InGaN/GaN quantum wells, *Semiconductors*, 2014, vol. 48, is. 8, pp. 1079—1087 (in Russian).
13. **Chung J.-Y, Li Z., Goodman S. A., So J., Syaranamual G. J., Mishra T. P., Fitzgerald E. A., Bosman M., Lee K., Pennycook S. J., Gradečak S.** Light-Emitting V-Pits: An Alternative Approach toward Luminescent Indium-Rich InGaN Quantum Dots, *ACS Photonics*, 2021, is. 8 (10), pp. 2853—2860.
14. **Buckeridge J., Catlow C. R. A., Scanlon D. O., Keal T. W., Sherwood P., Miskufova M., Walsh A., Woodley S. M., Sokol A. A.** Determination of the Nitrogen Vacancy as a Shallow Compensating Center in GaN Doped with Divalent Metals, *Phys. Rev. Lett.*, 2015, vol. 114, 016405.
15. **Kumar D., Aluguri R., Chand U., Tseng T. Y.** Metal Oxide Resistive Switching Memory: Materials, Properties, and Switching Mechanisms, *Ceramics International*, 2017, vol. 43, pp. S547—S556.
16. **Zahoor F., Zainal T., Zulkifli A., Khanday F. A.** Resistive Random Access Memory (RRAM): an Overview of Materials, Switching Mechanism, Performance, Multilevel Cell (mlc) Storage, Modeling, and Applications, *Nanoscale Research Letters*, 2020, vol. 15, 90.
17. **Kim J., Jung K., Kim Y., Jo Y., Cho S., Woo H., Lee S., Inamdar A. I., Hong J., Lee J. K., Kim H.** Switching Power Uni-

versality in Unipolar Resistive Switching Memories, *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, p. 23930.

18. **Kaswan J., Shukla A. K., Kumar A.** Unipolar resistive switching behavior in sol—gel synthesized $FeSrTiO_3$ thin films, *RSC Advances*, 2017, vol. 85, is. 7, pp. 54111—54116.

19. **Chen Yi., Song H., Jiang H., Li Zh., Zhang Zh., Sun X., Lia D., Miao G.** Reproducible bipolar resistive switching in entire nitride AlN/n-GaN metal-insulator-semiconductor device and its mechanism, *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 105, no. 193502.

20. **Nagase M., Takahashi T., Shimizu M.** Growth and Characterization of GaN/AlN Resonant Tunneling Diodes for High-Performance Nonvolatile Memory, *Phys. Status Solidi A.*, 2021, vol. 218, is. 3, no. 2000495.

21. **Zhang L., Zhu L., Li X., Xu Z., Wang W., Bai X.** Resistive switching mechanism in the one diode-one resistor memory based on p + -Si/n-ZnO heterostructure revealed by in-situ TEM, *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 45143.

22. **Chang C.-W., Tan W.-C., Lu M.-L., Pan T.-C., Yang Y.-J., Chen Y.-F.** Electrically and Optically Readable Light Emitting Memories, *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, no. 5121.

23. **Liou Y.-R., Haider G., Cai S.-Y., Wu C.-L., Chen Y.-F.** High-Performance Light-Emitting Memories: Multifunctional Devices for Unveiling Information by Optical and Electrical Detection, *Advanced Optical Materials*, 2016, vol. 4, is. 11, pp. 1744—1749.

24. **Park Y. R., Choi W. K., Hong Y. J.** Resistive switching functional quantum-dot light-emitting diodes, *Current Applied Physics*, 2019, vol. 19, is. 2, pp. 102—107.

25. **Zheng K., Zhao J. L., Zhang Z. H., Ji Y., Zhu B. B., Tan S. T., Demir H. V., Teo K. L., Sun X. W.** An Optically Readable InGaN/GaN RRAM, *IEEE Transactions on electron devices*, 2016, vol. 63, is. 6, pp. 2328—2333.

26. **Fu K., Fu H., Huang X., Yang T.-H., Chen H., Baranowski I., Montes J., Yang C., Zhou J.,Zhao Y.** Threshold Switching and Memory Behaviors of Epitaxially Regrown GaN-on-GaN Vertical p-n Diodes With High Temperature Stability, *IEEE Electron Device Letters*, 2019, vol. 40, is. 3, pp. 375—378.

27. **Bulyarsky S. V., Rud' Yu. V., Vostretsova L. N., Kagarmanov A. S.,** Trifonov O. A. Tunneling recombination in semiconductor structures with nanordering, *Semiconductors*, 2009, vol. 43, is. 4, pp. 460—466 (in Russian).

28. **Bulyansky S. V., Grushko N. S.** Generalized model of recombination in inhomogeneous semiconductor structures, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2000, vol. 118, is. 5, pp. 1222—1237 (in Russian)

УДК 614.824.5 DOI: 10.17587/nmst.25.28-33

Т. В. Семенистая, канд. хим. наук, доц., доц. каф. semenistayatv@sfedu.ru
В. Е. Бережная, магистрант каф. Техносферной безопасности и химии
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
ФГАОУ ВО "Южный Федеральный Университет", г. Таганрог

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕТАНА БЫТОВЫМ ГАЗОСИГНАЛИЗАТОРОМ

Поступила в редакцию 12.10.2022

Разработано программное обеспечение для корректной работы датчика контроля воздушной среды, позволяющее в режиме реального времени получать информацию о концентрации детектируемого газа в воздушной среде. Реализована возможность оповещения пользователя в режиме реального времени посредством сервера временного электронного адреса.

Ключевые слова: *газосигнализатор, газочувствительные оловосодержащие пленки полиакрилонитрила, метан, сенсорный элемент, микроконтроллер, принципиальная схема*

На сегодняшний день, когда более 75 % населения являются жителями городов с растущим уровнем плотности и загруженности городской среды, мы все чаще сталкиваемся с вопросом обеспечения безопасности жизни, здоровья, личного имущества. Особенно остро эта проблема стоит перед жителями многоквартирных домов, в частности при эксплуатации газового оборудования. В быту пользователь не всегда способен адекватно оценить уровень опасности при обращении с газовым оборудованием. Наиболее частыми причинами аварий и чрезвычайных ситуаций становится поведение людей с ограниченными возможностями, психологическими или физиологическими отклонениями, а также возрастными особенностями.

Для минимизации техногенных рисков в настоящее время широко применяется совокупность систем, образующих "умный дом", а также ее отдельные компоненты. Одна из задач подобной автоматики — обнаружение и купирование аварийной ситуации на стадии появления первых признаков, например, оповещение о возникновении угрозы до того, как концентрация газа превысит пороговое значение и станет достаточной для взрыва при его утечке [1]. Причинами аварий [2], связанных с утечками природного газа в быту, являются не

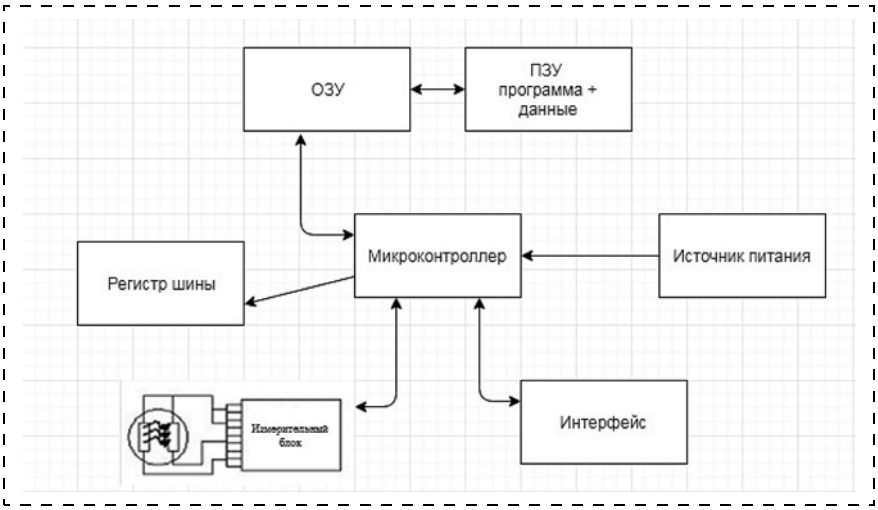


Рис. 1. Структурная схема работы газосигнализатора

только человеческий фактор, но и неисправность газового оборудования. Разработка бытового газосигнализатора таким образом остается актуальным вопросом для сокращения числа аварийных ситуаций.

Полупроводниковые датчики газа на основе металлорганических пленок широко применяют при утечке метана или мониторинге в различных условиях [3, 4]. По сравнению с другими методами обнаружения датчики газа имеют уникальные преимущества, такие как недорогое массовое производство, высокая чувствительность и хорошая стабильность [5]. Оксид олова широко применяют для контроля утечек метана [6, 7]. Датчики на основе SnO_2 используют в качестве домашних датчиков метана, они обладают высокой перекрестной чувствительностью к летучим органическим соединениям, таким как этилацетат, ацетон и этанол [8—10].

Цель данного исследования — разработка модели бытового газосигнализатора с возможностью удаленного контроля за состоянием воздушной среды помещения.

Основными критериями для разработки предлагаемой модели газосигнализатора были взаимодействие с пользователем, доступность отдельных компонентов, их взаимозаменяемость, низкая стоимость.

Первым этапом разработки модели газосигнализатора стала разработка его структурной и принципиальной схем.

На рис. 1 приведена общая схема работы газосигнализатора, взаимодействие программных и аппаратных компонентов.

Работа датчика основывается на изменении сопротивления поверхностного слоя полупроводникового материала в результате воздействия на него детектируемого газа, в данном случае метана.

Передача сигнала от полупроводникового сенсорного элемента (ППСЭ) микроконтроллеру представлена на рис. 2.

При подключении платы к источнику питания активируется оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) платы, которое принимает данные (рабочую программу) от постоянного запоминающего устройства (ПЗУ). Далее в ОЗУ из ПЗУ загружаются сохраненные ранее пользовательские данные. После этого программа посылает сигнал микроконтроллеру, который отправляет запрос состояния сенсорному элементу с заданной периодичностью. При изменении сопротивления поверхностного слоя полупроводникового материала микроконтроллер получает данные о текущем состоянии сенсорного элемента и передает эти данные в ОЗУ, где данные обрабатываются, и программа генерирует дальнейшие действия.

Основными рабочими элементами данной модели являются полупроводниковый сенсорный элемент и микроконтроллер, встроенный в рабочую плату контроллера.

ППСЭ представляет собой газочувствительные пленки оловосодержащего полиакрилонитрила, созданные на базе НОЦ "Микросистемная тех-

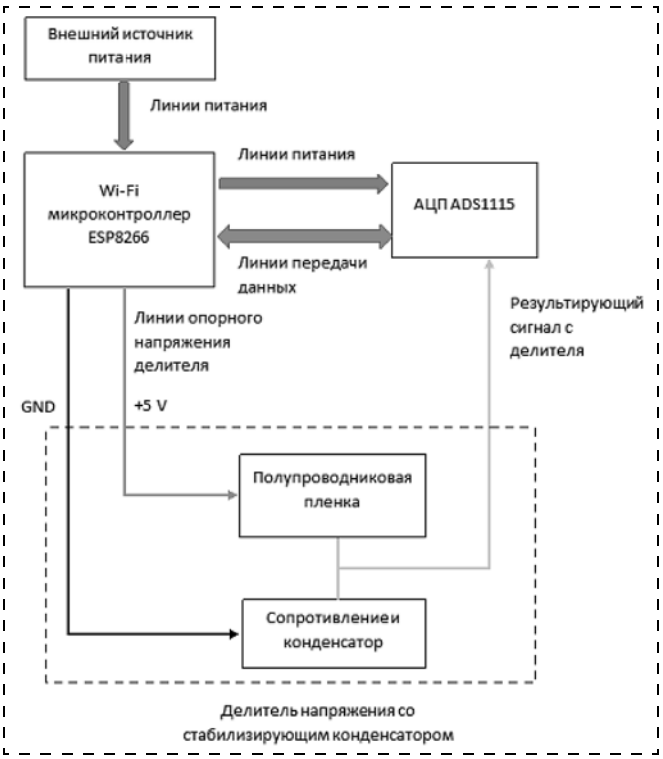


Рис. 2. Принципиальная схема процесса передачи сигнала

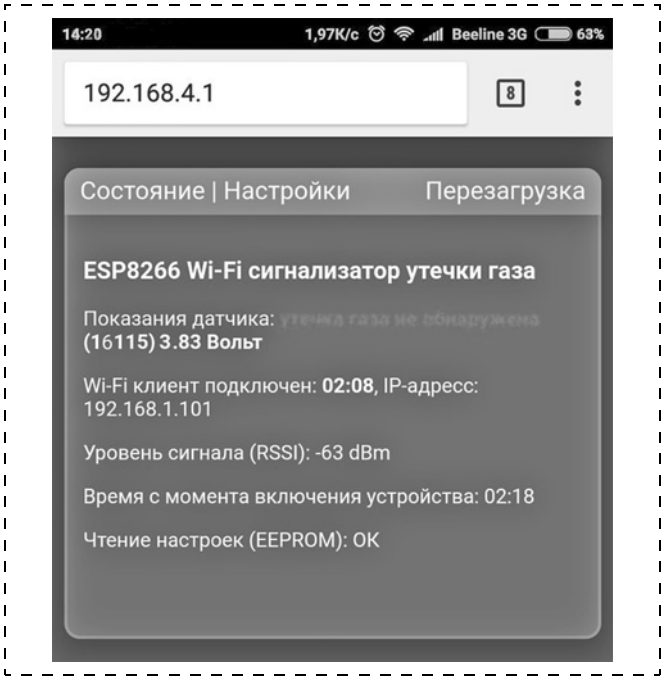


Рис. 3. Экран состояния при отсутствии детектируемого газа

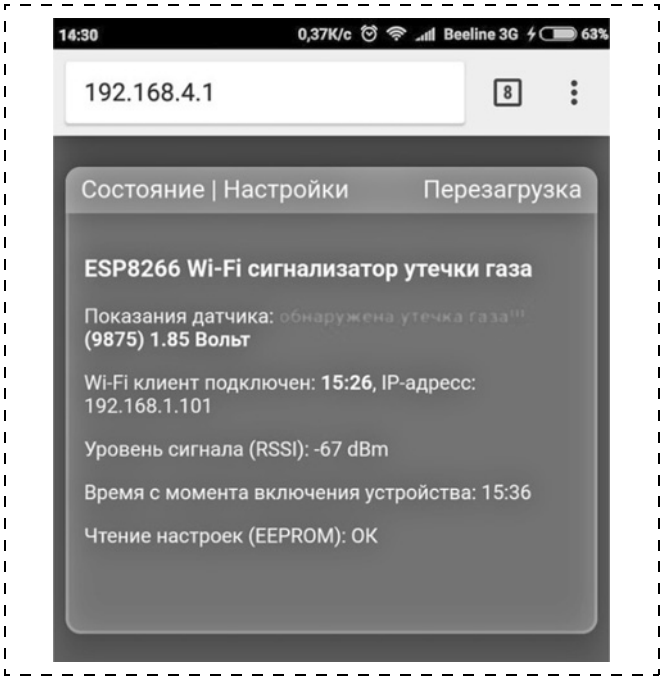


Рис. 4. Экран состояния системы при наличии детектируемого газа

ника и мультисенсорные мониторинговые системы" Южного федерального университета (г. Таганрог).

Контроллер включает в себя следующие элементы: микроконтроллер, ПЗУ, ОЗУ, порты ввода/вывода, Wi-Fi-модуль. В данной работе для сравнения были отобраны модели со встроенным Wi-Fi-модулем, способные генерировать собственную сеть или подключаться к внешней сети для подключения к удаленному серверу и оповещения пользователя. Следующими критериями стали доступность для приобретения и низкая стоимость.

Как видно из данных таблицы, контроллер RobotDyn R1D1 является наиболее оптимальным вариантом, так как совмещает в себе необходимые технические характеристики (достаточный объем оперативной и постоянной памяти, небольшие размеры, встроенный Wi-Fi-модуль), позволяет разрабатывать программное обеспечение под наиболее часто используемые платформы на языке высокого уровня C++, попадает в низкую ценовую категорию, что делает его доступным и легкозаменяемым.

Для написания программного обеспечения в нашей работе был использован язык программирования C++. Данное программное обеспечение предназначено для корректной работы модуля RobotDyn D1 R2, обрабатывающего сигналы газочувствительного сенсорного элемента при воздействии на последний детектируемого газа (CH_4). Программа определяет алгоритм (последовательность) распознавания входящих сигналов и формирования исходящих сигналов определенной длительности, уровня, последовательности и на определенных ножках. Для взаимодействия с пользователем разработан программный интерфейс, позволяющий удаленно контролировать состояние воздушной среды в режиме реального времени.

Сравнительная таблица характеристик контроллеров

Характеристики	Наименование контроллера		
	Raspberry pi 3 model B	STM32F3348-DISCO	RobotDyn R1D1
Разрядность шины данных, бит	64	32	32
Напряжение от внешнего источника питания, В	3,5	3,5	3,3
Оперативное запоминающее устройство, Кбайт	1024	48	80
Постоянное запоминающее устройство, Кбайт	Интегрируется	256	4
Число входов (GPIO)	40	51	11
Операционная система	Linux	Windows, Android, iOS	Windows, Android, iOS
Язык программирования	C++	Assembler	C++
Стоимость, руб.	3999	1450	380

Рис. 5. Снимок экрана персонального компьютера после получения электронного письма

При отсутствии детектируемого газа (рис. 3) в воздушной среде помещения программа непрерывно, с заданным интервалом опрашивает сенсорный элемент о его текущем сопротивлении. Если сопротивление поверхностного слоя неизменно, программа выводит сообщение "Утечка газа не обнаружена".

Если в воздушной среде присутствует детектируемый газ (рис. 4), программа опрашивает датчик 3 раза подряд для исключения возможных ошибок. При этом программа каждый раз получает значение, затем методом среднего вычисляет текущее сопротивление ППСЭ. После этого программа сравнивает полученное среднее значение с заданными в настройках параметрами сопротивления.

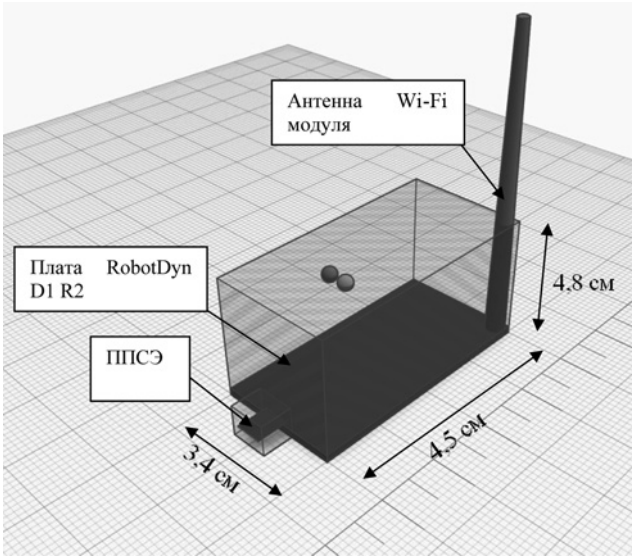


Рис. 6. Объемная модель газосигнализатора

При получении положительного ответа о наличии детектируемого газа в воздушной среде программа генерирует сообщение о превышении концентрации газа, которое затем направляется на электронную почту пользователя (рис. 5).

При получении отрицательного ответа происходит дальнейший опрос сенсорного элемента.

В результате работы мы получили модель газосигнализатора, представленную на рис. 6.

Представленная в данной работе модель газосигнализатора обладает такими преимуществами как:

— прочность;

— простота в использовании, что позволяет применять его широкому кругу пользователей;

— низкая себестоимость отдельных компонентов и модели в целом;

— портативность, допускающая установку в небольших помещениях, вентиляционных шахтах, технических проемах или перекрытиях.

Список литературы

1. **Новосельский Н. К., Чечура Р. Е., Латышенко Г. И., Карачева Г. А.** Внедрение инновационных технологий для предотвращения чрезвычайных ситуаций, связанных со взрывами бытового газа в жилых домах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2019. URL: https:// cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-innovatsionnyh-tehnologiy-dlya-predotvrascheniya-chrezvychaynyh-situatsiy-svyazannyh-so-vzryvami-bytovogo-gaza-v-zhilyh (дата обращения: 20.09.2021).

2. **Чепегин И. В.** Анализ причин аварий со взрывами природного газа // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 10. URL: https://cyberleninka.ru/arti-

cle/n/analiz-prichin-avariy-so-vzryvami-prirodnogo-gaza (дата обращения: 20.09.2021).

3. **Achmann S., Hagen G., Kita J., Malkowsky I. M., Kiener Ch., Moos R.** Metal-Organic Frameworks for Sensing Applications in the Gas Phase // Sensors. 2009. N. 9. P. 1574—1589. DOI: 10.3390/s90301574.

4. **Lando A. T., Nakayama H., Shimaoka T.** Application of portable gas detector in point and scanning method to estimate spatial distribution of methane emission in landfill // Waste Management. 2017. Vol. 59. P. 255—266.

5. **Semenistaya T. V., Zubenko N. A.** Fabrication of gas-sensitive tin-containing polyacrylonitrile thin films to create a household carbon monoxide sensor // Journal of Physics: Conference Series. 2018. 1135. 012041.

6. **Полосина В. Е., Семенистая Т. В.** Разработка бытового датчика контроля природного газа // Материалы 5-й Всероссийской конференции и школы для молодых ученых (с международным участием) "Системы обеспечения техносферной безопасности". Таганрог: ЮФУ, 2018. С. 219—220.

7. **Xue D., Wang J., Wang Y., Sun G., Cao J., Bala H., Zhang Z.** Enhanced Methane Sensing Properties of WO_3 Nanosheets with Dominant Exposed (200) Facet via Loading of SnO_2 Nanoparticles // Nanomaterials (Basel). 2019. Vol. N. 9 (3). P. 351.

8. **Bunpanga K., Wisitsoraat A., Tuantranont A., Singkammo S., Phanichphant S., Liewhiran C.** Highly selective and sensitive CH_4 gas sensors based on flame-spray-made Cr-doped SnO_2 particulate films // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 291. P. 177—191.

9. **Nikan E., Khodadadi A. A., Mortazavi Y.** Highly enhanced response and selectivity of electrospun ZnO-doped SnO_2 sensors to ethanol and CO in presence of CH_4 // Sensors and Actuators B: Chemical. 2013. Vol. 184. P. 196—204.

10. **Polosina V. E., Semenistaya T. V.** Development of a household methane sensing device // Abstracts & Schedule international conference "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2019), Hanoi, Vietnam. 2019. P. 258.

T. V. Semenistaya, Ph. D., Associate Professor of the Department of Technosphere Safety and Chemistry, semenistayatv@sfedu.ru,
V. E. Berezhnaya, Master Student of the Department of Technosphere Safety and Chemistry Ph. D., Associate Professor of the Department of Technosphere Safety and Chemistry, semenistayatv@sfedu.ru,
Southern Federal University, Institute of Nanotechnologies, Electronics, and Equipment Engineering, Russia, Taganrog, Russian Federation

Corresponding author:
Tatiana V. Semenistaya, Ph. D., Associate Professor of the Department of Technosphere Safety and Chemistry, Southern Federal University, Institute of Nanotechnologies, Electronics, and Equipment Engineering, Russia, Taganrog, Russian Federation
E-mail: semenistayatv@sfedu.ru

Development of a Methane Detection System by a Household gas Detector

Received on October 12, 2022
Accepted on November 08, 2022

Software has been developed for the correct operation of the air monitoring sensor, which allows real-time information on the concentration of the detected gas in the air. Implemented the ability to notify the user in real time by means of a temporary email address server.

The gas detector model presented in this paper has the following advantages: strength; ease of use, which allows it to be used by a wide range of users; low cost of individual components and the model as a whole; portability, allowing installation in small rooms, ventilation shafts, technical openings or ceilings.

Keywords: *gas detector, gas sensitive polyacrylonitrile tincontaining films, methane, sensor element, microcontroller, circuit diagram*

For citation:
Semenistaya T. V., Berezhnaya V. E. Development of a Methane Detection System by a Household Gas Detector, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika,* 2023, vol. 25, no. 1, pp. 28—33.

DOI: 10.1785/nmst.25.28-33

References

1. **Novosel'skij N. K., Chechura R. E., Latyshenko G. I., Karachjova G. A.** Vnedrenie innovacionnyh tehnologij dlja predotvrashhenija chrezvychajnyh situacij, svjazannyh so vzryvami bytovogo gaza v zhilyh domah, *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki*, 2019, URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-innovatsionnyh-tehnologiy-dlya-predotvrascheniya-chrezvychaynyh-situatsiy-svyazannyh-so-vzryvami-bytovogo-gaza-v-zhilyh (data obrashhenija: 20.09.2021). [Implementation of innovative technologies for the prevention of emergency situations associated with household gas explosions in residential buildings, *Actual problems of aviation and cosmonautics*, 2019] (in Russian).

2. **Chepegin I. V.** Analiz prichin avarij so vzryvami prirodnogo gaza, *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2014, no. 10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-prichin-avariy-so-vzryvami-prirodnogo-gaza (data obrashhenija: 20.09.2021). (Analysis of the causes of accidents with explosions of natural gas, *Bulletin of the Kazan Technological University*.)

3. **Achmann S., Hagen G., Kita J., Malkowsky I. M., Kiener Ch., Moos R.** Metal-Organic Frameworks for Sensing Applications in the Gas Phase, *Sensors*, 2009, no. 9, pp. 1574—1589; DOI: 10.3390/s90301574.

4. **Lando A. T., Nakayama H., Shimaoka T.** Application of portable gas detector in point and scanning method to estimate spatial distribution of methane emission in landfill, *Waste Management*, 2017, vol. 59, pp. 255—266.

5. **Semenistaya T. V., Zubenko N. A.** Fabrication of gas-sensitive tin-containing polyacrylonitrile thin films to create a household carbon monoxide sensor, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, no. 1135, p. 012041.

6. **Polosina V. E., Semenistaja T. V.** Razrabotka bytovogo datchika kontrolja prirodnogo gaza, *Materialy 5-oj Vserossijskoj konferencii i shkoly dlja molodyh uchenyh (s mezhdunarodnym uchastiem) "Sistemy obespechenija tehnosfernoj bezopasnosti"*. Taganrog, JuFU, 2018, pp. 219—220. (Development of a household natural gas control sensor, *Proceedings of the 5th All-Russian Conference and School for Young Scientists (with international participation) "Systems for ensuring technosphere safety")* (in Russian).

7. **Xue D., Wang J., Wang Y., Sun G., Cao J., Bala H., Zhang Z.** Enhanced Methane Sensing Properties of WO_3 Nanosheets with Dominant Exposed (200) Facet via Loading of SnO_2 Nanoparticles, *Nanomaterials* (Basel), 2019, vol. 9 (3), p. 351.

8. **Bunpanga K., Wisitsoraat A., Tuantranont A., Singkammo S., Phanichphant S., Liewhiran C.** Highly selective and sensitive CH4 gas sensors based on flame-spray-made Cr-doped SnO_2 particulate films, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 291, pp. 177—191.

9. **Nikan E., Khodadadi A. A., Mortazavi Y.** Highly enhanced response and selectivity of electrospun ZnO-doped SnO_2 sensors to ethanol and CO in presence of CH_4, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, vol. 184, pp. 196—204.

10. **Polosina V. E., Semenistaya T. V.** Development of a household methane sensing device, *Abstracts adn Schedule international conference "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2019)*, Hanoi, Vietnam, 2019, p. 258.

УДК 662.1: 621.35 DOI: 10.17587/nmst.25.33-41

В. В. Просянюк[1], канд. техн. наук, нач. отдела, e-mail: vvp101250@mail.ru,
И. С. Суворов[1], канд. техн. наук, вед. научн. сотр., e-mail: suvorov_i47@mail.ru,
Б. Ю. Паршиков[2], канд. техн. наук, нач. лаборатории, e-mail: only25@rambler.ru,
Н. В. Прудников[3], д-р техн. наук, гл. научн. сотр., e-mail: mzairan@mzairan.ru
[1] Акционерное общество "Федеральный научно-производственный центр "Научно-исследовательский институт прикладной химии", г. Сергиев Посад, 141313, Российская Федерация,
[2] ЗАО "Московский научно-исследовательский телевизионный институт", г. Москва, 105094, Российская Федерация,
[3] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме российской академии наук", г. Москва, Российская Федерация

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Поступила в редакцию 03.08.2022

Проведены исследования тенденций развития и технического уровня резервных источников тока (РИТ), приводимых в действие нагревом электролита до плавления теплотой, выделяющейся при сгорании пиронагревателей. Рассмотрены РИТ, высокотемпературные гальванические элементы которых выполнены в виде многослойных пиронагревателей, генерирующих ток в режиме горения, а также описаны гибридные источники питания на основе источников тока.

Ключевые слова: *резервный источник тока, энергетические конденсированные системы, высокотемпературный гальванический элемент, гибридный источник питания*

Введение

Резервные химические источники тока, предназначенные для работы в режиме ожидания, занимают особое место в номенклатуре средств автономной электроэнергетики. Их приводят в действие непосредственно перед использованием [1—6]. В неработающих изделиях электролит является диэлектриком, что исключает саморазряд и обеспечивает неизменность характеристик в течение гарантийного срока.

1. Тепловые (термохимические, разогревные) источники тока

Тепловые (термохимические, разогревные) источники тока (ТХИТ) представляют собой батареи элементарных ячеек — высокотемпературных гальванических элементов (ВГЭ), которые содержат, как правило, анод, катод и электролит (сепаратор). Для их задействования (нагрева электролита до плавления и возможности генерирования электрического тока) между металлическими корпусами ВГЭ размещают пиронагреватели (ПН) из малогазовых энергетических конденсированных систем (ЭКС) — патенты RU №№ 2369944, 2393591, 2408113, 2413341, 2448393, 2457586, 2744416; US №№ 5382479, 6475662, 8697271, 8715846, 9419288, 10374213; JP №№ 4165098, 3718938, 6246087; CN №№ 106207213, 108878917, 1093301276. Типовая схема ТХИТ показана на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки).

На рис. 2 в качестве примера показан внешний вид ТХИТ, разработанных фирмами "Sandia National Laboratories" и ОАО "Литий-элемент".

Патенты РФ на конструкции ВГЭ, ТХИТ, рецептуры составов и способы изготовления принадлежат, в основном, таким организациям, как АО "Энергия", РФЯЦ "ВНИИЭФ" и ФГБУН "Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН".

Нагревательные ЭКС для ПН имеют высокую чувствительность к тепловому инициирующему импульсу, а ПН на их основе сгорают в безгазовом режиме, выделяя при этом строго дозированное количество теплоты, минимальный объем газообразных продуктов, образуя компактные шлаки, сохраняющие размеры и форму исходного образца. ПН для первых ТХИТ формовали преимущественно из "пиротехнической бумаги" на основе циркония, бария хромово-кислого и минерального волокнистого связующего (асбест, стеклянное волокно и т. д.). Эти ПН образуют при сгорании значительный объем газовой фазы, при этом уменьшается толщина конденсированных продуктов реакций, что приводит к ослаблению электрических контактов и снижению стабильности характеристик ТХИТ. По этой причине современные ТХИТ приводят в действие ПН на основе тонкодисперсных порошков железа и перхлората калия, которые формуют обычно методом "глухого" прессования (патенты и опубликованные заявки US № 15289099; CN №№ 107978766, 108832150, 109438148, 109546173).

АО "Энергия" разработан способ изготовления ПН для ТХИТ (патент RU № 2450390), включающий сушку и измельчение перхлората калия, сушку тонкодисперсных порошков железа и молибдена, перемешивание в шаровой мельнице компонентов, имеющих средний размер частиц 1,0...2,5 мкм (порошки железа и молибдена), 2,5...5,0 мкм (перхлорат калия), прессование полученного состава в тонкие таблетки давлением 200...300 МПа с выдержкой под давлением в течение 20...30 с. Это обеспечивает плотность 4,6...4,9 г/см^3. Техническим результатом является прочность ПН и увеличение надежности ТХИТ. В патенте RU № 2745745 предложен способ изготовления комплекта плоских элементов ВГЭ разной толщины для ТХИТ прессованием в одном цикле. Новизна технического решения в том, что процесс может быть осуществлен без взвешивания.

Из анализа патентной и научно-технической литературы следует, что анодами современных

а) *б)*

Рис. 2. Внешний вид ТХИТ:
а — ТХИТ фирмы "Sandia National Laboratories"; *б* — ТХИТ ОАО "Литий-элемент"

ТХИТ являются композиционные материалы лития с бором, кремнием и т. д. (патенты и опубликованные заявки RU №№ 2369944, 2395603; CN №№ 108172757, 109449371; US №№ 2016079609, 20211262391, 10340531). Катоды формуют преимущественно из дисульфида железа. Известно по патентам и опубликованным заявкам RU № 2093928; US №№ 5006429, 2016079609; CN №№ 102148352, 106207213, 107611389, 109301276, 109449371, 112563487; GB № 2363898; JP № 5619686 применение в катодных элементах дисульфидов кобальта и титана, фторидов или хлоридов металлов, оксида меди.

Электролитным материалом служат соли лития, обладающие сравнительно низкой температурой плавления и высокой электропроводностью расплавов, а также смеси солей щелочных металлов — эвтектики (патенты RU №№ 2340982, 2399994, 2410799, 2506669, 2607471; опубликованные заявки US 2016079608 и KR 1020170017622). Способы изготовления электролитных композиций для ТХИТ приведены в патентах RU №№ 1840220, 1840266, 2484556, 2506668, 2514193, 2528634, 2530893, 2607471, 2732080; US № 8394520.

Кроме легкоплавких солей электролиты содержат обычно загустители, препятствующие вытеканию расплавов. Для этой цели перспективны тугоплавкие соединения, обладающие свойствами твердых высокотемпературных электролитов. К ним относят растворы замещения, образующиеся в кристаллах при легировании их ионами с меньшей валентностью. Возникающий при этом дефицит заряда компенсируется образованием дефектов противоположного знака. Это могут быть тонкодисперсные порошки тугоплавких полиалюминатов щелочных металлов, например, γ-Al_2O_3 (патент RU № 2528634) или тонкодисперсный порошок γ-$LiAlO_2$ (патент RU № 2732080).

В оксидах циркония, гафния и церия, легированных оксидами двух- и трехвалентных металлов, компенсация заряда примеси осуществляется кислородными вакансиями. Диоксид циркония, стабилизированный оксидами кальция, магния или скандия является диэлектриком при температуре от минус 60 до 200 °С. При температуре ≥500 °С он приобретает ионную (униполярную) проводимость, которая максимальна при ~1000 °С (становится ионным проводником при рабочей температуре РИТ).

Тонкодисперсные порошки упомянутых твердых электролитов, введенные в качестве загустителей, увеличивают ионную проводимость электролитного расплава, снижают внутреннее сопротивление, улучшая электрические характеристики источников тока. Удачное сочетание химических, керамических и электролитических характеристик, а также возможность широкого варьирования свойств упомянутых загустителей свидетельствует о перспективности их применения, а значит, актуальности проводимых исследований [7—8].

Время активации РИТ (выхода на рабочий режим) во многом зависит от скоростей воспламенения и сгорания всех элементов на основе ЭКС. В РФ для зажжения ПН используют ленточные воспламенители, имеющие высокие скорости горения и "жгучесть" продуктов сгорания. Они содержат цирконий, барий хромово-кислый, перхлорат калия, а также покрытые латексом измельченные волокна хризотилового асбеста (патенты RU №№ 2306306, 2326470, 2342352, 2461099, 2545335, 2664915).

Согласно патенту RU № 2448393, для увеличения надежности задействования ленточные воспламенители фиксируют в РИТ стеклотканевой изолентой толщиной 0,12...0,15 мм, пропитанной кремнийорганическим лаком, обеспечивая перекрытие слоев не менее чем на 1/2 ширины изоленты. Зазоры между набором ВГЭ и изолентой по всей высоте ориентируют поток газообразных продуктов и увеличивают скорость горения. Техническим результатом изобретения является уменьшение времени активации источника тока и увеличение стабильности характеристик. Этой же цели служат воспламенительные каналы в наборах ВГЭ (патенты RU №№ 2508580, 2623101, US № 5731102, опубликованная заявка CN № 107293763). Способ изготовления ВГЭ с центральным каналом для ТХИТ приведен, например, в опубликованной заявке CN № 107293763. В ТХИТ, известном по патенту RU № 2543069, по всей площади боковой поверхности набора ВГЭ установлен воспламенительный элемент, а между анодами ВГЭ и ПН размещены тонкие (0,25...0,35 толщины анода) теплоаккумулирующие электропроводные диски. Время активации ТХИТ может быть уменьшено увеличением плотности анодных, катодных и электролитных элементов за счет устранения воздушных прослоек и включений между ними (патенты JP №№ 3-20028, 5-4278, 5-42781).

Представляет интерес патент US № 5731102, в котором указаны наиболее предпочтительные варианты рецептур анода из лития, катода из дисульфида железа и электролита из легкоплавкой смеси хлоридов лития и калия. ПН выполнен из смеси тонкодисперсного порошка металлического лития и политетрафторэтилена (тефлона), взятых в соотношении 60...86 и 14...40 % по массе. В одном из вариантов ВГЭ приведена рецептура элемента, способного функционировать как анод, и как источник теплоты, что позволяет исключить ПН.

Известна тепловая батарея с двумя независимо инициируемыми ПН — источниками теплоты (патент US № 6475662). Второй ПН воспламеняют только при низких температурах для уменьшения

температурного градиента от центра к корпусу, снижения скорости охлаждения и увеличения времени генерирования тока за счет сохранения электролита в расплавленном состоянии. ТХИТ по патенту US № 6818344, приводимый в действе теплотой, выделяющейся при сгорании ПН, отличается тем, что анодный, катодный и электролитный элементы выполнены в виде таблеток с изогнутой поверхностью для увеличения плотности тока. Батарея рекомендована, прежде всего, для задействования и питания малогабаритных изделий, работающих в широком диапазоне рабочих условий.

Увеличение стабильности характеристик ТХИТ в экстремальных условиях (при воздействии ударов, вращения, вибрации и т. д.) достигнуто тем, что набор ВГЭ уплотняют (опрессовывают) в корпусе источника тока давлением 30...40 МПа, при этом измеряют образовавшийся зазор (до крышки), который заполняют комплектом асбестовых прокладок, сжатых тем же давлением. Это позволяет использовать теплоизоляционные свойства асбеста и его упругость (патент RU № 2470416). Способы изготовления ТХИТ известны по патентам JP №№ 2389551 и 3177854.

В патенте RU № 2475897 предложена тепловая изоляция для ТХИТ, получаемая прессованием композиции из тонкодисперсного оксида кремния с площадью удельной поверхности частиц более 250 $м^2/г$, оксида хрома, супертонких кремнеземных волокон и фенолформальдегидной смолы. Этот способ позволяет получать материал с теплопроводностью ниже, чем у "спокойного воздуха", с высокой механической прочностью, не разрушающийся при воздействии ударных нагрузок, обеспечивающий жесткость всей конструкции. Известен способ изготовления гибкой супертонкой тепловой изоляции для ТХИТ осаждением водной суспензии волокнистого хризотилового асбеста с порошком трехвалентного оксида хрома (патент RU № 2633386).

Полнота прямого преобразования химической энергии электродных масс в электрическую энергию характеризует экономичность электрохимических систем, электродных и электролитных материалов, оказывает влияние на себестоимость изделий, является резервом повышения их тактико-технических характеристик. Этот показатель во многом зависит от времени поддержания рабочего диапазона температур, который довольно узок, от рецептуры композиций, конструктивных особенностей и условий эксплуатации изделий, плотности тока, температуры плавления электролита. Большое значение имеет соотношение электродных и электролитных масс. Избыток любого из активных компонентов является балластом. Снижение объема газообразных продуктов сгорания необходимо, так как они могут химически взаимодействовать с активными электродными материалами, приводя к их нецелевому расходованию, создают избыточное давление, что "утяжеляет" герметичный корпус и ухудшает удельные характеристики. Эту задачу решают, прежде всего, применением компонентов высокой чистоты, их модифицированием и удалением воды из всех элементов и материалов, контактирующих с ВГЭ. Конструкции источников тока обеспечивают условия для наиболее эффективного протекания токообразующих реакций, передачи энергии потребителю с минимальными потерями, равномерной работы всех ячеек, механической прочности при транспортировке, эксплуатации и т. д.

Результаты анализа выявленных технических решений позволяют утверждать, что наиболее актуальными направлениями совершенствования ТХИТ являются стабилизация электрических характеристик, минимизация времени выхода на режим, улучшение удельных характеристик и увеличение длительности работы за счет:

— оптимизации конструкций ВГЭ и их батарей, применения новых перспективных материалов и компонентов;

— совершенствования технологии изготовления ВГЭ и их батарей;

— обеспечения оптимального теплового режима батарей в процессе работы за счет применения эффективной теплоизоляции, аккумуляторов теплоты, не включенных в электрическую цепь ВГЭ и т. д.

Применение традиционных компонентов в ультра- и нанодисперсном состоянии позволяет получить качественно новые (в ряде случаев уникальные) характеристики изделий. Это связано с высокой химической активностью нанопорошков, природа которой многогранна и не сводится только к поверхностной энергии. Особенностью их структуры является смешанная электронно-ионная проводимость, высокая подвижность ионов, очень низкая насыпная плотность и т.д. Как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения развитие этой области знаний относится к ключевым направлениям современных исследований. В то же время требуют решения вопросы экологичности, токсичности, пожароопасности этих материалов, которые адсорбируют большое количество газов, несут на своих поверхностях разнородные по знаку заряды и склонны к агломерации (особенно окислители), удельная поверхность материалов при этом резко уменьшается, теряются первоначальные свойства. Металлические порошки подвержены окислению при хранении, являются пирофорными при нормальных условиях (возможно самопроизвольное протекание химических реакций с воздухом, водой, конструкционными материалами и т. д.).

Введение ультра- и нанодисперсных порошков в композиции различного назначения для оптимизации характеристик изделий в настоящее время является сложной задачей. Основная трудность в том, что при размерах частиц менее 1 мкм резко возрастает прочность структур, самопроизвольно возникающих в дисперсных системах, что затрудняет равномерное распределение добавок в объеме по обычной технологии [9—15].

Результаты патентно-информационного поиска указывают на актуальность изучения возможности применения наноструктурированных компонентов в источниках электрического тока [16, 17] (патенты US №№ 7227235, 7744835, опубликованная заявка CN № 109065867).

2. Источники тока на основе ВГЭ из разнородных малогазовых энергетических конденсированных систем

Резервные источники тока нового типа, в которых ВГЭ представляют собой тонкие (~1 мм) многослойные ПН из разнородных малогазовых ЭКС и электролитного материала, не имеют зарубежных аналогов, характеризуются простотой конструкции, высокой надежностью и дешевизной, их разрабатывают и выпускают только СКТБ "Технолог" (Санкт-Петербург, до 2000 г.) и АО "ФНПЦ "НИИ прикладной химии" (Сергиев Посад). К принципиальным достоинствам батарей ВГЭ из ЭКС относятся универсальность по способу их задействования (воспламенителями всех типов, продуктами сгорания, нагретой поверхностью и т. п.), отсутствие необходимости регламентных проверок и обслуживания в течение гарантийного срока (≥25 лет), способность одновременной работы в огневых и электрических цепях (преобразование огневых импульсов в электрические и наоборот). Из резервных источников тока только они имеют время активации от 50 мс при ±60 °С, что позволяет использовать их в быстродействующих автономных системах совместно с электрическими и электромеханическими устройствами, элементами электроники и т. д. Технические характеристики этих батарей не зависят от пространственной ориентации, механических воздействий, разрежения, перепада температуры и т. д. [18—20].

На рис. 3 и 4 в качестве примера показаны типовые конструктивные схемы ВГЭ и их батарей

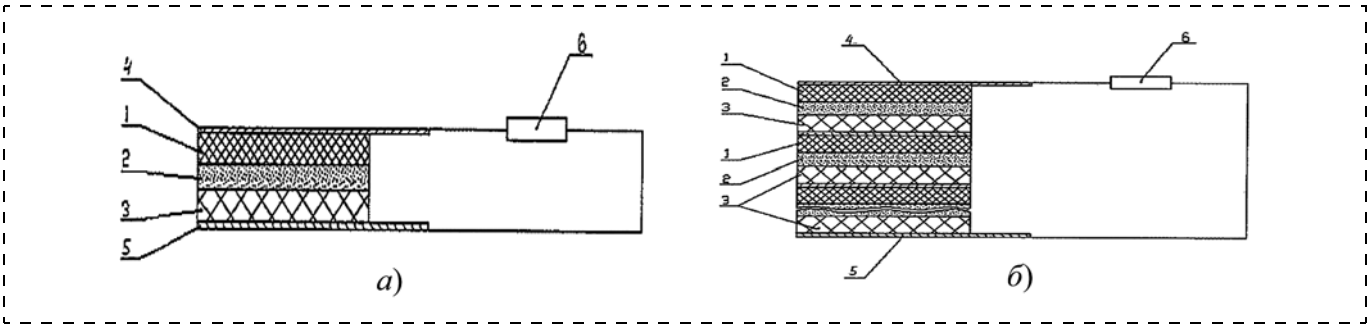


Рис. 3. Типовые схемы ВГЭ (*а*) и их батарей (*б*):
1 — анод; *2* — сепаратор; *3* — катод; *4* — анодный токоотвод; *5* — катодный токоотвод; *6* — нагрузка

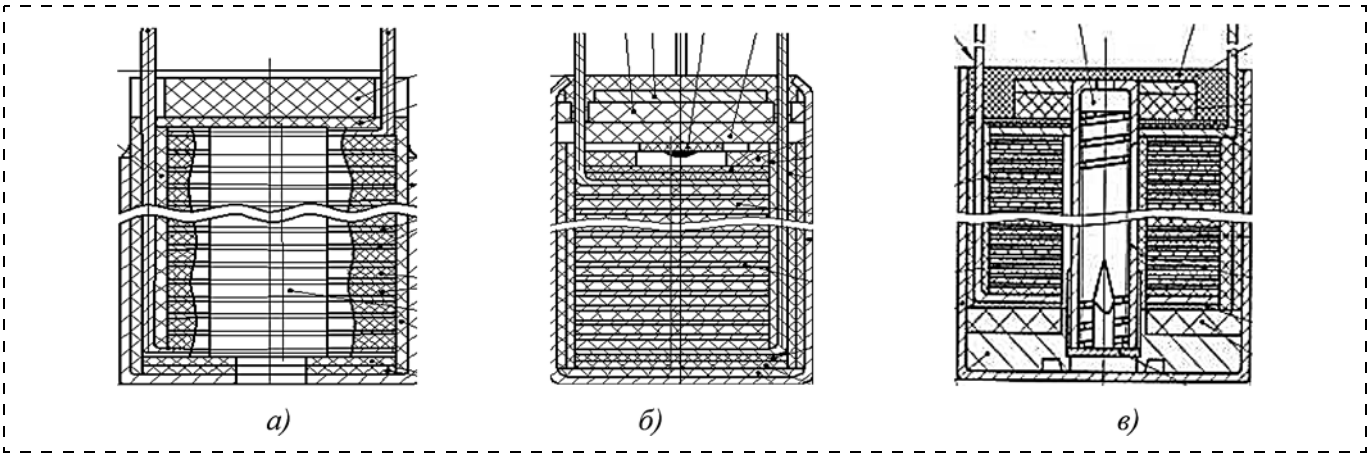


Рис. 4. Типовые конструктивные схемы источников тока и способы задействования:
а — огневым импульсом; *б* — встроенным электровоспламенителем; *в* — встроенным капсюлем

Рис. 5. Внешний вид батарей ВГЭ

с разными способами задействования. Электроды ВГЭ выполнены в виде тонких разнородных пластин из ЭКС, контактирующих между собой непосредственно или через сепаратор, выполненный из асбеста, диспергированного в электролитном материале (патенты RU №№ 2095745, 2301479, 2364989, 2519274), или из ЭКС (патенты RU №№ 2137263, 2468478 и 2525843). Соотношение площадей торцевых поверхностей сепаратора из ЭКС и каждого из электродов может составлять от 1,03 до 1,4. Между сепаратором и электродами размещают электролитные пластины (патент RU № 2260228). ВГЭ, известные по патентам RU №№ 2088558 и 2320053, являются двухслойными ПН, анод и катод контактируют друг с другом непосредственно (без зазора и сепаратора).

На рис. 4 показаны типовые конструктивные схемы батарей ВГЭ с основными способами задействования.

На рис. 5 в качестве примера приведен внешний вид батарей ВГЭ, разработанных в АО "ФНПЦ "НИИ прикладной химии".

Батареи ВГЭ из ЭКС и ТХИТ функционируют следующим образом. Тепловой (огневой) инициирующий импульс зажигает практически одновременно воспламенительные элементы, ПН и композиции анода, сепаратора и катода на основе ЭКС во всех ВГЭ. Аналогично происходит зажжение ПН в ТХИТ. Теплота, выделяющаяся при их сгорании, обеспечивает плавление электролитного материала и протекание электрохимических процессов (генерирование электрического тока). Движение заряженных частиц (электронов в металле и ионов в электролитном расплаве) в каждом ВГЭ обусловлено электрохимическими процессами окисления горючего в аноде и восстановления окислителя в катоде с участием электролитного расплава, имеющего ионную проводимость.

Электроды, сепараторы, нагревательные и воспламенительные элементы ВГЭ получают вакуумным осаждением водной взвеси тонкодисперсных компонентов (патенты RU №№ 2526857 и 2664915). Этот способ позволяет формовать изделия с отношением максимального геометрического размера к их толщине ≥100 при высокой чувствительности к тепловому инициирующему импульсу, что обеспечивает надежность воспламенения и сгорания ВГЭ и минимальное время активации источников электрического тока.

3. Гибридные источники питания на основе источников тока и суперконденсаторов

Каждый из рассмотренных источников электрического тока имеет свою область применения, но ни один из них не соответствует в полном объеме современным и перспективным требованиям. Появление принципиально новых образцов в обозримом будущем маловероятно, поэтому в нашей стране и за рубежом создают гибридные (комбинированные) источники (блоки) питания (ГИП).

Например, резервные ГИП на основе ТХИТ и батарей ВГЭ генерируют ток силой несколько ампер в течение 10...20 мин. Подтверждена возможность гарантированного одноразового питания слаботочных потребителей в течение 10...30 мин гибридными источниками, состоящими из суперконденсаторов (СК) и батарей ВГЭ на основе ЭКС (время полной зарядки СК 2...5 с при температуре окружающей среды ±60 °С). Упомянутые ГИП универсальны по способу задействования, энергонезависимы, характеризуются широким спектром функциональных возможностей. Влияние температуры на их характеристики незначительно [21—23].

Теоретический и практический интерес представляют ГИП, включающие СК и солнечные батареи, известные по патентам (опубликованным заявкам): JP №№ 1999126280 от 11.05.1999, 2007128667 от 24.05.2007, 2008228243 от 05.09.2008; CN №№ 101986501 от 16.03.2011, 102751790 от 24.10.2012, 102882221 от 31.12.2014, 108336806 от 27.07.2018, 110171298 от 27.08.2019, 110277826 от 24.09.2019, 110571908 от 13.12.2019, 110797963 от 11.06.2021, 113571341 от 29.10.2021; KR №№ 1018896990000 от 20.08.2018, 1019792320000 от 16.05.2019, 1020100109104 от 08.10.2010, 1020130039031 от 19.04.2013, 1020140033630 от 19.03.2014, 1020180059006 от 04.06.2018, 1020180077558 от 09.07.2018; WO/2013/191797 от 27.12.2013; US №№ 20100084006 от 08.04.2010, 10879013 от 29.12.2020, 20220029581 от 27.01.2022; GB № 2492845 от 31.08.2011. Эти технические решения обеспечивают возможность накопления электроэнергии до рабочего уровня, питание потребителей, сохранение напряжения на клеммах СК в течение гарантийного срока.

Блоки управления (ГИП) на основе топливных элементов или солнечных батарей с вторичными источниками тока способны автоматически прекращать зарядку при достижении заданного напряжения, или отключать устройства от нагрузки при недопустимой глубине разряда аккумуляторов (евразийский патент № 13286 от 30.04.2010).

ГИП, состоящие из топливных элементов и СК, обеспечивают потребителей электроэнергией в необходимом количестве. Они известны по патентам (опубликованным заявкам) CN № 109649624 от 19.04.2019; JP №№ 2009118727 от 28.05.2009, 5234386 от 05.04.2013; KR № 1006868040000 от 26.02.2007, 1009926540000 от 05.11.2010, 1013636270000 от 10.02.2014, 1018269920000 от 07.02.2018; US №№ 8090487 от 03.01.2012, 8828614 от 09.09.2014, 9725011 от 08.08.2017.

Системы управления (ГИП), известные по патентам (опубликованным заявкам) GB № 2570112 от 17.07.2019; CN №№ 103531854 от 22.01.2014, 106300556 от 04.01.2017, 106655440 от 11.06.2019, 107910921 от 13.04.2018, 108987118 от 11.12.2018, 109217458 от 15.01.2019, 109510319 от 22.03.2019, 109617246 от 12.04.2019, 109690901 от 26.04.2019, 110797963 от 11.06.2021; KR №№ 1012481150000 от 27.03.2013, 1018279610000 от 13.02.2018, 1018407480000 от 21.03.2018, 1018631380000 от 31.05.2018, 1018930630000 от 30.08.2018, 102111412 от 11.05.2020, 102125057 от 19.06.2020, 102144697 от 10.08.2020, 102196639 от 30.12.2020; US №№ 7186473 от 06.03.2007, 20110089899 от 21.04.2011, 20170004930 от 05.01.2017, 10931136 от 01.06.2017, 20180076644 от 15.03.2018, 20180372054 от 27.12.2018, 10700547 от 30.06.2020, 20200335992 от 22.10.2020, 20210218092 от 15.07.2021, 20210249883 от 12.08.2021, 10923946 от 16.02.2021; WO/2018/006422 от 11.01.2018, WO/2018/200659 от 01.11.2018, способны подключать и отключать потребителей электроэнергии, управлять температурными режимами устройств и т. д., благодаря тому, что химические источники тока могут заряжать и перезаряжать накопители электрической энергии в нужный момент.

ГИП на основе СК и вторичных источников тока, известные по патентам (опубликованным заявкам) RU № 2484565; KR № 1020030014988 от 20.02.2003; US №№ 20030035982 от 20.02.2003, 20090033286 от 05.02.2009; JP № 2012191838 от 04.10.2012 имеют улучшенные технические характеристики.

ГИП, известные по патентам (опубликованным заявкам) US №№ 20200388739 от 10.12.2020, 10886329 от 05.01.2021; WO/2019/116039 от 20.06.2019; GB № 2531855 от 04.05.2016, содержат термоэлектрические модули, источники теплоты и СК для обеспечения потребителей электроэнергией.

Заключение

На основании анализа патентных материалов и научно-технической литературы установлено, что актуальными направлениями совершенствования РИТ являются стабилизация электрических параметров, минимизация времени выхода на режим, улучшение удельных характеристик, увеличение длительности работы за счет разработки и совершенствования рецептур электродных и электролитных элементов, конструктивных схем ВГЭ и их батарей, способов их изготовления и задействования.

Для обеспечения заданных технических характеристик оптимизируют рабочую температуру введением в конструкцию источников тока тепловых аккумуляторов и дополнительных ВГЭ, не включенных в электрическую цепь. Для поглощения газов, выделяющихся при горении ПН, применяют металлы-геттеры.

Работы по созданию и совершенствованию ТХИТ и ГИП проводят, в основном, в Китае (CN), США (US), Республике Корея (KR), России (RU), Японии (JP) и Великобритании (GB).

Разработанные в России РИТ с ВГЭ из разнородных ЭКС и ГИП на их основе не имеют зарубежных аналогов и выпускаются серийно. Для них характерны простота конструкции, надежность работы и дешевизна. Они универсальны по способу задействования, имеют минимальное время активации (от 50 мс) при температуре ±60 °С, не требуют регламентных проверок и обслуживания в течение гарантийного срока (≥25 лет), способны одновременно работать в огневых и электрических цепях, преобразуя огневые импульсы в электрические и наоборот.

Рассмотренные РИТ предназначены прежде всего для задействования и питания приборов и устройств, работающих в экстремальных условиях, поэтому данное направление исследования актуально.

Ни один из известных РИТ в полной мере не соответствует современным и перспективным требованиям. По этой причине задачи автономного электропитания объектов решают также применением ГИП с широким спектром функциональных возможностей.

Список литературы

1. **Афанасьев А. С., Болдырев М. А., Халютин С. П.** Анализ номенклатуры химических источников тока, применяемой в объектах специального назначения // Электропитание. 2018. № 1. С. 40—49.

2. **80 лет АО "Энергия":** разработка и производство химических источников тока. Елец: Изд. АО "Энергия", 2021. 28 с.

3. **Вагонов С. Н., Просянюк В. В., Суворов И. С.** и др. Резервные источники тока на основе энергетических кон-

денсированных систем. Итоги науки. Вып. 21. Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам новых технологий (гл. 5). М.: РАН. 2015. С. 94—117.

4. **Bagotskii V. S., Skundin A. M., Volfkovich Yu. M.** Electrochemical power sources: batteries, fuel cells, and supercapacitors. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 375 p.

5. **Koch E.-C.** Special materials in pyrotechnics VII: Pyrotechnics used in thermal batteries // Defence Technology. 2019. Vol. 15. P. 254—263.

6. **Payne Ju. L., Giagloglou K., Carins G. M.** et al. In-situ Studies of High Temperature Thermal Batteries: a Perspective // Frontiers in Energy Research. 2018. Vol. 6. P. 1—6.

7. **Демиденко Л. М., Полонский Ю. А.** Электропроводность огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1985. 120 с.

8. **Бронин Д. И.** Кинетика электродных процессов в электрохимических системах с твердыми оксидными электролитами. Автореф. дисс. ... д. х. н. — Екатеринбург: ИВТЭ УрО РАН. 2007. 42 с.

9. **Рыжонков Д. И., Левина В. В., Дзидзигури Э. Л.** Наноматериалы. М.: Бином, 2019. 365 с.

10. **Годымчук А. Ю., Савельев Г. Г., Зыкова А. П.** Экология наноматериалов. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2017. 272 с.

11. **Ковалева Н. Ю., Раевская Е. Г., Рощин А. В.** Проблемы безопасности наноматериалов: нанобезопасность, нанотоксикология, наноинформатика // Химическая безопасность. 2017. Т. 1, № 2. С. 44—87. DOI: 10.25514/CHS.2017.2.10982.

12. **Моргалев Ю. Н., Хоч Н. С., Моргалева Т. Г.** Анализ безопасности нанопродукции для здоровья человека с позиций экотоксикологии: проблемы и перспективы // Нанотехника. 2010. № 4 (24). С. 74—79.

13. **Мелихов И. В., Рудин В. Н.** Критерий экологической безопасности производства и использования нанодисперсных веществ // Нанотехника. 2010. № 4 (24). С. 66—69.

14. **Путин С. Б., Козлова Н. П.** Подходы к безопасному использованию новых наноматериалов // Нанотехнологии. Экология. Производство. 2011. № 2 (9). С. 96—97.

15. **Васюкова И. А., Захарова О. В., Чайка В. В.** и др. Токсическое действие наноматериалов на основе металлов на представителей морских экосистем // Российские нанотехнологии. 2021. Т. 16. № 2. С. 175—194. DOI: 10.1134/S1992722321020175.

16. **Емцев В. В., Гришин С. В., Максимов Д. И.** и др. Наноматериалы в тепловых резервных источниках тока // Вестник ТГТУ. 2021. Т. 27, № 1. С. 149—156. DOI: 10.17277/vestnik. 2021.01.pp.149-156.

17. **Скундин А. М., Брылев О. А.** Наноматериалы в современных источниках тока. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. 56 с.

18. **Просянюк В. В., Суворов И. С., Прудников Н. В.** О прямом преобразовании химической энергии энергетических конденсированных систем в электрическую в режиме горения // Рос. хим. ж. (ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2021. Т. 65, № 3. С. 67—71. DOI: 10.6060/rcj/2021653.9.

19. **Просянюк В. В. Суворов И. С. Паршиков Б. Ю., Прудников Н. В.** К вопросу о миниатюрных источниках тока на основе энергетических конденсированных систем // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 4. С. 220—227. DOI: 10.17587/nmst.22.220-227.

20. **Просянюк В. В., Прудников Н. В., Суворов И. С., Паршиков Б. Ю., Дюбанов М. В.** О высокотемпературных гальванических элементах резервных источников тока на основе энергетических конденсированных систем // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 3. С. 162—168. DOI: 10.17587/nmst.23.162-168.

21. **Вагонов С. Н., Просянюк В. В., Суворов И. С.** Многофункциональные резервные гибридные источники питания. Итоги науки. Вып. 30. Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам новых технологий (гл. 1). М.: РАН. 2017. С. 3—24.

22. **Суворов И. С., Просянюк В. В., Гильберт С. В., Егоренков В. М.** К вопросу об автономных гибридных источниках питания на основе суперконденсаторов для работы в экстремальных условиях // Технологии и материалы для экстремальных условий. Материалы 12-й Всероссийской научной конференции. М.: МЦАИ РАН. 2017. С. 67—73.

23. **Просянюк В. В., Вагонов С. Н., Суворов И. С., Гильберт С. В.** К вопросу о создании резервных гибридных источников питания для использования в экстремальных условиях Арктики // Технологии и материалы для экстремальных условий. Материалы 13-й Всероссийской научной конференции. М.: МЦАИ РАН. 2018. С. 106—111.

V. V. Prosyanyuk, Ph. D., Head of Department, vvp101250@mail.ru,
I. S. Suvorov, Ph. D., Leading Researcher, suvorov_i47@mail.ru
Joint Stock Company Federal Research and Production Center Scientific Research Institute of Applied Chemistry, Sergiev Posad, Moscow Region, 141313, Russian Federation,
N. V. Prudnikov, D. Sc., Chief Researcher, e-mail: mzairan@mzairan.ru
Federal State Budgetary Institution of Science Interdepartmental Center for Analytical Research in the Field of Physics, Chemistry and Biology under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation,
B. Yu. Parshikov, Ph. D., Head of the Laboratory, e-mail: only25@rambler.ru,
Moscow Research Television Institute, Closed Joint-Stock Company, Moscow, 105094, Russian Federation

Corresponding author:
Prudnikov Nikolay V., D. Sc., Chief Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science Interdepartmental Center for Analytical Research in the Field of Physics, Chemistry and Biology under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russian Federation
E-mail: mzairan@mzairan.ru

On the Issue of Development Trends and the Technical Level of Backup Current Sources Based on Energy Condensed Systems

Received on August 03, 2022
Accepted on September 02, 2022

Studies of trends in the development and technical level of standby current sources (SCS), powered by heating the electrolyte to melting by heat released during the combustion of pyro heaters (PH), SCS, high-temperature galvanic cells (HTGC) which are made in the form of multilayer PH and generate current in combustion mode, as well as hybrid power sources (HPS).

Keywords: *standby current source, energy condensed systems, high-temperature galvanic cell, hybrid power supply*

For citation:
Prosyanyuk V. V., Suvorov I. S., Prudnikov N. V., Parshikov B. Yu. On the Issue of Development Trends and the Technical Level of Backup Current Sources Based on Energy Condensed Systems, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika,* 2023, vol. 25, no. 1, pp. 33—41.

DOI: 10.17587/nmst.25.33-41

References

1. **Afanas'ev A. S., Boldyrev M. A., Halyutin S. P.** Analiz nomenklatury himicheskih istochnikov toka, primenyaemoj v ob'ektah special'nogo naznacheniya, *Elektropitanie*, 2018, no. 1, pp. 40—49 (in Russian).

2. **80 let AO "Energiya":** razrabotka i proizvodstvo himicheskih istochnikov toka. Elec, AO "Energiya", 2021, 28 p. (in Russian).

3. **Vagonov S. N., Prosyanyuk V. V., Suvorov I. S.** et al. Rezervnye istochniki toka na osnove energeticheskih kondensirovannyh sistem. Itogi nauki. *Izbrannye trudy Vserossijskoj konferencii po problemam novyh tekhnologij*, Issue 21, glava 5. Moscow, RAN, 2015, pp. 94—117 (in Russian).

4. **Bagotskii V. S., Skundin A. M., Volfkovich Yu. M.** Electrochemical power sources: batteries, fuel cells, and supercapacitors. New Jersey, John Wiley & Sons, 2015, 375 p.

5. **Koch E.-C.** Special materials in pyrotechnics VII: Pyrotechnics used in thermal batteries, *Defence Technology*, 2019, vol. 15, pp. 254—263.

6. **Payne Ju. L., Giagloglou K., Carins G. M.** et al. In-situ Studies of High Temperature Thermal Batteries: a Perspective, *Frontiers in Energy Research*, 2018, vol. 6, pp. 1—6.

7. **Demidenko L. M., Polonskij Yu. A.** Elektroprovodnost' ogneupornyh materialov, Moscow, Metallurgiya, 1985, 120 p. (in Russian).

8. **Bronin D. I.** Kinetika elektrodnyh processov v elektrohimicheskih sistemah s tverdymi oksidnymi elektrolitami. Avtoref. diss. ... d. h. n. — Ekaterinburg: IVTE UrO RAN, 2007, 42 p.

9. **Ryzhonkov D. I., Lyovina V. V., Dzidziguri E. L.** Nanomaterialy. Moscow, Binom, 2019, 365 p. (in Russian).

10. **Godymchuk A. Yu., Savel'ev G. G., Zykova A. P.** Ekologiya nanomaterialov. Moscow, Binom. Laboratoriya znanij, 2017, 272 p. (in Russian).

11. **Kovaleva N. Yu., Raevskaya E. G., Roshchin A. V.** Problemy bezopasnosti nanomaterialov: nanobezopasnost', nanotoksikologiya, nanoinformatika, *Himicheskaya bezopasnost'*, 2017, vol. 1, no. 2, pp. 44—87. DOI: 10.25514/CHS.2017.2.10982 (in Russian).

12. **Morgalev Yu. N., Hoch N. S., Morgaleva T. G.** Analiz bezopasnosti nanoprodukcii dlya zdorov'ya cheloveka s pozicij ekotoksikologii: problemy i perspektivy, *Nanotekhnika*, 2010, no. 4 (24), pp. 74—79 (in Russian).

13. **Melihov I. V., Rudin V. N.** Kriterij ekologicheskoj bezopasnosti proizvodstva i ispol'zovaniya nanodispersnyh veshchestv // *Nanotekhnika*. 2010. № 4 (24). S. 66—69 (in Russian).

14. **Putin S. B., Kozlova N. P.** Podhody k bezopasnomu ispol'zovaniyu novyh nanomaterialov, *Nanotekhnologii. Ekologiya. Proizvodstvo*, 2011, no. 2 (9), pp. 96—97 (in Russian).

15. **Vasyukova I. A., Zaharova O. V., Chajka V. V.** et al. Toksicheskoe dejstvie nanomaterialov na osnove metallov na predstavitelej morskih ekosistem, *Rossijskie nanotekhnologii*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 175—194. DOI: 10.1134/S1992722321020175 (in Russian).

16. **Emcev V. V., Grishin S. V., Maksimov D. I.** et al. Nanomaterialy v teplovyh rezervnyh istochnikah toka, *Vestnik TGTU*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 149—156. DOI: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.149-156 (in Russian).

17. **Skundin A. M., Brylev O. A.** Nanomaterialy v sovremennyh istochnikah toka. M.: MGU im. M. V. Lomonosova. 2011. 56 p. (in Russian).

18. **Prosyanyuk V. V., Suvorov I. S., Prudnikov N. V.** O pryamom preobrazovanii himicheskoj energii energeticheskih kondensirovannyh sistem v elektricheskuyu v rezhime goreniya, *Ros. him. zh.* (zh. Ros. him. ob-va im. D. I. Mendeleeva), 2021, vol. 65, no. 3, pp. 67—71. DOI: 10.6060/rcj/2021653.9 (in Russian).

19. **Prosyanyuk V. V. Suvorov I. S. Parshikov B. Yu., Prudnikov N. V.** K voprosu o miniatyurnyh istochnikah toka na osnove energeticheskih kondensirovannyh sistem, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 220—227. DOI: 10.17587/nmst.22.220-227 (in Russian).

20. **Prosyanyuk V. V., Prudnikov N. V., Suvorov I. S., Parshikov B. Yu., Dyubanov M. V.** O vysokotemperaturnyh gal'vanicheskih elementah rezervnyh istochnikov toka na osnove energeticheskih kondensirovannyh sistem, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 162—168. DOI: 10.17587/nmst.23.162-168 (in Russian).

21. V**agonov S. N., Prosyanyuk V. V., Suvorov I. S.** Mnogofunkcional'nye rezervnye gibridnye istochniki pitaniya. Itogi nauki. Izbrannye trudy Vserossijskoj konferencii po problemam novyh tekhnologij Issue 30, glava 1. Moscow, RAN, 2017, pp. 3—24 (in Russian).

22. **Suvorov I. S., Prosyanyuk V. V., Gil'bert S. V., Egorenkov V. M.** K voprosu ob avtonomnyh gibridnyh istochnikah pitaniya na osnove superkondensatorov dlya raboty v ekstremal'nyh usloviyah, *Tekhnologii i materialy dlya ekstremal'nyh uslovij. Materialy 12 Vserossijskoj nauchnoj konferencii.* Moscow, MCAI RAN, 2017, pp. 67—73 (in Russian).

23. **Prosyanyuk V. V., Vagonov S. N., Suvorov I. S., Gil'bert S. V.** K voprosu o sozdanii rezervnyh gibridnyh istochnikov pitaniya dlya ispol'zovaniya v ekstremal'nyh usloviyah Arktiki, *Tekhnologii i materialy dlya ekstremal'nyh uslovij. Materialy 13 Vserossijskoj nauchnoj konferencii.* Moscow, MCAI RAN, 2018, pp. 106—111 (in Russian).

УДК 621.382+612+159.922+004.8 DOI: 10.17587/nmst.25.42-48

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

ВОЗМОЖНА ЛИ ИСКУССТВЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СОЗНАНИЯ?

Поступила в редакцию 26.09.2022

Рассмотрены три выделенных возможных направления искусственной реализации сознания: материалистическое; идеалистическое; гибридное. В результате проведенного анализа этих направлений сформулирована гипотеза о возможности искусственной реализации сознания, но приближенно, не в полном объеме.

Ключевые слова: *мозг, сознание, наноэлектроника, математическое моделирование, искусственный интеллект*

Введение

С точки зрения автора, "интеллект" и "сознание" являются трудноформулируемыми терминами (понятиями) [1]. Действительно, в литературе можно встретить много различных более или менее удачных их определений. Однако для дальнейшего эти понятия нам все же принципиально важны. Наиболее удачными считаю следующие определения из двух блестящих учебников. "Интеллект — способность к целенаправленному адаптивному поведению, в том числе умение извлекать пользу из опыта, решать задачи и логически рассуждать" [2]. "Внутренний поток субъективных переживаний, непосредственно присутствующий в нас и постоянно обнаруживающий себя нам, и есть сознание" [3]. Нетрудно заметить, что это разные понятия, хотя некоторые авторы их не разделяют (см., например, [4]).

Мною отмечалось, что в биологическом интеллекте можно выделить много уровней [1], так как трудно себе представить, что животные, по крайней мере некоторые, не обладают интеллектом. Отмечу, что эти интеллекты, конечно же, отличаются от интеллекта человеческого уровня, для которого и характерно наличие сознания.

Вопрос о сознании гораздо сложнее. Так, согласно "Кембриджской декларации о сознании" 2012 года "множество данных свидетельствуют о том, что люди не уникальны в обладании неврологическими субстратами, которые формируют сознание" [5]. Важно подчеркнуть, что в этой декларации, принятой известными учеными, не утверждается, что у некоторых животных есть сознание, т. е. вопрос остается открытым. С одной стороны, многочисленные факты (см., например, [6]) свидетельствуют о том, что некоторые животные, судя по всему, обладают некоторой формой отражения действительности подобной сознанию. А с другой стороны, для сознания человеческого уровня принципиально важно наличие языка [7], позволяющего оперирование абстракциями достаточно высокого уровня.

В данной работе речь пойдет о возможности искусственной реализации именно сознания человеческого уровня, т. е. наиболее сложном вопросе искусственного интеллекта (ИИ). Автор считает, что *без понимания того, что есть "сознание человека", как оно работает, трудно всерьез говорить о его искусственной реализации*. В моих работах этот вопрос рассматривался неоднократно, и наиболее детально в статьях [8—10]. В связи с этим, говоря метафорически, чтобы "не блуждать по потемкам", чем, с точки зрения автора, является сознание человека будет кратко изложено далее.

Подходы к описанию сознания

Можно ли с помощью науки описать сознание человека? В литературе выделяются четыре различных подхода к этой проблеме [11]:

"А. Всякое мышление есть просто некоторый вычислительный процесс; в частности, чувство осознанного восприятия также возникает в результате осуществления соответствующих вычислительных операций.

B. Сознание является лишь одной из характерных особенностей физической деятельности мозга. Как и любую другую физическую деятельность, сознание можно моделировать вычислительными операциями, но такое моделирование не является, строго говоря, самим сознанием.

C. Сознание вызывается определенными физическими действиями мозга, однако эти действия принципиально нельзя вычислительно моделировать правильным образом;

D. Сознание не может быть объяснено с использованием каких-либо физических, вычислительных или других научных методов или понятий".

В работах [12, 13] отмечалось, что позиция автора ближе к подходу B (см. далее).

О сознании написано колоссальное число работ (хороший аналитический обзор дан в учебнике [3]), однако общий вердикт можно выразить кратко: сознание — это тайна!

Сознание человека

Методологической основой для рассмотрения автором сознания человека являлись предложенные ранее полная электронная интерпретация функционирования мозга и комплексный иерархический подход его исследования, основанный на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами, детально описанными в работах [12—17]. Поэтому здесь выделю лишь наиболее важные моменты.

Считается, что доминирующее влияние на функционирование мозга оказывают электрические процессы (*гипотеза 1*). Это означает, что обработка информации в мозге идет в основном на уровне электрических процессов. Химические процессы обеспечивают прежде всего питание нейронных цепей мозга, а также их модификацию. Так как ключевыми (активными) элементами в электрических (нейронных) цепях мозга являются ионные каналы, ионные насосы и другие каналы — сложные наноэлектромеханические системы (НЭМС), то мозг был интерпретирован как объект органической гибридной наноэлектроники. Оцениваемый автором уровень интеграции мозга лежит в диапазоне $10^{17}...10^{21}$ активных элементов.

Функционирование мозга может быть в принципе описано с высокой степенью точности (строгое описание) с применением формализма квантовой механики на современном уровне ее развития (*гипотеза 2*). Это гипотеза о достаточности квантовой механики.

К сожалению, строгое математическое описание работы мозга с помощью квантовой механики относится к труднорешаемым задачам класса NP (*гипотеза 3*). Это означает, что даже строгое, не говоря уже о точном, моделирование мозга на уровне квантовой механики невозможно сейчас и в обозримом будущем. Это означает, что точное моделирование сознания невозможно в принципе [1, 8, 12].

Предложенная теория сознания достаточно подробно описана в статьях [8—10], поэтому здесь выделю лишь некоторые, наиболее важные моменты.

Так, кроме отмеченного фантастического уровня интеграции, для усложнения анализа сознания отмечу важность следующих наиболее серьезных факторов.

Хотя сознание в соответствии с принятой идеей интернализма является продуктом мозга, на сознание бесспорно оказывают влияние другие составляющие нервной системы, тело и окружающая среда, так как это влияние может быть существенным.

Мозг является очень сложной динамической локально-распределенной системой, а в работе сознания могут участвовать многие его взаимодействующие области.

Сознательная деятельность определяется всем комплексом физико-химических процессов, протекающих в мозге человека при ее обеспечении. Чтобы попытаться распутать этот очень "запутанный клубок" процессов, и была предложена полная электронная интерпретация его функционирования.

Каким образом можно осуществлять взаимодействие такого грандиозного числа существенно нелинейных активных элементов, причем при обеспечении многочисленных функций, происходящих в параллель? Единственная возможность, с точки зрения автора, — синхронизация динамических взаимодействий электрических (нейронных) цепей в различных областях мозга. При этом, учитывая нелинейность электрических цепей, должны быть важны не только фазовые, но также частотные и амплитудные характеристики электрических сигналов. Замечу, что именно амплитуда сигнала в основном и определяет энергетические траты, что представляет для анализа сознания особую важность.

В психологии выделяют две системы мышления [18]: система 1 (автоматическая система, функционирует на подсознательном уровне) и система 2 (произвольная система, функционирует с участием осознания). Учитывая высочайшую степень сложности мозга, пойдем "сверху-вниз", т. е. по пути большей детализации.

Проведенный анализ позволил автору представить мыслительную деятельность в целом, происходящей по "спирали". В частности, один из витков спирали работы автоматической системы (системы 1) показан схематично на рис. 1. Сначала идет планирование (моделирование или прогноз) ситуации, а затем — действие. Процесс может продолжаться и далее. Работа произвольной системы (системы 2) более разнообразна и сложна. Не-

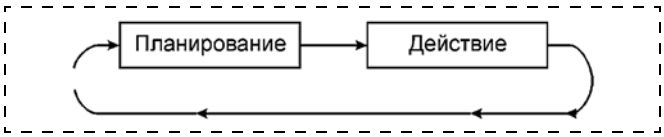


Рис. 1. Виток "спирали" автоматической системы

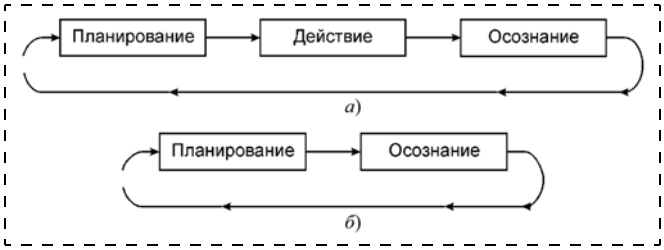


Рис. 2. Возможные варианты витка "спирали" произвольной системы:
а — с участием "действия"; *б* — без участия "действия"

сколько вариантов одного витка "спирали" представлены на рис. 2. В первом варианте (рис. 2, *а*) сначала следует планирование (моделирование или прогноз) ситуации, затем — действие (точнее, его управление мозгом), а после этого — осознание. Замечу, что осознание в первую очередь необходимо для осуществления контролирующей и управляющей функций и может включаться в различные моменты времени "спирали" мыслительной деятельности, пытаясь сделать ее более эффективной и качественной. Возможен и более простой вариант работы системы 2 (рис. 2, *б*): планирование (моделирование или прогноз) ситуации, а затем осознание.

Только из отмеченных вариантов витков могут быть сформированы очень сложные "спирали" мыслительной деятельности. Замечу, что сами ситуации и действия можно разбивать на составляющие (части), что еще больше усложняет рассмотрение процесса мышления.

Было выделено три типа режимов работы мозга как набора нелинейных электрических цепей, а именно: 1) при внешнем воздействии; 2) без внешнего воздействия (внутренний); 3) смешанный. Все отдельные режимы работы, включая восприятие, воспоминание, мышление и другие психические функции, относятся к одному из указанных типов. Любой специфический режим работы мозга, включая психические функции (в том числе мышление), является результатом прохождения электрического сигнала (сигналов) по соответствующему набору электрических (нейронных) цепей, что и объединяет режимы, т. е. является общим для них всех.

Из этого следует, что мысль и другие психические функции — материальны, что позволило автору предложить более глубокое понимание следующих феноменов: творческое мышление, самоизлечение, измененные состояния сознания (ИСС). В частности, все ИСС автор связал с различного рода изменениями, искажениями и нарушениями в реконструкции действительности в мозге человека, как правило, характеризуемыми существенными проявлениями. Таким образом проведенная детализация позволила автору выделить доминирующие процессы сознательной деятельности и предложить объяснение ряда отмеченных выше феноменов. Двинемся дальше.

В работе [10] было проведено более детальное рассмотрение одного из наиболее сложных, третьего смешанного режима функционирования мозга, в частности, осознанной обработки сенсорной информации. Анализировалась при этом полная система: мозг — другие составляющие нервной системы — тело — окружающая среда. Здесь выделю лишь наиболее важные моменты.

Преобразования информации начинаются до ее попадания в мозг из внешней среды, причем на этот процесс оказывает влияние не только внешняя среда, но и другие составляющие полной системы. Далее должна произойти реконструкция разобранной информации в целях отражения действительности. Единственное место, где это может происходить, — мозг.

Для сознательной обработки сенсорной информации основное значение имеют три крупных структуры мозга: ствол, таламус и кора. Сразу же замечу, что влияние при выполнении различных психических функций, включая сознание, могут оказывать и другие структуры мозга. Ствол мозга, судя по всему, играет важное значение для поддержания необходимого уровня активности структур мозга, соответствующего состоянию бодрствования человека. Это происходит в кооперативной работе с таламусом и корой.

Из разобранной информации, поступившей и заложенной ранее на хранение (закодированной) в мозге, может быть воспроизведена в результате прохождения электрических сигналов (декодировки) не только старая, но и, что особенно восхищает, вновь поступающая (новая) информация, т. е. идет иерархическая сборка коалиций нейронов сенсорных карт. Эти коалиции ответственны за реконструкции тех или иных воспоминаний и/или действительности. Таким образом, идет гибкая сборка поступающей информации из самых разнообразных фрагментов. Далее эта информация объединяется в единое целое с участием лобных долей. И здесь возможно множество вариантов. Рассмотрим лишь некоторые.

Предположим, что вы идете по улице. Обычно все происходит в автоматическом (на подсознательном уровне) режиме, т. е. работает система 1. Фактически сигналы, проходящие по объединенной коалиции нейронов, и есть планирование (мо-

делирование или прогноз) ситуации. Автор назвал это объединение нейронов коалицией планирования или прогнозирования, а дальше происходит инициация действия (см. рис. 1) и передачи сигналов соответствующим системам для исполнения. По оценкам нейробиологов задержка для осуществления таких действий составляет около 100 мс.

Самое интересное, однако, происходит в другом случае. Предположим, что коалиция нейронов, хотя бы одной из сенсорных систем, сигнализирует об опасности. В данной ситуации происходит повышение активации и превышение порога осознания, который может зависеть от многих факторов, а также своеобразный резонанс с картами целей, смыслов в лобных долях. В результате такого резонансного взаимодействия начинает идти из лобных долей в сенсорные карты обратная волна повышенной активации. Этот процесс требует по оценкам нейробиологов около 300...500 мс и более.

Энергетический поток, проходящий по этой объединенной коалиции нейронов, и есть осознание. Эта коалиция осознания, по-видимому, отличается от коалиции прогнозирования для данного случая. В зависимости от поступающей информации возможна не только "отсечка" неважной информации, но и взаимодействие с областями, психическими функциями, связанными с речью, эмоциями, моторными функциями и др.

В целом, осознание человека — главный доминирующий процесс энергетической реконструкции в соответствующей коалиции нейронов в оптимальном диапазоне активации бодрствующего состояния нормального человека. В данный момент времени коалиция осознания может быть в мозге только одной, что и приводит к известному феномену "бутылочного горлышка". Схематично процесс осознания показан на рис. 2, *а*. В случае внутреннего режима работы системы 2 может быть исключена инициация действия (см. рис. 2, *б*).

В результате был сделан важный вывод [10]: несмотря на возможность большого числа вариантов, при обработке информации в центральной нервной системе общей закономерностью являются преобразования сигналов и энергетические реконструкции. Эту общую закономерность автор и считает главным принципом функционирования мозга. С помощью принципа становится в общем понятно, что такое "квалиа" (*qualia*) [10]. Были также приведены серьезные аргументы в пользу того, что характер как обработки информации в мозге человека, так и природы жизни — аналого-цифровой, т. е. общий [10].

Оценка возможности реализации

В работах [1, 19] отмечались и анализировались три направления создания искусственного интеллекта человеческого уровня (ИИЧУ) и сверхразума, а именно: 1) материалистическое; 2) идеалистическое; 3) гибридное. Воспользуемся этими результатами. Рассмотрим все три направления.

К материалистическому направлению были отнесены два вида: биологический интеллект; электронный интеллект.

Анализ биологического интеллекта приводит к важному выводу, что ИИЧУ, в принципе достижим [1], ведь Природа это сделала! Здесь возможно два пути. Первый путь — реализация сознания на основе других животных. Это сразу приводит к серьезным этическим проблемам. Второй путь — корректировка сознания у человека, который его теряет. Данное направление очень актуально и важно в медицине. Здесь возможно использование, в частности, электроники, идеалистического и гибридного направлений (см. далее).

Электронный интеллект — путь создания ИИЧУ на основе искусственной электроники. Согласно предложенной полной электронной интерпретации функционирования мозга можно сделать вывод, что создание ИИЧУ на основе электроники, в принципе, возможно! [1]. В работах [1, 9] было проведено сопоставление мозга как объекта электроники с интегральными схемами (ИС) твердотельной электроники — наиболее близкого искусственного аналога. Наиболее важными отличиями мозга являются: 1) уровень интеграции $10^{17}...10^{21}$ активных элементов (в ИС максимальный уровень около 10^{10}); 2) гибридизация (принципиальную роль играют как минимум два типа процессов — электрические и химические); 3) гибкая системная организация (архитектура), обеспечивающая обработку разнообразных входящих внешних и внутренних сигналов (информации); 4) другая материальная основа — органические материалы; 5) индивидуальность нейронных (нелинейных электрических) цепей у каждого человека, которые к тому же постоянно могут изменяться (пластичность) под влиянием внешних и внутренних воздействий; 6) большое разнообразие элементов (многие из них просто индивидуальные) электрических (нейронных) цепей, включая активные элементы, т. е. отмеченные НЭМС; 7) аналого-цифровой характер обработки информации.

Все это характеризует мозг человека как очень мощную и гибкую информационную систему, обладающую не только количественным, но и качественным отличием от ИС, в частности важнейшим свойством — сознанием, предназначенным, прежде всего, для более качественной обработки информации. Именно это свойство пока недостижимо в области ИИ.

Ранее отмечалось, что основной принцип функционирования мозга — преобразования сигналов и энергетические реконструкции. Нетрудно заметить, что многие устройства электроники функци-

онируют по подобному принципу. Например, видеокамера, когда на экране с использованием пикселей из различных фрагментов осуществляется энергетическая реконструкция изображения, дополненная соответствующим звуковым сопровождением. Разве это ни имитация, хотя и грубая, функционирования зрительной и слуховой систем мозга? Что же нужно сделать, чтобы улучшить эту имитацию, сделать ее более полной? Ответ таков: "Необходимо воспроизводить, хотя бы многие из отмеченных автором отличий мозга, а возможно, и все". Это является грандиозной сложности задачей. И что же наиболее важно? По мнению автора — это фантастический уровень интеграции мозга, пластичность, аналого-цифровой характер обработки информации.

Сравнение по ряду количественных показателей мозга человека и наноэлектронных ИС показало явное превосходство мозга [1]. Так, для достижения фантастического уровня интеграции мозга потребуется около 60 лет, если развитие твердотельной наноэлектроники будет продолжаться согласно закону Мура, что сомнительно. Мозг также очень эффективен по энергопотреблению, в частности, потребляемая им мощность в состоянии бодрствования — от 10 до 25 Вт. При этом работа на одно переключение активного элемента по оценке автора составляет около $10^{-16}...10^{-17}$ Дж. Для сравнения, по прогнозу [20] энергия переключения для транзисторов в 2030 г. достигнет только около $0{,}5 \cdot 10^{-15}$ Дж на элемент. Таким образом мозг по энергопотреблению, пока вне конкуренции.

Важным является и характер обработки информации в мозгу человека, т. е. аналого-цифровой. Хотя аналоговые функции и могут быть реализованы на цифровой основе, однако за это придется "заплатить" увеличением объема устройства.

Детальное рассмотрение [1] позволило сделать следующие выводы: 1) электронная реализация ИИЧУ в полном объеме в ближайшее время вряд ли возможна; 2) учитывая главный принцип функционирования мозга — принцип преобразований сигналов и энергетических реконструкций, воспроизведение, по крайней мере приближенное, сознания в рамках электронного интеллекта, в принципе, теоретически возможно. При этом важна схема работы сознания, описанная выше.

Не исключено, что более полная реализация аналога мозга человека будет также возможна на базе органической электроники, которая, к сожалению, слабо развита в настоящее время.

Идеалистическое направление связано с математическим моделированием ИИЧУ. При этом было выделено два вида [1]: 1) на основе полномасштабного моделирования (полная эмуляция) мозга; 2) попытка создания систем моделирования, реализующих ИИЧУ.

Первый путь полной эмуляции мозга человека многими специалистами считается одним из самых перспективных. Для этого, однако, потребуется создать более или менее удовлетворительную теорию функционирования мозга, включая сознание, на основе которой и будет осуществлена полная эмуляция мозга. Перспективным для данных целей автор видит использование предложенных теории сознания и комплексного иерархического подхода исследования мозга, основанного на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами.

Автором было проведено сопоставление различных оценок числа необходимых флопсов компьютеров для моделирования функционирования мозга человека [1]. Оценки варьируются в широком диапазоне от 10^{14} до 10^{18} флопс. Оценка автора для среднего числа активных элементов в 10^{19} привела к цифрам от 10^{16} до 10^{19} флопс, т. е. самых мощных современных суперкомпьютеров может быть недостаточно для полной эмуляции мозга человека.

В целом же автором неоднократно отмечалось, что даже, если более или менее адекватные теория, модели будут созданы, сознание может быть описано, судя по всему, с достаточно серьезными приближениями.

Второй путь — создание систем моделирования, реализующих ИИЧУ. Это направление в настоящее время интенсивно развивается. В качестве таких систем, своеобразных прообразов ИИЧУ, рассматриваются поисковые системы Google, Amazon, некоторые разработки компаний IBM, Apple, DeepMind, Microsoft, Facebook, Baidu, Alibaba и Tencent. В основу наиболее продвинутых систем положены общие принципы машинного обучения, в частности глубинное обучение с использованием многоуровневых нейронных сетей.

Тем не менее, даже самые передовые системы ИИ пока не могут сравниться с интеллектуальными возможностями человека по широте спектра и гибкости, способности к развитию, потому, что как правило, являются узкоспециализированными системами, не обладают сознанием и квалиа! Однако в целом это очень важное направление развития ИИ.

Наиболее перспективным, с точки зрения автора, является гибридное направление реализации ИИЧУ, сочетающее компоненты как материалистического, так и идеалистического направлений. Реально оно, как правило, основано на применении электронного аппаратного обеспечения (*hardware*) и программного обеспечения (*software*). Здесь может быть достаточно большое число различных вариантов (сочетаний), многие из которых были более детально рассмотрены в работе [19]. Поэтому здесь отметим лишь следующие: 1) идеа-

листическое направление, строго говоря, относится к гибридному направлению, так как требует использования материалистической составляющей, т. е. компьютеров; 2) интерфейсы "человек—машина" или "человек—компьютер", в частности, кохлеарные импланты, импланты сетчатки, экзоскелеты и др.; 3) метод обратного проектирования (разработки) мозга, который считается в настоящее время наиболее перспективным; иногда возможный результат называется "кремниевым интеллектом", "кремниевым сознанием", так как аппаратная часть реализуется на кремниевых ИС, и здесь главная проблема заключается в том, что мы пока как следует не разобрались в том, как функционирует мозг человека; 4) использование различных нейроморфных архитектурных решений; 5) реализация различных когнитивных вычислительных систем; 6) создание разнообразных смесей (*wetware*) электронного аппаратного обеспечения (*hardware*), программного обеспечения (*software*) и биологии (различных систем человека, включая мозг) и др.

В целом, если и будут созданы компактные системы ИИЧУ, близкие по размерам к человеку, то это скорее всего произойдет в рамках гибридного направления.

По результатам проведенного рассмотрения различных направлений создания ИИЧУ может быть сформулирована *гипотеза 4*: искусственная реализация сознания человека, судя по всему, будет возможна, но приближенно, не в полном объеме. Дополнительно также отмечу философскую проблему [21], состоящую в том, что модель, копия не может в полном объеме соответствовать оригиналу, т. е. в данном случае мозгу, сознанию. И в то же время все рассмотренные направления могут привести к построению более или менее удачных моделей, копий сознания человека.

Заключение

Рассмотрены три возможных направления искусственной реализации сознания: 1) материалистическое; 2) идеалистическое; 3) гибридное. В них выделены наиболее перспективные подходы искусственной реализации сознания. В результате анализа сформулирована *гипотеза 4* о возможности такой реализации. Причем это может быть, в принципе, осуществлено в рамках всех трех направлений, но приближенно.

В то же время, если рассматривать сознание конкретного человека, то в искусственном аналоге должно быть воспроизведено, по существу, все, что хранится в мозге этого человека, а это задача фантастической сложности. Автор видит возможное решение вопроса путем копирования информации из соответствующего мозга. Очень сложным будет и вопрос о динамическом изменении сознания в результате взаимодействия человека с внешней средой.

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность моим ученицам Н. В. Коломейцевой и И. Ю. Щербаковой за подготовку рукописи работы к печати.

Список литературы

1. **Абрамов И. И.** Перспективы и проблемы создания сверхразума. Часть I. // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 1. С. 46—56.
2. **Майерс Д.** Психология. Минск: Попурри, 2006. 848 с.
3. **Revonsuo A.** Consciousness. The science of subjectivity. Hove and New York: Psychology Press, Taylor & Francis Group. 2010. 324 p.
4. **Шнайдер С.** Искусственный ты: машинный интеллект и будущее нашего разума. М.: Альпина нон-фикшн, 2022. 246 с.
5. **The Cambridge** Declaration on Consciousness, July 7, 2012, Francis Crick Memorial Conference at Churchill College, University of Cambridge.
6. **Вааль Ф.** Достаточно ли мы умны, чтобы судить об уме животных? М.: Альпина нон-фикшн, 2017. 404 с.
7. **Лурия А. Р.** Язык и сознание. Под ред. Е. Д. Хомской. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 320 с.
8. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть I. // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 5. С. 308—320.
9. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть II. // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 6. С. 368—384.
10. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть III. // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 9. С. 555—574.
11. **Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С.** Большое, малое и человеческий разум. М.: Мир, 2004. 191 с.
12. **Абрамов И. И.** Мозг как объект электроники. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2012. 80 с.
13. **Abramov I. I.** Brain as an Object of Electronics. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2013. 76 p.
14. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть I. // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 1. С. 52—54.
15. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть II. // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 45—53.
16. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть III. // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 5. С. 45—54.
17. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть IV. // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 6. С. 49—53.
18. **Канеман Д.** Думай медленно... решай быстро. М.: Изд-во АСТ, 2016. 653 с.
19. **Абрамов И. И.** Перспективы и проблемы создания сверхразума. Часть II. // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 2. С. 112—120.
20. **International** technology roadmap for semiconductors 2.0: 2015 Edition. Executive report.
21. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. I. Основные положения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 34—37.

I. I. Abramov, D. Sci., Professor, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus

Corresponding author:
Abramov Igor I., D. Sci., Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus
e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Is it Possible to Realize Consciousness Artificially?

Received on September 26, 2022
Accepted on October 2, 2022

Three identified possible directions for the artificial realization of consciousness are considered: 1) materialistic; 2) idealistic; 3) hybrid. In principle, this is the most difficult task of artificial intelligence. The most promising approaches to the artificial realization of consciousness are distinguished in the directions. As a result of the analysis, a hypothesis was formulated about the possibility of such an implementation. Moreover, this can be, in principle, carried out within the framework of the three directions noted, but approximately.

At the same time, if we consider the consciousness of a particular person, then in an artificial analogue, in essence, everything that is stored in the brain of this person should be reproduced, and this is a task of fantastic complexity. The author sees a possible solution of the problem by copying information from the corresponding brain. The question of the dynamic change of consciousness as a result of human interaction with the external environment will also be very difficult.

Keywords: *brain, consciousness, nanoelectronics, simulation, artificial intelligence*

For citation:
Abramov I. I. Is it Possible to Realize Consciousness Artificially?, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 42—48.

DOI: 10.17587/nmst.25.42-48

References

1. **Abramov I. I.** Prospects and problems of supermind development. Part I., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 46—56.

2. **Myers D. G.** Psychology. 5-th ed. New York, Worth Publishers, 1998.

3. **Revonsuo A.** Consciousness. The science of subjectivity. Hove and New York, Psychology Press, Taylor & Francis Group. 2010. 324 p.

4. **Scheider S.** Artificial you: AI and the future of your mind. Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2019.

5. **The Cambridge** Declaration on Consciousness, July 7, 2012, Francis Crick Memorial Conference at Churchill College, University of Cambridge.

6. **de Waal Frans.** Are we smart enough to know how smart animals are? New York, London: W. W. Norton & Company, 2016.

7. **Luriya A. R.** Yazyk i soznaniye. Pod redaktsiyey Ye. D. Khomskoy. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1979. 320 p. (in Russian).

8. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part I., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 308—320.

9. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part II., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 368—384.

10. **Abramov I. I.** Human consciousness, or possibilities of electronics. Part III., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 9, pp. 555—574.

11. **Penrose R., Shimony A., Cartwright N., Hawking S.** The large, the small and the human mind / Ed. by M. Longair. Cambridge University Press, 1997.

12. **Abramov I. I.** Mozg kak obekt jelektroniki. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 p. (In Russian).

13. **Abramov I. I.** Brain as an object of electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.

14. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' I, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2013, no. 1, pp. 52—54 (in Russian).

15. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' II, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2013, no. 3. pp. 45—53 (in Russian).

16. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' III, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2013, no. 5. pp. 45—54 (in Russian).

17. **Abramov I. I.** Mozg — obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, ili vzgljad so storony. Chast' IV, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2013, no. 6. pp. 49—53 (in Russian).

18. **Kahneman D.** Thinking, fast and slow. New York, Ferrar, Straus and Girous, 2011.

19. **Abramov I. I.** Prospects and problems of supermind development. Part II., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 112—120.

20. **International** technology roadmap for semiconductors 2.0: 2015 Edition. Executive report.

21. **Abramov I. I.** Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. I. Osnovnyye polozheniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2006, no. 8, pp. 34—37 (in Russian).

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 14.12.2022. Подписано в печать 18.01.2023. Формат 60×88 1/8. Заказ MC123. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**

Рисунки к статье И. Е. Лысенко, М. А. Денисенко, А. С. Исаевой, А. В. Козлова

«РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХМАССОВОГО ДВУХОСЕВОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО МЭМС-СЕНСОРА»

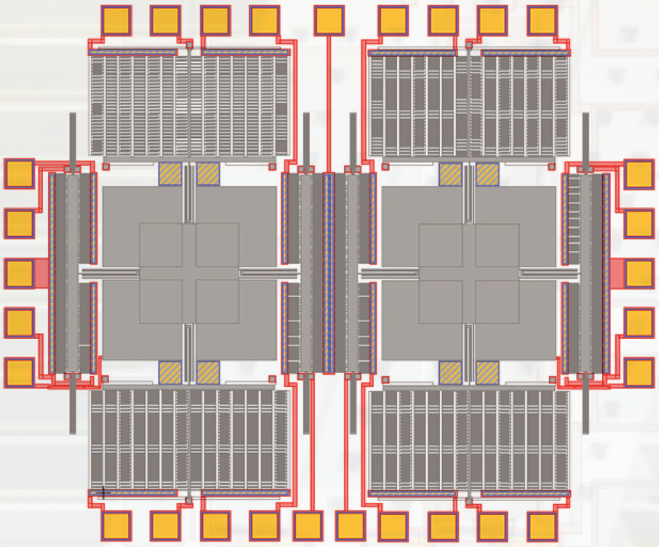


Рис. 2. Окончательная конфигурация проекта. Общая топология

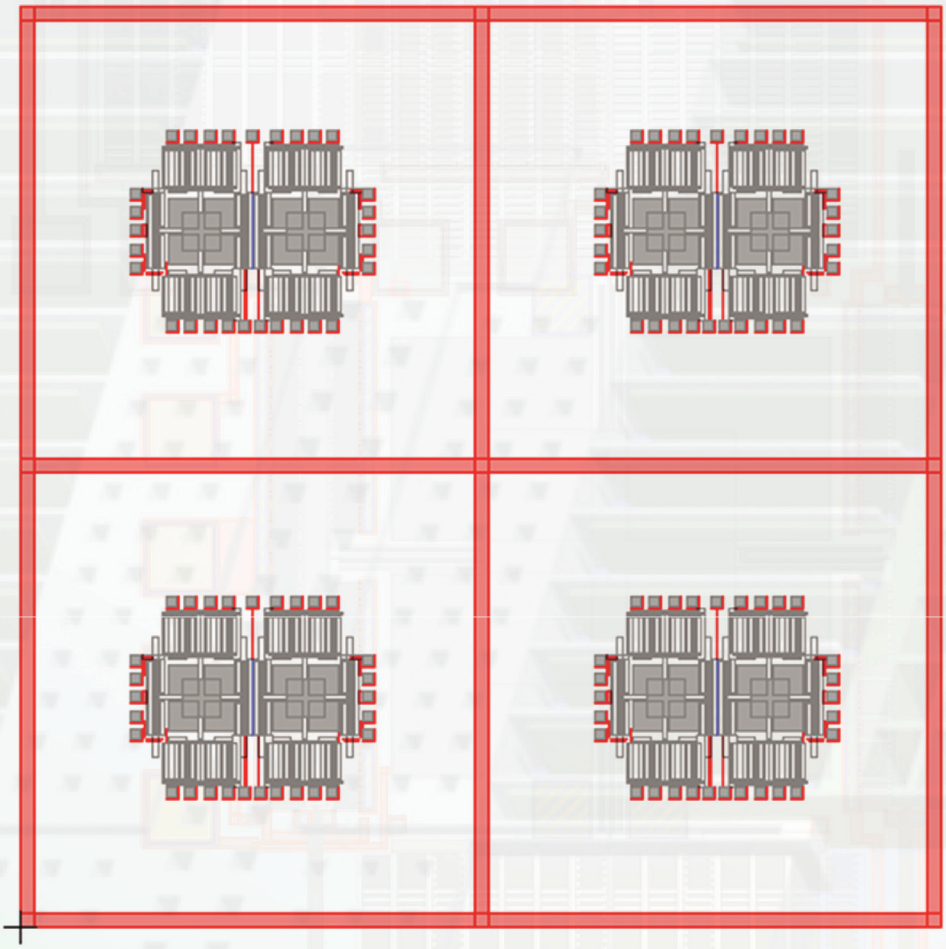


Рис. 3. Топология, размещенная на одной активной области

Рисунки к статье М. М. Ораковой, Р. Р. Нагаплежевой, Ф. М. Цеевой, Д. А. Карафа, Э. Х. Бозиева

«ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛА СКОЛЬЖЕНИЯ КАПЛИ ВОДЫ С ПОВЕРХНОСТИ КЭМ (111)»

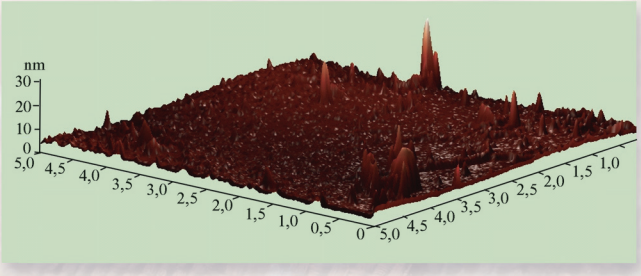


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности КЭМ (111) после травления в HF-растворе

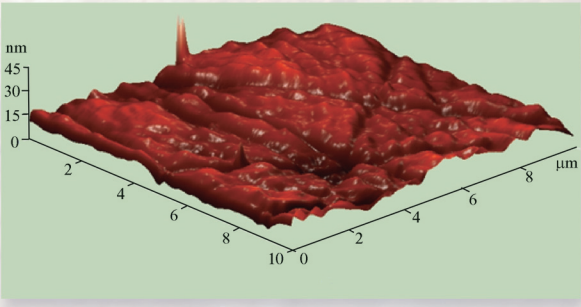


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности КЭМ (111) после обезжиривания в мыльном растворе

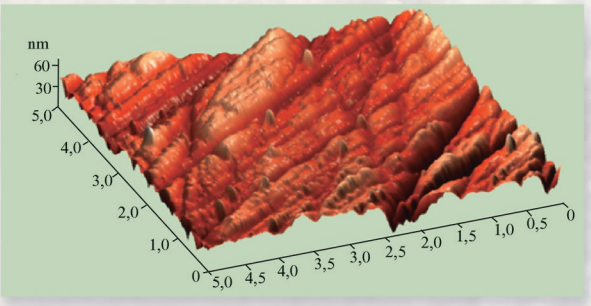


Рис. 4. АСМ-изображение поверхности КЭМ (111) после обработки этанолом

Рисунок к статье В. В. Просянюка, И. С. Суворова, Б. Ю. Паршикова, Н. В. Прудникова

«ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ»

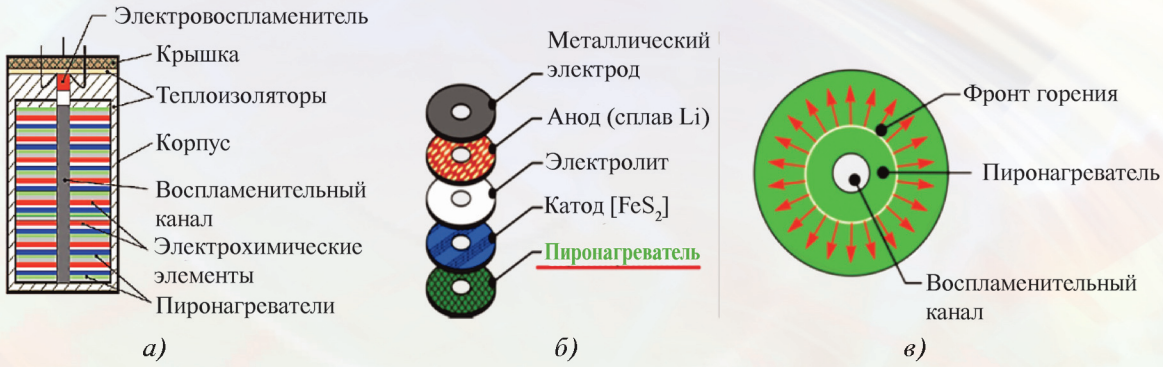


Рис. 1. Тепловой (термохимический) источник тока:
а – типовая схема ТХИТ; *б* – типовая схема ВГЭ; *в* – горение пиронагревателя (ПН)

ISSN 1813-8586. Нано- и микросистемная техника. 2023. Том 25, № 1. 1–48. Индекс: 79493 (Объединенный каталог «Пресса России»)