

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 22. № 9. 2020

Рисунки к статье А. С. Койгерова, С. С. Андрейчева

«РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ОСНОВЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ»

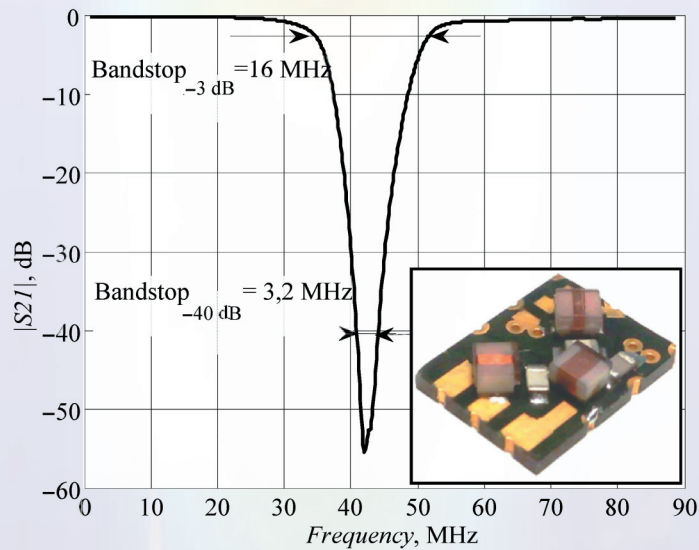


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики LC -фильтра третьего порядка

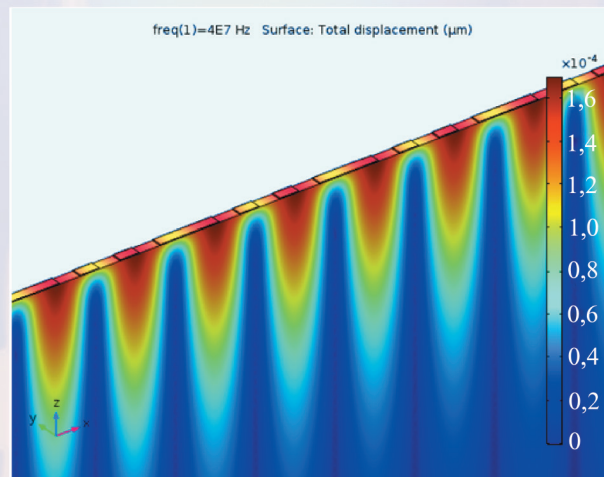


Рис. 12. Картина механических смещений волны Рэлея на частоте 40 МГц для преобразователя DART

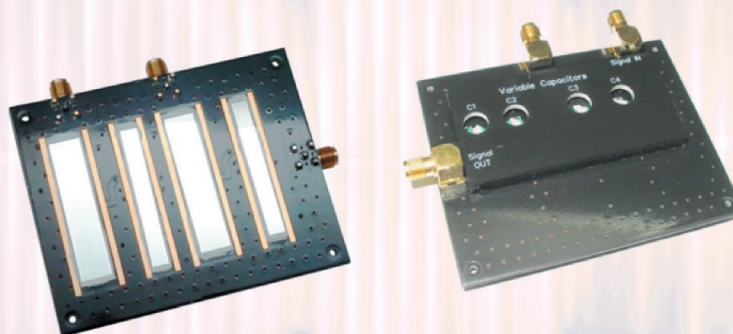


Рис. 16. Внешний вид режекторного фильтра

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 22. № 9 ♦ 2020

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Журнал включен в Перечень международных реферируемых баз данных по научному направлению 02.00.00 химические науки

и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника.

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

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Лабунов В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь)

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.

Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф.

Дайнеко А. В., к.х.н.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды)

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панин Г. Н., к.ф.-м.н., проф. (Южная Корея)

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Пожеда К., д.ф.-м.н. (Литва)

Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония)

Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия)

Сингх К., к.т.н. (Индия)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенков С. П., д.т.н.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н., доц.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Чугунова А. В. (науч. ред.)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ

Деспотули А. Л., Андреева А. В. Наноионика — развивающаяся информационная система. Часть 2. От первых работ к современному состоянию наноионики за рубежом 463

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Дормидошина Д. А., Рубцов Ю. В., Савин М. Л. Применение ICMN в процессах сбора, обработки и анализа информации о надежности изделий микроэлектроники 485

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Мустафаев М. Г., Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г. Технологические принципы формирования приборных структур с воспроизводимыми параметрами 489

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Койгеров А. С., Андрейчев С. С. Режекторный фильтр на поверхностных акустических волнах на основе однонаправленных преобразователей 493

Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Тенденции развития матричных фотоприемных устройств ИК диапазона 500

Зинченко В. Н., Каширин Н. А., Нечаев В. М., Дайнеко А. В., Храпцов А. М., Мамин О. Ш., Голубский А. А. Изгибные чувствительные элементы для малогабаритных датчиков удара — акселерометров 511

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л. Сравнительный анализ результатов изображения коронавируса на ПЭМ и СЗМ 516

Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника" в 2020 г. 523

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./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:

107076, Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 22

No. 9

2020

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
Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Kvardakov V. V., 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
Surov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS
Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

Editorial board:

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

Editorial staff:

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

The Journal is included in the international databases of the chemical sciences — Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences — INSPEC, and it is also indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform. The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages. The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY

Despotuli A. L., Andreeva A. V. Nanoionics — the Developing Informative System. Part. 2. From the First Works to the Current State of Nanoionics Abroad 463

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Dormidoshina D. A., Rubtsov Yu. V., Savin M. L. The Application of ICMH in the Collection, Processing and Analysis of Information on the Reliability of Microelectronic Products 485

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Mustafaev M. G., Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G. Technological Principles for the Formation of Instrument Structures with Reproducible Parameters 489

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Koigerov A. S., Andreychev S. S. The Notch Filter on Surface Acoustic Wave on Base of Single Phase Unidirectional Transducers 493

Kulchitsky N. A., Naumov A. V., Startsev V. V. Development Trends of Infrared Focal Plane Array Detectors 500

Zinchenko V. N., Kashirin N. A., Nechaev V. M., Dayneko A. V., Khramtsov A. M., Mamin O. Sh., Golubskiy A. A. Bending Sensing Elements for Small-Sized Shock Sensors — Accelerometers 511

MOLECULAR ELECTRONICS AND BIOELECTRONICS

Shugunov L. Zh., Shugunov T. L. Comparative Analysis of the Results of Coronavirus Imaging on PEM and SPM 516

Index of Articles Published in the Journal "Nano- and Microsystems Technology " in 2020 523

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

А. Л. Деспотули, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru,
А. В. Андреева, д-р физ.-мат. наук, проф., вед. науч. сотр., e-mail: andreeva@ipmt-hpm.ac.ru,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии
микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН),
г. Черноголовка

НАНОИОНИКА — РАЗВИВАЮЩАЯСЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА. Часть 2. ОТ ПЕРВЫХ РАБОТ К СОВРЕМЕННОМУ СОСТОЯНИЮ НАНОИОНИКИ ЗА РУБЕЖОМ

Поступила в редакцию 05.10.2020

Представлен критический обзор этапов становления, развития и современного состояния наноионики в России и мире. Наноионика рассматривается как развивающаяся информационная система, ее история впервые анализируется в терминах динамической теории информации и стратегического инновационного менеджмента.

В части 2 обзора в краткой форме представлен панорамный взгляд на развитие наноионики за рубежом. Дано расширенное определение научного направления "наноионика". Поскольку зарубежная литература по теме обзора обширна, в основном рассмотрены результаты работ, в которых термин "наноионика" фигурирует в названии, аннотации и ключевых словах. Более подробно дан анализ работ, которые серьезно повлияли на развитие наноионики и будут определять ее будущее. Рассмотрены разработки наноионных приборов с функцией памяти, Li-ионных батарей и топливных элементов. Подчеркивается важная роль создания устойчивых границ раздела, на которых протекают электрохимические реакции, в наноионных приборах. Критически анализируются такие новые направления исследований, как наноархитектоника и ионитроника. На сравнительной основе предлагается схема корректного введения нового научного термина.

Ключевые слова: наноионика, наноархитектоника, ионитроника, динамическая теория информации, стратегический инновационный менеджмент, атомные переключатели, мемристоры, Li-ионные батареи, топливные элементы

Введение

Наноионика — ветвь науки и технологии. Она раскрывает основы быстрого ионного транспорта (БИТ) на наномасштабе и перспективы применения твердотельных материалов и приборов с БИТ. Термин и концепция "наноионика" впервые предложены в России в 1992—1993 гг. [1].

Цель работы — представить проблемно-аналитический обзор по истории возникновения и развития прикладной и теоретической наноионики в мире, выделив вклад Института проблем технологии микроэлектроники (ИПТМ РАН). Наноионика впервые рассматривается как развивающаяся информационная система. Результаты развития наноионики и перспективы дальнейших исследований и разработок в этой области анализируют-

ся в ракурсе положений книги Д. С. Чернавского "Динамическая теория информации" [2] и с точки зрения влияния, которое стратегический инновационный менеджмент должен оказывать на успехи науки [3, 4].

Обзор состоит из нескольких частей. В части 1 [5] были представлены истоки наноионики, этапы ее становления и развития в нашей стране. В основном были рассмотрены результаты, полученные в ИПТМ РАН, поскольку целенаправленные исследования в целях расширения границ наноионики в новых направлениях в других организациях России практически не выполняются. Результаты, полученные в ИПТМ РАН, включают: 1) классификацию твердотельных ионных проводников [6—8] и выделение класса передовых супер-

ионных проводников (ПСИП) — материалов со специфической кристаллической структурой, которая определяет рекордно высокие ионно-транспортные характеристики; 2) кристаллоинженерию гетерограниц в ПСИП и разработку на этой основе пленочных суперконденсаторов с когерентными гетеропереходами и рекордно высокими частотно-емкостными характеристиками (наноионные суперконденсаторы — НСК) [9, 10]; 3) анализ возможностей применения НСК в глубокосубвольтовой наноэлектронике [11, 12]; 4) определение путей гетероинтеграции ПСИП и углеродных наноструктур с высокой квантовой емкостью [13]; 5) формулировка и разработка теории динамического отклика слоевых структур с прыжковым ионным транспортом в неоднородном на наномасштабе кристаллическом потенциальном рельефе (структурно-динамический подход наноионики [14–24]); 6) материаловедение и нелинейная динамика ПСИП и наноструктур на их основе [21, 24–26].

В настоящей работе, т. е. в части 2 обзора, в краткой форме представлен панорамный взгляд на развитие наноионики за рубежом. Этот раздел даст более подробный анализ множества работ иностранных авторов, которые серьезно повлияли на развитие наноионики и будут определять ее будущее. Зарубежная литература по теме обзора обширна, поэтому, в основном, рассмотрены результаты тех работ, в которых термин "наноионика" фигурирует в названии, аннотации и ключевых словах. "Только теория решает, что мы можем наблюдать" [27], поэтому выделенные работы отличаются *"thinking towards nanoionics"*, т. е. практическим применением теории БИТ на наномасштабе. Также в этой части обзора дано развернутое определение наноионики и подчеркивается значение ввода новых терминов для генерации информации. Сознание не может адекватно отразить реальность, если в тезаурусе мышления нет нужных понятий и образов.

1. Расширенное определение наноионики

Область "наноионика" определяют: 1) объекты с БИТ на наномасштабе; 2) предмет, т. е. специфические законы, явления, эффекты, свойства и механизмы процессов; 3) масштабные критерии; 4) методы; 5) нанотехнологии; 6) перспективные применения; 7) исследования, расширяющие границы наноионики в новых направлениях.

1. К объектам наноионики относятся:

- твердотельные материалы с БИТ на наномасштабе, такие как ионные проводники с дефектной структурой (точечные дефекты, дислокации, внешние и внутренние поверхности) и механическими напряжениями/деформациями [28–33];

- граничные области в системах с БИТ с отклонением от стехиометрии [1, 34–39];
- наноструктурированные микроstructures с ионным транспортом (композиты с высокой плотностью границ) [40–45];
- поверхностно модифицированные и функциональные гетероструктуры с БИТ [1, 6, 45–53];
- новые ионные соединения и материалы [25, 54–62];
- появляющиеся твердотельные ионные наноприборы (*emerging nanodevices*) [1, 6–10, 63–72].

2. К предмету наноионики относятся специфические:

- законы, например, законы усреднения на наномасштабе [23];
- понятия, например, ток смещения Максвелла на потенциальном барьере [17, 18];
- явления [1, 30, 73–77], например, поверхностная ионная проводимость кристаллов [30];
- свойства [78–87], например, объединение противоположно заряженных наночастиц в *"nanoionic composites"* [82];
- эффекты [73, 88–95], например, влияние внешнего электрического поля на ион-транспортные процессы, протекающие при прямой электронно-лучевой литографии [88];
- механизмы ионных процессов [10, 30, 79, 96–110], например, ведущие к ускорению электрохимических реакций [108].

3. Масштабные критерии, определяющие область действия законов наноионики [1, 20, 21, 23, 30, 111–113], например, размерный фактор [23], который определяет корректность использования метода однородного эффективного поля в наноионике.

4. Методы наноионики включают:

- моделирование поведения и свойств нанообъектов с БИТ [114–121] с учетом частотно-зависимой динамики ионов [122–126] и неоднородного на наномасштабе потенциального рельефа [24, 127];
- стратегии/принципы дизайна и синтеза функциональных наноструктур, наноматериалов и наноприборов с БИТ [7, 9, 11, 25, 128–137];
- способы создания/контроля подсистемы подвижных ионов [138–148];
- способы управления поведением нанообъектов с БИТ [1, 73, 149–154].

5. К нанотехнологиям наноионики относятся результаты исследований, приведенные в [155–164], например, в работе [155], рассматриваются перспективы технологий для создания гибридных (на основе биомолекул) наноионных приборов, размеры которых могут быть ~1 нм.

6. Перспективные применения наноионики включают разные области [6, 9, 10, 12, 165—180]. Среди них микросистемная техника [6, 9], наноэлектроника и нейроморфный компьютер [166—173], элементы с памятью [174, 177], суперконденсаторы и Li-батареи, топливные элементы [176], космическая и радиационно-стойкая техника [10—13], радиочастотная идентификация объектов, биоэлектроника [155] и др.

7. Попытки выхода за известные границы наноионики [10, 155, 181—187], например, создание гибридных бионаноионных структур [155], использование концепций "наноархитектоника" [143] и "наноэлионика" [183] (сочетание в наноприборах ионно-транспортных и электронных процессов; такая возможность реализована в мемристорах [166]) и др. Таким образом, термин "наноионика" распространяется на фундаментальные основы будущих энергетических, биомедицинских, информационных и космических технологий [12, 155, 188—195].

Содержание многих работ соответствует нескольким пунктам из 1—7. Авторитетная экспертная организация *International Roadmap for Device and Systems (IRDS)* связывает с наноионикой перспективы разработки нового типа высокоплотной энергонезависимой перезаписываемой матричной резистивной памяти (*nanoionic resistive random access memory, RRAM*) [196]. Интегрированная с логикой высокоплотная *RRAM* рассматривается как возможная материальная основа искусственного интеллекта [197].

Границы наноионики должны быть расширены в такие междисциплинарные области, как биоэлектроника [198], позволяющая манипулировать и характеризовать биомолекулы с помощью наноприборов; биоэлектронная медицина [199], которая рассматривается как альтернатива применению лекарств; полупроводниковая синтетическая биология [200], которая планирует использовать преимущества биологических систем по энергетической эффективности выполнения информационных функций.

2. Распространение термина "наноионика" за рубежом

В 2000-х годах термин "наноионика" становится темой конференций, попадает в область интересов ученых, студенческих курсов, исследовательских школ, передовых технологий и т. д. У зарубежных авторов слово "nano-ionics" впервые появляется в 1996 г. в абстракте статьи немецкого ученого Й. Майера [28]. В последующие годы в его многочисленных работах разрабатывается наноионика материалов с относительно низкими концентрациями ионов подвижного сорта. Исследо-

вания направлены на развитие физикохимии дефектов и химии объектов с гетерограницами, рассматриваются равновесные мезоскопические и размерные эффекты в нанокристаллических и нанокompозитных ионных материалах. В статье [28] отсутствуют как определение термина "наноионика", так и ссылка на приоритетную работу [1] (обе статьи опубликованы в одном и том же журнале *"Solid State Ionics"*). В работе 2000 г. [201] анализируется мезоскопический эффект, который возникает на границе между AgI и Al₂O₃. Сущность эффекта заключается в том, что на границе образуется межфазный слой с чередованием дефектов упаковки типа 7Н (последовательностью фаз γ -AgI и β -AgI). Поскольку толщина фазовых прослоек AgI меньше длины Дебая, возникает эффект, который приводит к высокой ионной проводимости композита (по сравнению с исходными фазами). В этой же работе дано определение наноионики как *"ion conductivity in nanocrystalline materials and nano-composites"*. Начиная с этой работы, Й. Майер конкретизирует и расширяет термин "наноионика".

В 2001 г. на шестом международном симпозиуме *"Systems with fast ionic transport"* [202] были представлены два доклада по наноионике. Позже по этим докладам были опубликованы статьи [41, 203]. Свойства наноструктурированных электрокерамик для хранения и преобразования энергии [41] и размерные эффекты для композитных и слоевых наноструктур β -AgI: Al₂O₃ и CaF₂/BaF₂ рассмотрены в контексте наноионики [203].

Размерные эффекты классифицируются на "тривиальные" и "нетривиальные" [34]. Если области пространственных зарядов от отдельных границ не перекрываются, то свойства зависят от доли границ, что определяет тривиальный размерный эффект. Когда размер кристаллитов меньше четырех Дебаевских длин ($L_D \propto N_i^{1/2}$) границы располагаются настолько близко друг к другу, что происходит перекрытие областей пространственного заряда и проявляются нетривиальные размерные эффекты (мезоэффекты). Соответственно изменяются локальные свойства материалов.

В работах 2004—2005 гг. обосновывается правомерность введения термина наноионика [150, 204], хотя приоритетная идея [30] о поверхностной (т. е. геометрически ограниченной) ионной проводимости игнорируется. В статье [150] суть наноионики броско определена в заголовке: *"Nanoionics: ion transport and electrochemical storage in confined systems"*. В статье 2020 г. *"Nanoionics: Fundamentals and Applications"*, опубликованной в 5-м томе 10-томной энциклопедии *"Nanoscience in 21 Century"* [205], дано более широкое определение наноионики: *"Nanoionics takes variations of ionic charge carrier*

densities at interfaces (or dislocations) seriously and becomes particularly relevant if the distances between high dimensional structure elements are so small that mesoscopic effects occur". ("Наноионика учитывает изменение плотности подвижных ионов вблизи границ (или дислокаций) и становится актуальной, если расстояния между структурными элементами более высокой размерности (3D-, 2D-, 1D-дефекты) настолько малы, что для подвижных ионов возникают мезоэффекты". Упоминание дислокаций в определении наноионики, по-видимому, связано с публикацией ряда работ [139, 176], в которых указано, что особенности ионного транспорта в области дислокации не могут быть объяснены на основе понятия пространственного заряда, характеристикой которого является длина Дебая. Основной недостаток определения [205] состоит в том, что оно не учитывает динамические законы, явления, эффекты и свойства. Поэтому вне сферы рассмотрения оказываются высокочастотные/импульсные приборы.

Для совершения рывка в новой области в Японии с 2004 г. выполнялась долговременная программа «*The Grant-in-Aids for Priority Area on "Nanoionics (439)"*». Госпрограмма осуществила поддержку 30 японских групп, чьи исследования охватывали многие аспекты наноионики. Программа относится к деятельности системы стратегического инновационного менеджмента [3] в научной сфере. В ГОСТе [4] стратегический менеджмент определяется как разработка и реализация действий, ведущих к долгосрочному превышению уровня результативности деятельности организации над уровнем конкурентов. На рубеже 2014 г. программа (439) была сфокусирована на выполнение исследований по направлению *"New Frontiers of Hetero-Interface Modification for High Temperature Applications Based on Nanoionics Principles"*. Один из публичных отчетов по программе *"Nanoionics 439"* представлен в тематическом выпуске журнала 2007 г. [191]. Программа "439" позволила создать в Японии эффективно действующее научное сообщество и инфраструктуру [206].

В начале 2000-х годов авторам обзора пришлось отстаивать приоритет [1] в условиях, когда использование термина "наноионика" получало все более широкое распространение за рубежом, а российское сообщество ионики твердого тела проявляло консерватизм. Профильный журнал "Электрохимия" отклонил статью авторов (2004 г.) с аргументацией, что термина "наноионика" не существует. Отклоненная работа была расширена и в 2005 г. опубликована в виде двух статей в журнале *"Ionics"* [6, 7]. Несколько ранее научно-технический журнал "Микросистемная техника", заинтересован-

ный в поиске новых прорывных приборных решений, опубликовал статью авторов [9], посвященную созданию на основе идей наноионики и инженерии межкуристаллитных границ высокочастотных импульсных суперконденсаторов с когерентными гетеропереходами. В электронной публикации [207] авторы обзора указывают на замалчивание Й. Майером (директор института Макса Планка в Штутгарте, главный редактор журнала *"Solid State Ionics"*) приоритетной статьи [1]. Аналогичную политику проводит группа японских ученых, возглавляемых М. Aono (Director General of International Center for Materials Nanoarchitectonics). Нарушение правил цитирования маститыми учеными, управляющими научной инфраструктурой, можно объяснить их борьбой за приоритеты, оригинальный статус идей и гранты. Соискатели научных степеней в области твердотельной ионики практически всегда цитируют статью [1].

3. Развитие прикладной наноионики за рубежом

3.1. Атомные переключатели и мемристоры — наноионные приборы с функцией памяти

Наноионика сегодня активно развивается в области приборов с функцией памяти (мемристоры). В таких приборах на наномасштабе протекают согласованные ионные и электронные процессы. С 2008 г. [166, 208] число теоретических, экспериментальных и технологических работ по теме мемристоров стало быстро нарастать [143, 169, 170, 193, 209—212], для одного только перечисления ссылок необходима книга.

В Японии стратегический менеджмент сделал дальновидный выбор (программа "439"), японские ученые получили приоритетные результаты и стали лидерами ряда направлений наноионики. Одно из прорывных научных изобретений японских ученых в рамках государственной программы по наноионике ("439" [191]) — атомный переключатель [168, 213]. В этом двухэлектродном приборе при протекании сопряженных ионно-электронных процессов реализуется память о предшествующем состоянии. В промежутке между металлическими электродами в СИП формируется или исчезает мостик нанометровой длины с электронной проводимостью. Мостик имеет диаметр один или несколько атомов и образуется при реакциях восстановления ионов/окисления атомов металла СИП. Квантованное изменение электронной проводимости происходит в мостике при подаче импульсов напряжения разной полярности. Следует заметить, что квантование проводимости при контактировании макроскопических электродов наблюдали значительно раньше [214]. Атомный переключатель

относится к классу наноионных приборов, на их основе могут быть созданы высокоплотные матрицы, состоящие из двухэлектродных запоминающих наноразмерных элементов.

Высокоплотная быстродействующая память с большим числом циклов перезаписи необходима для изменения парадигмы компьютеринга. Планируется отход от традиционной схемы фон Неймана, когда вычислитель и блоки памяти пространственно разделены. В новой парадигме функционирует "среда", распределенные друг в друге вычислительные и запоминающие структуры. Новая парадигма названа нейроморфным компьютерингом и имеет аналогом нейроморфные структуры мозга [63]. Ожидается, что новые подходы произведут переворот в повышении эффективности вычислений и создании искусственного интеллекта, способного распознавать сложные образы и смыслы.

Изобретение атомного переключателя в 2005 г. [213] предшествовало буму в исследованиях мемристоров. Мемристоры, гипотетические приборы с памятью, были предложены в теории в 1971 г. [215]. Принцип их функционирования должен базироваться на гипотетической связи магнитного потока и электрического заряда. Однако в объявленных мемристорах [208] такой связи нет. Современные мемристоры — двухэлектродные приборы, физически реконфигурируемые системы, в которых при работе происходят локальные изменения химического состава. Сопротивление мемристора в момент времени t определяется зарядом, прошедшим через прибор в предшествующие моменты времени (память). Импульсами разнополярного напряжения устанавливают режим "ON"/"OFF" работы прибора. Мемристоры, как и атомные переключатели, являются наноионными приборами, в которых протекают сопряженные на наномасштабе ионно-электронные процессы [166].

3.2. Наноархитектоника

Примером развития информационной системы является инициирование в Японии исследований по масштабной концепции "наноархитектоника", соединяющей наноионику и архитектонику (взаимодействие конструктивных элементов для воплощения определенной идеи). В работе [212] под наноархитектоникой понимается атомная функциональная реконструкция границ раздела твердое тело/твердое тело в процессах ионно-электронного транспорта, управляемых внешним воздействием.

Для решения новых задач в Японии создан *International Research Center for Materials Nanoarchitectonics (MANA)*. Область деятельности центра находится на пересечении материаловедения, нано-

ионики и нанотехнологий [212]. Эта область характеризуется как "*Nanoarchitectonics from atom to life*" [216]. Аналогичный лозунг "*Supramolecular Chemistry: From Molecules to Nanomaterials*" имеет и супрамолекулярная химия [217]. Анализ показывает, что основные идеи синтеза твердотельных структур в процессах производства полупроводниковых приборов, представленные в книге 1986 г. В. Ф. Дорфмана [218], и идеи наноархитектоники [212] во многом совпадают. Совпадение заключается "в пространственно-временной организации различных физико-химических процессов в целях создания материалов с необычным, но заранее заданным распределением состава, структуры и свойств" [218]. В полупроводниковых технологиях задействован подход "сверху-вниз": макро → микро → нано, а в наноархитектонике — подход противоположный, "снизу-вверх".

Наноархитектонику характеризуют следующие положения [219].

- Надежные наноматериалы и наносистемы должны быть получены организацией наноразмерных компонентов, которым изначально присуща неопределенность и ненадежность.
- Новые функциональные возможности могут возникать не от отдельных компонентов, а от их взаимодействия.
- Неожиданно возникающие функциональности могут быть результатом сборки и организации огромного числа компонентов.
- Некоторые теоретические области, такие как вычисления из первых принципов и новые подходы, могли бы помочь в изучении функциональных наноматериалов.

Все положения [219] и их комбинации известны для нанотехнологии, понимаемой в широком смысле. Утверждение [219] "*assemblies of biomolecules and programmed organization of DNA origami cannot be well categorized as a simple technology, i.e., nanotechnology*" показывает, что нанотехнология и наноархитектоника отличаются "степенью простоты". Однако в нанотехнологии при создании новых объектов часто используют комбинации сложных технологий и нет никаких ограничений на сложность используемого теоретического аппарата. Попытки наноархитектоники [219] обобщить бионанотехнологию слабо обоснованы, так как с помощью технологий ДНК-оригами [220—222] бионанотехнологии уже давно разрабатывают и целенаправленно создают замысловатые атомно-молекулярные конструкции с заданной функциональностью.

В целом, наноархитектоника пытается охватить широкий спектр известных направлений и дисциплин: "*Architectonics on the nanoscale, i.e., nanoarchitectonics, might be a more appropriate term than*

nanotechnology" [219]. Однако информация о специфических законах, объектах, предмете, методах и дескрипторах, необходимых для введения новой обобщенной (мета) дисциплины "наноархитектоника", в работах [212, 216, 219] не представлена.

Пример четкого подхода к определению новых сложных объектов дает работа [223]. В ней сделаны оценки допустимых предельных параметров миниатюризации для компонентов, составляющих новый класс ячеек (*nanomorph cells*) микронных размеров. Наноморфные ячейки должны автономно функционировать в живых организмах, выполняя диагностику и терапию на клеточном уровне. По нашему мнению, в настоящее время вместо замены понятия "нанотехнология" на "наноархитектоника" [219] более правильно было бы обсуждать введение в область нанотехнологии новых идей, например, связанных с топологией и геометрией тел, находящихся в состоянии превращения [224], и делать оценки предельных параметров миниатюризации сложных функциональных систем, образуемых взаимодействующими разнородными по природе нано (микро)-подсистемами.

3.3. Ионтроника

В последние годы в научной литературе используют слово "ионтроника" (*iontronics*), давая новому "термину" разные определения и обсуждая будущее одноименной дисциплины [225—228]. Например, "ионтроника" — зарождающаяся технология на основе сложного контроля ионов как переносчиков сигнала, она соединяет твердотельную электронику с биосистемами [228]. В работе [227] с броским названием *"Endeavor of Iontronics: From Fundamentals to Applications of Ion Controlled Electronics"* к ионтронике относят междисциплинарную область, где пересекаются электроника, ионика, электрохимия, физика твердого тела, электронные технологии и биологические науки. Подчеркивается, что в последние годы на передний план выходят устройства, основанные на двойных электрических слоях у границ раздела между ионными проводниками (электронные изоляторы) и электронными проводниками, включая органические и неорганические вещества (халькогениды, окиси, материалы на основе углерода и др.). Таким образом, в разных работах [225—228] "ионтроника" трактуется по-разному, но везде широко и нечетко.

По нашему мнению, корректное введение нового научного термина должно проходить по следующей схеме.

1. Осознание, что известный категориальный аппарат не позволяет распознать новую область деятельности, ее предмет и объекты.

2. Обозначение новой области знаком, словом, термином. Знак должен быть лаконичным и информативным для быстрой ассоциации с объектами и предметом.

3. Формулировка дескрипторов термина. В формуле нового термина использование других терминов должно быть минимальным для исключения тавтологий.

4. Ассоциация термина с другими, исторически и по смыслу близкими терминами (должен быть интуитивно ясен генезис и контекст применения термина).

Например, термин "наноионика" введен по схеме 1—4. Новое слово (знак) "ионтроника" не удовлетворяет требованиям 3 и 4. Нет также соответствия требованию 2 ввиду большой неопределенности: корень "троника" может ассоциироваться одновременно с (микро-, нано-) электроникой, меха-троникой, СВЧ-электроникой, спин-троникой, моле-троникой, оптоэлектроникой, позитроникой, биоэлектроникой и др. У ионтроники отсутствует ассоциативность с миром нано (микро-), без которого в настоящее время трудно представить любые приборы. Если по аналогии с механотроникой определить ионотронику как синергию точной ионики и электронных приборов, то такое определение отбрасывает мысль на десятки лет назад к макроскопическим вакуумным "ионным приборам".

Концепция ионтроники утверждает, что она "устраняет разрыв между электроникой и биологическими системами" [225]. Однако в Википедии [229] уже существуют термины "биоэлектроника", "молетроника", "биомолекулярная электроника" и "нанобиоэлектроника". Более того, в 1990 г. был опубликован пятый том журнала *Biosensors & Bioelectronics*, а в 2020 г. выходит 165-й том этого журнала. "Концепция ионтроники учитывает свойства как подвижных ионов, так и электронов" [225], но при таком определении логично было бы назвать концепцию "наноэлионика". Это слово связано как с миром нано, так и с областями электроники и ионики. Под названием "Наноэлионика" в 1996 г. была подана заявка на проект РФФИ [183], но отечественный стратегический менеджмент в научной сфере не смог оценить прогностическую информацию о необходимости электрон-ионного синергизма в области "нано".

Авторы работ [225—228] пытаются обосновать основы ионтроники, связывая с ней широчайший круг направлений и дисциплин. Однако, как и для наноархитектоники, информация о специфических законах, объектах, предмете, методах и дескрипторах, необходимая для введения новой дисциплины "ионтроника", не представлена, а выбранный "тер-

мин" является не только малоинформативным, но даже вводит в заблуждение. По нашему мнению, предложенные новые направления "наноархитектоника" [212, 216, 219] и "ионитроника" [225—228] нуждаются в существенной критериальной доработке.

3.4. Наноструктурированные материалы для литий-ионных батарей и топливных элементов

Твердотельные литий-ионные батареи массово используют в портативных приборах. Повышению эффективности батарей посвящено множество работ [230—240]. Основные характеристики батарей определяют гетерограницы, на которых протекают электрохимические реакции. К материалам твердого электролита (ТЭ), анода и катода предъявляют ряд требований, среди которых высокая проводимость (σ_i) и термодинамическая устойчивость границ в условиях больших токов обмена по ионам Li. Коэффициент сопряженной диффузии Li^+ и электронов в электродах определяет плотность тока заряд/разряд. Наноструктурированные электродные материалы с БИТ позволили значительно повысить эффективность батарей.

К настоящему времени найдены ТЭ, у которых σ_i сравнима с проводимостью жидких электролитов [233]. Среди ТЭ с высокими значениями σ_i по Li^+ - и Na^+ -ионам выделяются NASICON (Na — суперионный оксидный проводник), Li-гранаты, перовскиты и антиперовскиты, сульфиды, литий-суперионный проводник (LISICON) и другие соединения состава $\text{Li}_{4-x}\text{M}_1-x\text{P}_x\text{S}_4$ ($M = \text{Ge}, \text{Si}$), $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ и их производные, СИП семейства аргиродитов $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) и др. К настоящему времени наивысшую σ_i при комнатной температуре ($2 \text{ мОм}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) имеет состав $\text{Li}_{9,54}\text{Si}_{1,74}\text{P}_{1,44}\text{S}_{11,7}\text{C}_{10,3}$. Высокое значение σ_i обнаружено в Na-ионных сульфидах, таких как Na_3PS_4 , Na_3PSe_4 , Na_3SbS_4 , $\text{Na}_{10}\text{SnP}_2\text{S}_{12}$. Высокопроводящие Li^+ -проводники описаны в недавних работах [241, 242].

Среди исследований по синтезу/созданию материалов с высокой ионной проводимостью выделяются работы [243—248], посвященные более глубокому пониманию природы БИТ. При сопоставлении разных ионных проводников использование классификации $\lg \sigma_i - \lg \sigma_e$ [249, 250] и термина ПСИП [8] (*advanced superionic conductors* [6, 7, 243, 244, 251, 252]) становится необходимым.

Ампер-часовая емкость гальванического Li-элемента (анод, ТЭ, катод), напряжение на клеммах, плотность энергии и мощности зависят в значительной степени от катода, с которым ионы лития реагируют при замыкании элемента на внешнюю

нагрузку. Катод должен обеспечить большие значения плотности тока (с единицы поверхности), заряда, энергии и мощности (с единицы объема). Современные катоды — гетерогенные композитные системы с БИТ на наномасштабе. В состав катодного композита входят: соединение, определяющее потенциал катода (например, LiCoO_2); ТЭ, который выполняет функцию быстрой доставки ионов Li^+ в зону реакции; и высокодисперсный углерод, который доставляет электроны для восстановления ионов лития. При замыкании твердотельного гальванического элемента на внешнюю нагрузку в объеме композитного катода происходят реакции с изменением химического состава и кристаллической структуры. Одна из стратегий увеличения стабильности рабочих характеристик катода — покрытие частиц потенциалобразующего соединения тонкой пленкой второго ТЭ [233]. Поэтому в наноионике активно развивается область R & D для создания наногетерогенных систем с БИТ, используемых в качестве рабочих электродов в Li-элементах [236, 237]. В последние годы для создания гибкой электроники разрабатываются полимерные компоненты для литиевых батарей [253].

Созданию устойчивых границ раздела, на которых протекают электрохимические реакции, в настоящее время уделяется большое внимание [233, 238—240]. Например, граничный импеданс может доминировать над внутренним сопротивлением в батарее. Особенно явно это проявляется для пар сульфидные электролиты и оксидные катоды [238—240]. Как подчеркнуто в обзорной статье [233], предсказание продуктов реакции на границе — трудная задача, поскольку термодинамические и кинетические факторы реакций на границе находятся в сложных соотношениях [254—256]. Методы компьютерного моделирования рассматриваемых объектов значительно сузили разрыв между экспериментальными данными и теоретическими расчетами [233, 257, 258]. Например, теоретические оценки оказались успешными в ряде предсказаний о возможных продуктах разложения и электрохимических окнах стабильности ТЭ [233, 257], что может служить руководством для целенаправленного граничного дизайна и разработки новых приборов с БИТ на гетеропереходах. Литиевые батареи — приемлемое временное решение для хранения энергии, генерируемой солнечными батареями или иными источниками "зеленого" электричества. В долговременной перспективе они уступят место каким-то другим системам, использующим более дешевые (не Li-содержащие) компоненты.

Большое внимание за рубежом уделяют разработкам твердотельных топливных элементов

[39, 159, 176, 259—261], имеющих высокий КПД. В топливном элементе пористые катод и анод разделяет ионопроводящая мембрана. В простейшей конструкции топливом служит газообразный водород, он подается в пространство анода, возникающие ионы H^+ через протонный проводник (мембрана) поступают в пространство катода, на который подается окислитель — газообразный кислород. При работе элемента вырабатывается электрическая энергия, а в результате токообразующей реакции выделяется вода. Мембраны могут быть с проводимостью по катионам или анионам. Топливные элементы с твердооксидными мембранами (SOFCs) функционируют при температурах 600—1000 °C, что позволяет использовать различные типы топлива и окислителя. В этом случае ТЭ — тонкий слой оксида металла (например, керамика на основе оксидов иттрия и циркония) с проводимостью по ионам кислорода. Разрабатываются низкотемпературные оксидные топливные элементы (LT-SOFCs) [159, 176, 261]. В работе [261] отмечено, что применение наноматериалов (наночастицы, тонкие пленки, нанокомпозиты, микроструктуры, нанодисперсные катализаторы) и нанотехнологий значительно повысило эффективность LT-SOFCs, что связано с увеличением внутренней площади поверхности, доступной для контакта реагентов, и уникальными свойствами границ раздела в наноматериалах по сравнению с микроструктурными аналогами.

Гетеропереходы различных типов — основной рабочий элемент практически всех наноионных приборов. Поэтому цель многих работ — изучение влияния граничной структуры, внешних и внутренних факторов (химический состав, механические напряжения, дефектность кристаллической структуры, электрические и магнитные поля и др.) на протекающие процессы [233]. Однако вопрос об ионном транспорте вдоль и поперек гомо- и гетерофазных границ в разных типах ионопроводящих материалов является до сих пор дискуссионным.

В России тоже разрабатывают компоненты и технологии для литиевых батарей и топливных элементов. Применение наноматериалов обеспечивает увеличение скорости заряд/разряд, повышение мощности/емкости и замедление деградации литиевых аккумуляторов [262]. Для синтеза керамических материалов с высокой проводимостью по ионам лития и кислорода предложена новая стратегия оптимизации структурных параметров ионных проводников [156, 263]. Стратегия основана на принципах наноионики и базируется на сочетании размерных эффектов, ведущих к аморфизации граничной области. Для этого используют компоненты с несоразмерными кристаллическими

решетками. Подобные эффекты следует ожидать для особых фаз, формирующихся в эвтектиках.

Заключение

В настоящей работе впервые в отечественной литературе представлен обзор публикаций зарубежных авторов по сравнительно новой научной дисциплине — наноионике, термин и концепция которой впервые были введены в научный тезаурус в нашей стране в 1992—1993 гг. [1]. Представленный в работе достаточно обширный список литературы включает в основном работы, в которых термин "наноионика" фигурирует в названии, аннотации и ключевых словах. Авторы выделенных работ отличаются *"thinking towards nanoionics"*, т. е. применение теории ионного транспорта на наномасштабе.

Как любая наука, наноионика развивается путем фундаментальной и прикладной исследовательской деятельности. В этой части обзора представлен панорамный взгляд на развитие наноионики за рубежом, начиная с первой работы 1996 г. [28].

В 2000-х годах термин "наноионика" распространяется за рубежом, становится темой конференций, попадает в область интересов ученых, студенческих курсов, исследовательских школ, передовых технологий и т. д. Критически заметим, что в России наноионика долгие годы не имела масштабной поддержки, даже в 2020 г., у нас в стране нет ни одной лаборатории по наноионике (например, в Вильнюсском университете такая лаборатория действует). В 2015 г. в англоязычной литературе появляется первый учебник для студентов по ионике твердого тела, где есть отдельная глава "Наноионика" [264].

Примером успешной деятельности системы стратегического инновационного менеджмента в области наноионики является долговременная государственная программа Японии «*The Grant-in-Aids for Priority Area on "Nanoionics (439)"*» [191], которая позволила создать в Японии мощные научное сообщество и инфраструктуру. Известное научное изобретение японских ученых — атомный переключатель [168, 213] — наноионный прибор, на основе которого могут быть разработаны высокоплотные матричные массивы перезаписываемой памяти. Изобретение атомного переключателя в 2005 г. [213] предшествовало буму в исследованиях, который начался через несколько лет. В 2008 г. в США было объявлено о создании мемристоров [166, 208] — приборов с функцией памяти. В настоящее время это направление активно развивается. Новая парадигма названа нейроморфным компьютерингом и имеет аналогом нейроморфные структуры мозга [63]. Ожидается, что новые подходы произведут переворот в повышении эффек-

тивности вычислений и создании искусственного интеллекта, способного распознавать сложные образы и смыслы.

Среди активно развиваемых в мире прикладных направлений наноионики — ион-литиевые батареи и топливные элементы [159, 176, 233, 261], сфера применения которых непрерывно расширяется. На их основе работает портативная электроника, устройства микро- и наносистемной техники и др. Области R & D включают поиски новых высокопроводящих Li^+ -проводников, включая полимерные компоненты, разработку наноструктурированных материалов с БИТ на наномасштабе для анодов и катодов. Основные характеристики батарей и конденсаторов микро- и наноразмеров определяют границы, на которых протекают электрохимические реакции. Гетеропереходы различных типов — основной рабочий элемент практически всех наноприборов. Поэтому при разработках высокоэффективных твердотельных наноионных приборов большое внимание уделяется созданию устойчивых низкоэнергетических гомо- и гетерофазных границ.

В этой части обзора дано развернутое определение наноионики как нового научного направления. Критически анализируются новые направления исследований, включающие наноионику, такие как наноархитектоника и ионитроника. На сравнительной основе обсуждается схема корректного введения новых научных направлений и терминов. Корректное введение новых терминов и понятий открывает большие возможности для генерации информации. Ценность информации — субъективна, так как определяется целью исследования. Новая информация ведет к корректировке цели и, следовательно, к эволюции ценности информации в тезаурусе. Долговременная стабильность процесса генерации информации в системе обеспечивается взаимовлиянием узлов "тезаурус — цель — новая информация — стратегический менеджмент", что создает развивающуюся информационную систему наноионики.

Авторы выражают благодарность ст. науч. сотр. ИПХФ РАН В. В. Ключареву за обсуждение ряда проблем и помощь в подборе литературы по теме обзора. Авторы благодарят гл. науч. сотрудника ИПТМ РАН, д-ра физ.-мат. наук С. И. Зайцева за длительную резкую критику направления "наноионика", что не остановило ее развитие, но, напротив, интенсифицировало поиски новых возможностей и направлений.

Работа выполнена по госзаданию № 075-00-920-20-00.

Список литературы

1. Despotuli A. L., Nikolaichik V. I. A step towards nanoionics // Solid State Ionics. 1993. Vol. 60. P. 275—278.
2. Чернавский Д. С. Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М.: Либроком, 2004. 300 с.
3. Гольдштейн Г. Я. Стратегический инновационный менеджмент. Таганрог: ТРТУ, 2004. 267 с.
4. ГОСТ Р 54147—2010. Стратегический и инновационный менеджмент. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011. 28 с.
5. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Наноионика — развивающаяся информационная система. Часть 1. Этапы становления и современное состояние наноионики в России // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 8. С. 403—414.
6. Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B. Nanoionics of advanced superionic conductors // Ionics. 2005. Vol. 11. P. 306—314.
7. Andreeva A. V., Despotuli A. L. Interface design in nanosystems of advanced superionic conductors // Ionics. 2005. Vol. 11. P. 152—160.
8. Деспотули А. Л., Андреева А. В., Рамбабу Б. Наноионика — основа создания новых приборов для МСТ // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 2. С. 5—13.
9. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Создание новых типов твердотельных суперконденсаторов для микросистемной техники и микро(нано)электроники. Часть 1 // Микросистемная техника. 2003. № 11. С. 2—10.
10. Despotuli A. L., Andreeva A. V. Nanoionics: new materials and supercapacitors // Nanotechnol. Russ. 2010. Vol. 5. P. 506—520.
11. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Перспективы развития в России глубоко-субвольтовой наноэлектроники и связанных с ней технологий // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 10. С. 2—11.
12. Despotuli A. L., Andreeva A. V. A short review on deep-sub-voltage nanoelectronics and related technologies // Int. J. Nanosci. 2009. Vol. 8. P. 389—402.
13. Despotuli A. L., Andreeva A. V. "Advanced carbon nanostructures" for "advanced supercapacitors": What does it mean? // Nanosci. Nanotechnol. Lett. 2011. Vol. 3. P. 119—124.
14. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Модель, метод и формализм нового подхода к описанию процессов ионного транспорта на блокирующих гетеропереходах твердый электролит/электронный проводник // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 9. С. 16—21.
15. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Моделирование на суб-нанометровом масштабе ион-транспортных характеристик блокирующих гетеропереходов электронный проводник/твердый электролит // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 11. С. 15—23.
16. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Ток смещения Максвелла в наноионике и собственные ион-транспортные свойства модельных 1D-наноструктур // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 8. С. 2—9.
17. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Ток смещения Максвелла и "универсальный" динамический отклик в наноионике // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 5. С. 3—10.
18. Despotuli A. L., Andreeva A. V. Maxwell displacement current and nature of Jonscher's "universal" dynamic response in nanoionics // Ionics. 2015. Vol. 21. P. 459—469.
19. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Эффективное электростатическое поле в структурно-динамическом подходе наноионики // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 1. С. 14—24.
20. Despotuli A. L., Andreeva A. V. Method of uniform effective field in structure-dynamic approach of nanoionics // Ionics. 2016. Vol. 22. P. 1291—1298.
21. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Размерные факторы и нелинейные процессы в структурно-динамическом подходе наноионики // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 6. С. 338—352.

22. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Dimensional factor and reciprocity theorem in structure-dynamic approach of nanoionics // *Ionics*. 2018. Vol. 24. P. 237–241.
23. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Spatial averaging of electrostatic potential differences in layered nanostructures with ionic hopping conductivity // *J. Electroanal. Chem.* 2018. Vol. 829. P. 1–6.
24. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Structure-dynamic approach of nanoionics. // In *21st Century Nanoscience. A Handbook. Exotic Nanostructures and Quantum Systems*. Ed. by K. D. Sattler. Boca Raton, CRC Press, 2020. Chapter 9.
25. **Andreeva A. V., Despotuli A. L.** New geometry and properties of advanced superionic conductors. In *Proceeding 11th International Conference on Nanomaterials — Research & Application*, Brno, Czech Republic, EU, October 16th–18th 2019, 2020. P. 48–53.
26. **Andreeva A. V., Despotuli A. L.** Universal dynamic response in polycrystals of advanced superionic conductors // *J. Mat. Sci.* 2020. Vol. 55. P. 10375.
27. **Holton G.** Werner Heisenberg and Albert Einstein // *Phys. Today*. 2000. Vol. 53. P. 38–42.
28. **Maier J.** Crystalline solid electrolytes and defect chemistry: Some novel thermodynamic and kinetic results // *Solid State Ionics*. 1996. Vol. 86–88. Part 1. P. 55–67.
29. **Maier J.** Pushing nanoionics to the limits: charge carrier chemistry in extremely small systems // *Chem. Mater.* 2014. Vol. 26. P. 348–360.
30. **Lehovec K.** Space-charge layer and distribution of lattice defects at the surface of ionic crystals // *J. Chem. Phys.* 1953. Vol. 21. P. 1123–1128.
31. **Tarancón A., Morata A.** New insights into the origin of the oxide ionic diffusion change in strained lattices of yttria stabilized zirconia // *Comput. Mater. Sci.* 2015. Vol. 103. P. 206–215.
32. **Göbel M. C., Gregori G., Maier J.** Electronically blocking grain boundaries in donor doped cerium dioxide // *Solid State Ionics*. 2012. Vol. 215. P. 45–51.
33. **Hyodo J., Ida S., Kilner J. A., Ishihara T.** Electronic and oxide ion conductivity in $\text{Pr}_2\text{Ni}_{0.71}\text{Cu}_{0.24}\text{Ga}_{0.05}\text{O}_4/\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_2$ laminated film // *Solid State Ionics*. 2013. Vol. 230. P. 16–20.
34. **Maier J.** Nano-ionics: Trivial and non-trivial size effects on ion conduction in solids // *Z. Phys. Chem. (NF)*. 2003. Vol. 217. P. 415–436.
35. **Tarancón A., Morata A., Pla D., Saranya A. M., Chiabrera F., Garbayo I., Cavallaro A., Canales-Vázquez J., Kilner J. A., Burriel M.** Grain Boundary Engineering to Improve Ionic Conduction in Thin Films for micro-SOFCs // *ECS Trans.* 2015. Vol. 69. P. 11–16.
36. **Elm M. T., Hofmann J. D., Suchomski C., Janek J., Brezesinski T.** Ionic conductivity of mesostructured yttria-stabilized zirconia thin films with cubic pore symmetry — On the influence of water on the surface oxygen ion transport // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2015. Vol. 7. P. 11792.
37. **Tiwari J. P., Rao C. R. K.** Template synthesized high conducting silver chloride Nanoplates // *Solid State Ionics*. 2008. Vol. 179. P. 299–304.
38. **Tong J., Subramaniyan A., Guthrey H., Clark D., Gorman B. P., O'Hayre R.** Electrical conductivities of nano ionic composite based on yttrium-doped barium zirconate and palladium metal // *Solid State Ionics*. 2012. Vol. 211. P. 26–33.
39. **Ya K. Z., Nbelayim P., Kikuchi T., Maegawa K., Kawamura G., Muto H., Matsuda A.** Effect of mixed alkali metal ions in highly proton conductive K/Cs-hydrogen sulfate-phosphotungstic acid composites prepared by mechanical milling // *Solid State Ionics*. 2019. Vol. 340. P. 115022.
40. **Liang C. C.** Conduction characteristics of the lithium iodide-aluminum oxide solid electrolytes // *J. Electrochem. Soc.* 1973. Vol. 120. P. 1289–1292.
41. **Schoonman J.** Nanoionics // *Solid State Ionics*. 2003. Vol. 157. P. 319–326.
42. **Chadwick A. V., Savin S. L. P.** Structure and dynamics in nanoionic materials // *Solid State Ionics*. 2006. Vol. 177. P. 3001–3008.
43. **Ahmad S. I., Mohammed T., Bahafi A., Suresh M. B.** Effect of Mg doping and sintering temperature on structural and morphological properties of samarium-doped ceria for IT-SOFC electrolyte // *Appl. Nanosci.* 2017. Vol. 7. P. 243–252.
44. **Rafique A., Ahmad M. A., Shakir I., Ali A., Abbas G., Javed M. S., Khan M. A., Raza R.** Multioxide phase-based nanocomposite electrolyte (M@SDC where $\text{M} = \text{Zn}^{2+}/\text{Ba}^{2+}/\text{La}^{3+}/\text{Zr}^{2+}/\text{Al}^{3+}$) materials // *Ceram. Int.* 2020. Vol. 46. P. 6882–6888.
45. **Ibaraki T., Tanaka M., Kawakami H.** Fast surface proton conduction on acid-doped polymer nanofibers in polymer electrolyte composite membranes // *Electrochim. Acta*. 2019. Vol. 296. P. 1042–1048.
46. **Purushothama J. M., Vena A., Sorli B., Perret E.** Electronically re-configurable, non-volatile, nano-ionics-based RF-switch on paper substrate for chipless RFID applications // *Technologies*. 2018. Vol. 6. P. 58.
47. **Vergentev T., Bانشchikov A., Filimonov A., Koroleva E., Sokolov N., Wurz M. C.** Longitudinal conductivity of $\text{LaF}_3/\text{SrF}_2$ multilayer heterostructures // *Sci. Technol. Adv.* 2016. Mater. Vol. 17. P. 799–806.
48. **Патент RU (11) 2 298 257 (13)** Суперконденсатор. 2005.
49. **Back J. D., Liu K. Y., Su P.-C.** A functional micro-solid oxide fuel cell with a 10 nm-thick freestanding electrolyte // *J. Mater. Chem. A*. 2017. Vol. 5. P. 18414–18419.
50. **Lefler B. M., Duchoň T., Karapetrov G., Wang J., Schneider C. M., May S. J.** Reconfigurable lateral anionic heterostructures in oxide thin films via lithographically defined topochemistry // *Phys. Rev. Materials*. 2019. Vol. 3. P. 073802.
51. **Koshmak K., Bانشchikov A., Ciano R., Orgiani P., Borgatti F., Panaccione G., Giglia A., Céolin D., Rueff J.-P., Sokolov N. S., Pasquali L.** Buried interfaces effects in ionic conductive $\text{LaF}_3 - \text{SrF}_2$ multilayers // *Adv. Mater. Interfaces*. 2017. Vol. 4. P. 1600875.
52. **Chen Y., Pryds N., Kleibecker J. E., Koster G., Sun J., Stamate E., Shen B., Rijnders G., Linderoth S.** Metallic and insulating interfaces of amorphous SrTiO_3 -based oxide heterostructures // *Nano Lett.* 2011. Vol. 11. P. 3774–3778.
53. **Peters A., Korte C., Hesse D., Zakharov N., Janek J.** Ionic conductivity and activation energy for oxygen ion transport in superlattices — The multilayer system $\text{CSZ} (\text{ZrO}_2 + \text{CaO})/\text{Al}_2\text{O}_3$ // *Solid State Ionics*. 2007. Vol. 178. P. 67–76.
54. **Sangwan V. K., Lee H.-S., Bergeron H., Balla I., Beck M. E., Chen K.-S., Hersam M. C.** Multi-terminal memtransistors from polycrystalline monolayer molybdenum disulfide // *Nature*. 2018. Vol. 554. P. 500–504.
55. **Zhu X., Du C., Jeong Y., Lu W. D.** Emulation of synaptic metaplasticity in memristors // *Nanoscale*. 2016. Vol. 9. P. 45–51.
56. **Wolf K., Ailavajhala M. S., Tenne D. A., Barnaby H., Kozicki M., Mitkova M.** Electron beam effects in Ge–Se thinfilms and resistance change memory devices // *Emerg. Mater. Res.* 2016. Vol. 5. P. 126–134.
57. **Kesharwani P., Sahu D. K., Mahipal Y. K., Agrawal R. C.** Conductivity enhancement in K^+ -ion conducting dry solid polymer electrolyte (SPE): [PEO: KNO₃]: A consequence of KI dispersal and nano-ionic effect // *Mater. Chem. Phys.* 2017. Vol. 193. P. 524–531.
58. **Hartmann P., Brezesinski T., Sann J., Lotnyk A., Eufinger J.-P., Kienle L., Janek J.** Defect chemistry of oxide nanomaterials with high surface area: ordered mesoporous thin films of the oxygen storage catalyst $\text{CeO}_2 - \text{ZrO}_2$ // *ACS Nano*. 2013. Vol. 7. P. 2999–3013.
59. **Nagata T., Haemori M., Chikyow T.** Combinatorial synthesis of $\text{Cu}/(\text{Ta}_x\text{Nb}_{1-x})_2\text{O}_5$ stack structure for nanoionics-type ReRAM device // *ACS Comb. Sci.* 2013. Vol. 15. P. 435–438.
60. **Saranya A. M., Morata A., Pla D., Burriel M., Chiabrera F., Garbayo I., Hornés A., Kilner J. A., Tarancón A.** Unveiling the outstanding oxygen mass transport properties of Mn-rich perovskites in grain boundary-dominated $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)_{0.85}\text{O}_{3 \pm \delta}$ nanostructures // *Chem. Mater.* 2018. Vol. 30. P. 5621–5629.
61. **Ishibe T., Maeda Y., Terada T., Naruse N., Mera Y., Kobayashi E., Nakamura Y.** Resistive switching memory performance in oxide hetero-nanocrystals with well-controlled interfaces // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2020. Vol. 21. P. 195–204.

62. Hayasaka Y., Matsui J., Miyashita T. Layered ultrathin ion conductive membrane using polymer nanosheet with amine group // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2013. Vol. 579. P. 17–21.
63. Thomas A. Memristor-based neural networks // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. Vol. 46. P. 093001.
64. Xue M., Wang K. L. Molecular rotor as switchers // *Sensors*. 2012. Vol. 12. P. 11612.
65. Deml A., Bunge A., Reznikov M., Kolessov A., O'Hayre R. Progress toward a solid-state ionic field effect transistor // *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 111. P. 074511.
66. Mahalanabis D., Gonzalez-Velo Y., Barnaby H. J., Kozicki M. N., Dandamudi P., Vruthula S. Impedance measurement and characterization of Ag-Ge₃₀Se₇₀ based programmable metallization cells // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2014. Vol. 61. P. 3723–3730.
67. Hasegawa T., Itoh Y., Tanaka H., Hino T., Tsuruoka T., Terabe K., Miyazaki H., Tsukagoshi K., Ogawa T., Yamaguchi S., Aono M. Volatile/nonvolatile dual-functional atom transistor // *Appl. Phys. Express*. 2011. Vol. 4. P. 015204.
68. Yang Y., Yin M., Yu Z., Wang Z., Zhang T., Cai Y., Lu W. D., Huang R. Multifunctional nanoionic devices enabling simultaneous heterosynaptic plasticity and efficient in memory boolean logic // *Adv. Electron. Mater.* 2017. Vol. 3. P. 1700032.
69. Yang R., Terabe K., Liu G., Tsuruoka T., Hasegawa T., Gimzewski J. K., Aono M. On-demand nanodevice with electrical and neuromorphic multifunction realized by local ion migration // *ACS Nano*. 2012. Vol. 6. P. 9515–9521.
70. Weber D., Vofely R., Chen Y., Mourzina Y., Poppe U. Variable resistor made by repeated steps of epitaxial deposition and lithographic structuring of oxide layers by using wet chemical etchants // *Thin Solid Films*. 2013. Vol. 533. P. 43–47.
71. Thoma K.-A. T. Problems and the progress made in modeling devices based on ionic materials // *Russ. J. Electrochem.* 2009. Vol. 45. P. 693–698.
72. Zhang Z., Wang Y., Luo Y., He Y., Ma M., Yang R., Li H. Electrochemical metallization cell with anion supplying active electrode // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8. P. 12617.
73. Zhu X., Zhou J., Chen L., Guo S., Liu G., Li R.-W., Lu W. D. In-situ nanoscale electric field control of magnetism by nanoionics // *Adv. Mater.* 2016. Vol. 28. P. 7658–7665.
74. Nikolaichik V. I., Despotuli A. L. Electron beam writing in thin films of highly conducting solid electrolytes RbAg₄I₃ and CsAg₄Br_{3-x}I_{2+x} // *Phil. Mag. Lett.* 1993. Vol. 67. P. 19–24.
75. Doroshkevych O. S., Shylo A. V., Kirillov A. K., Saprykina A. V., Danilenko I. A., Troitskiy G. A., Konstantinova T. E., Zelenyuk T. Y. Magnetically induced electrokinetic phenomena in the surface layers of zirconia nanoparticles // *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015. Vol. 9. P. 564–572.
76. Chen C.-C., Maier J. Decoupling electron and ion storage and the path from interfacial storage to artificial electrodes // *Nature Energy*. 2018. Vol. 3. P. 102–108.
77. Sahoo S., Manoravi P., Prabaharn S. R. S. Titania based nano-ionic memristive crossbar arrays: Fabrication and resistive switching characteristics // *Nanoscience and Nanotechnology — Asia*. 2019. Vol. 9. P. 486–493.
78. Frechero M. A., Rocci M., Sánchez-Santolino G., Kumar A., Salafranca J., Schmidt R., Díaz-Guillén M. R., Durá O. J., Rivera-Calzada A., Mishra R., Jesse S., Pantelides S. T., Kalinin S. V., Varela M., Pennycook S. J., Santamaria J., Leon C. Paving the way to nanoionics: atomic origin of barriers for ionic transport through interfaces // *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5. P. 17229.
79. Matsumoto H., Tanji T., Amezawa K., Kawada T., Uchimoto Y., Furuya Y., Sakai T., Matsuka M., Ishihara T. Nanoprotionics in perovskite-type oxides: Reversible changes in color and ion conductivity due to nanoionics phenomenon in platinum-containing perovskite oxide // *Solid State Ionics*. 2011. Vol. 182. P. 13–18.
80. Pilapil M. A., Pillai R. G., Freund M. S., Zhao J. H., Thomson D. J. Scaling and anisotropic conduction in electrochemically deposited polypyrrole hybrid junctions // *IEEE Electron Device Lett.* 2011. Vol. 32. P. 815–817.
81. Rainwater B. H., Velisavljevic N., Park C., Sun H., Waller G. H., Tsoi G. M., Vohra Y. K., Liu M. High pressure structural study of samarium doped CeO oxygen vacancy conductor — Insight into the dopant concentration relationship to the strain effect in thin film ionic conductors // *Solid State Ionics*. 2016. V. 292. P. 59–65.
82. Zhang R., Jha P. K., Cruz M. O. Non-equilibrium ionic assemblies of oppositely charged nanoparticles // *Soft Matter*. 2013. Vol. 9. P. 5042–5051.
83. Tsuchiya T., Kawamura K., Namiki W., Furuichi S., Takayanagi M., Minohara M., Kobayashi M., Horiba K., Kumigashira H., Terabe K. Resonant photoemission and X-ray absorption spectroscopies of lithiated magnetite thin film // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 56. P. 04CK01.
84. Xu X., Takada K., Watanabe K., Sakaguchi I., Akatsuka K., Hang B. T., Ohnishi T., Sasaki T. Self-organized core-shell structure for high-power electrode in solid-state lithium batteries // *Chem. Mater.* 2011. Vol. 23. P. 3798–3804.
85. Wagemaker M., Singh D. P., Borghols W. J. H., Lafont U., Haverkate L., Peterson V. K., Mulder F. M. Dynamic solubility limits in nanosized olivine LiFePO₄ // *J. Am. Chem. Soc.* 2011. Vol. 133. P. 10222–10228.
86. Thermadam S. P., Bhagat S. K., Alford T. L., Sakaguchi Y., Kozicki M. N., Mitkova M. Influence of Cu diffusion conditions on the switching of Cu—SiO₂-based resistive memory devices // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. P. 3293–3298.
87. Ohno T., Hasegawa T. Observation of a Ag protrusion on a Ag₂S island using a scanning tunneling microscope // *Results Phys.* 2015. Vol. 5. P. 182–183.
88. Despotuli A. L., Shestakov A. A., Lichkova N. V. An external electric field effect in electron-beam lithography of RbAg₄I₃ solid electrolyte film // *Solid State Ionics*. 1994. Vol. 70–71. Part 1. P. 130–133.
89. Kotomin E. A., Alexandrov V., Gryaznov D., Evarestov R. A., Maier J. Confinement effects for ionic carriers in SrTiO₃ ultrathin films: first-principles calculations of oxygen vacancies // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2011. Vol. 13. P. 923–926.
90. Pryds N., Esposito V. When two become one: An insight into 2D conductive oxide interfaces // *J. Electroceram.* 2017. Vol. 38. P. 1–23.
91. Tsuchiya T., Terabe K., Ochi M., Higuchi T., Osada M., Yamashita Y., Ueda S., Aono M. In situ tuning of magnetization and magnetoresistance in Fe₃O₄ thin film achieved with all-solid-state redox device // *ACS Nano*. 2016. Vol. 10. P. 1655–1661.
92. Tsuchiya T., Tsuruoka T., Terabe K., Aono M. In situ and nonvolatile photoluminescence tuning and nanodomain writing demonstrated by all-solid-state devices based on graphene oxide // *ACS Nano*. 2015. Vol. 9. P. 2102–2110.
93. Asano T., Kaneko Y., Omote A., Adachi H., Fujii E. Conductivity modulation of gold thin film at room temperature via all-solid-state electric-double-layer gating accelerated by nonlinear ionic transport // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. Vol. 9. P. 5056–5061.
94. Baumer C., Schmitz C., Marchewka A., Mueller D. N., Valenta R., Hackl J., Raab N., Rogers S. P., Khan M. I., Nemsak S., Shim M., Menzel S., Schneider C. M., Waser R., Dittmann R. Quantifying redox-induced Schottky barrier variations in memristive devices via in operando spectromicroscopy with graphene electrodes // *Nature Commun.* 2016. Vol. 7. P. 12398.
95. An H., Ohno T., Kanno Y., Kageyama Y., Monnai Y., Maki H., Shi J., Ando K. Current-induced magnetization switching using an electrically insulating spin-torque generator // *Sci. Adv.* 2018. Vol. 4. P. eaar2250.
96. Atesci H., Coneri F., Leeuwenhoek M., Bommer J., Seddon J. R. T., Hilgenkamp H., Van Ruitenbeek J. M. On the formation of a conducting surface channel by ionic-liquid gating of an insulator // *Ann. Phys.* 2018. Vol. 530. P. 1700449.
97. Soni R., Meuffels P., Petraru A., Hansen M., Ziegler M., Vavra O., Kohlstedt H., Jeong D. S. Bipolar switching polarity reversal by electrolyte layer sequence in electrochemical metallization cells with dual-layer solid electrolytes // *Nanoscale*. 2013. Vol. 5. P. 12598.

98. Waser R., Dittmann R., Staikov G., Szot K. Redox-based resistive switching memories — nanoionic mechanisms, prospects, and challenges // *Adv. Mater.* 2009. Vol. 21. P. 2632–2663.
99. Cho D.-Y., Tappertzhofen S., Waser R., Valov I. Chemically-inactive interfaces in thin film Ag/AgI systems for resistive switching memories // *Sci. Rep.* 2013. Vol. 3. P. 1169.
100. Tian X., Yang S., Zeng M., Wang L., Wei J., Xu Z., Wang W., Bai X. Bipolar electrochemical mechanism for mass transfer in nanoionic resistive memories // *Adv. Mater.* 2014. Vol. 26. P. 3649–3654.
101. Bagdzevicius S., Boudard M., Caicedo J. M., Rapenne L., Mescot X., Rodríguez-Lamas R., Robaut F., Santiso J., Burriel M. Superposition of interface and volume type resistive switching in perovskite nanoionic devices // *J. Mater. Chem. C.* 2019. Vol. 7. P. 7580–7592.
102. Tappertzhofen S., Mundelein H., Valov I., Waser R. Nanoionic transport and electrochemical reactions in resistively switching silicon dioxide // *Nanoscale.* 2012. Vol. 4. P. 3040–3043.
103. Valov I., Linn E., Tappertzhofen S., Schmelzer S., Hurk J., Lentz F., Waser R. // Nanobatteries in redox-based resistive switches require extension of memristor theory // *Nature Commun.* 2013. Vol. 4. P. 1771.
104. Shang D., Li P., Wang T., Carria E., Sun J., Shen B., Taubner T., Valov I., Waser R., Wuttig M. Understanding the conductive channel evolution in NaWO_3-x -based planar devices // *Nanoscale.* 2015. Vol. 7. P. 6023–6030.
105. Kawamura K., Tsuchiya T., Takayanagi M., Terabe K., Higuchi T. Electrical-pulse-induced resistivity modulation in Pt/TiO/Pt multilayer device related to nanoionics-based neuromorphic function // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 56. P. 06GH01.
106. Marchewka A., Roesgen B., Skaja K., Du H., Jia C.-L., Mayer J., Rana V., Waser R., Menzel S. Resistive switching memory: nanoionic resistive switching memories: On the physical nature of the dynamic reset process // *Adv. Electron. Mater.* 2016. Vol. 2. P. 1500233.
107. Tappertzhofen S., Valov I., Tsuruoka T., Hasegawa T., Waser R., Aono M. Generic relevance of counter charges for cation-based nanoscale resistive switching memories // *ACS Nano.* 2013. Vol. 7. P. 6396–6402.
108. Chen Y., Gerdes K., Navia S. A. P., Liang L., Hinerman A., Song X. Nanoionics for accelerating high-temperature electrochemical reactions in solid oxide // *Nano Lett.* 2019. Vol. 19. P. 8767–8773.
109. Wang Q., He D. Time-decay memristive behavior and diffusive dynamics in one forget process operated by a 3D vertical Pt/TaO_{5-x}/W device // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 822.
110. Mai V. H., Moradpour A., Senzier P. A., Pasquier C., Wang K., Rozenberg M. J., Giapintzakis J., Mihailescu C. N., Orfanidou C. M., Svoukis E., Breza A., Lioutas C. B., Franger S., Revcolevschi A., Maroutian T., Lecoeur P., Aubert P., Agnus G., Salot R., Albouy P. A., Weil R., Alamarguy D., March K., Jomard F., Chretien P., Schneegans O. Memristive and neuromorphic behavior in a Li_xCoO_2 nanobattery // *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5. P. 7761.
111. Chen G., Das S. Scaling laws and ionic current inversion in polyelectrolyte-grafted nanochannels // *J. Phys. Chem. B.* 2015. Vol. 119. P. 12714–12726.
112. White S. L., Banerjee P., Jain P. K. Liquid-like cationic sublattice in copper selenide clusters // *Nature Commun.* 2017. Vol. 8. P. 14514.
113. Maier J. Nanoionics: ionic charge carriers in small systems // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2009. Vol. 11. P. 3011–3022.
114. Prodromakis T., Peh B. P., Papavassiliou C., Tournazou C. Versatile memristor model with non-linear dopant kinetics // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2011. Vol. 58. P. 3099–3105.
115. Fish J. S., Li C.-P., Fehribach J. D., Wolden C. A., O'Hayre R., Bunge A. L., Goodyer C. E. Poisson–Boltzmann model of space charge layer effects on conductivity in randomly distributed nanoionic composites // *Electrochim. Acta.* 2012. Vol. 83. P. 454–462.
116. Takada K., Ohno T. Experimental and computational approaches to interfacial resistance in solid-state batteries // *Front. Energy Res.* 2016. Vol. 4. P. 10.
117. Amirsoleimani A., Shamsi J., Ahmadi M., Ahmadi A., Alirezazae S., Mohammadi K., Karami M. A., Yakopcic C., Kavehei O., Al-Sarawi S. Accurate charge transport model for nanoionic memristive devices // *Microelectronics J.* 2017. Vol. 65. P. 49–57.
118. Saremi M., Barnaby H. J., Edwards A., Koziński M. N. Analytical relationship between anion formation and carrier-trap statistics in chalcogenide glass films // *ECS Electrochem. Lett.* 2015. Vol. 4. P. H29–H31.
119. Sayle X. T., Cantoni M., Bhatta U. M., Parker S. C., Hall S. R., Möbus G., Molinari M., Reid D., Seal S., Sayle D. C. Strain and architecture-tuned reactivity in ceria nanostructures; enhanced catalytic oxidation of CO to CO₂ // *Chem. Mater.* 2012. Vol. 24. P. 1811–1821.
120. Alam N., Alam M. An analytical method for solving exact solutions of a nonlinear evolution equation describing the dynamics of ionic currents along microtubules // *J. Taibah Univ. Sci.* 2017. Vol. 11. P. 939–948.
121. Goodyer C. E., Fish J. S., Fehribach J. D., O'Hayre R., Bunge A. L. Modeling space charge layer interaction and conductivity enhancement in nanoionic composites // *Electrochim. Acta.* 2011. Vol. 56. P. 9295–9302.
122. Habasaki J., Leon C., Ngai K. L. Dynamics of Glassy, Crystalline and Liquid Ionic Conductors. Cham: Springer, 2017. 600 p.
123. Habasaki J. Molecular Dynamics of Nanostructures and Nanoionics. Jenny Stanford Publishing, 2020. 338 p.
124. Stevenson P., Gotz C., Baiz C. R., Akerboom J., Tokmakoff A., Vaziri A. Visualizing KcsA conformational changes upon ion binding by infrared spectroscopy and atomistic modeling // *J. Phys. Chem. B.* 2015. Vol. 119. P. 5824–5831.
125. Funke K. Is there a "universal" explanation for the "universal" dynamic response? // *Ber. Bunsen. Phys. Chem.* 1991. Vol. 95. P. 955–964.
126. Macdonald J. R. Comparison of the universal dynamic response power-law fitting model for conducting systems with superior alternative models // *Solid State Ionics.* 2000. Vol. 133. P. 79–97.
127. Despotuli A., Andreeva A. Fundamental and applied nanoionics in IMT RAS // In *Proceeding 11th International Conference on Nanomaterials — Research & Application*, Brno, Czech Republic, EU, October 16th–18th 2019, 2020. P. 32–37.
128. Joharia N. S. M., Adnan S. B. R. S., Ahmad N. Novel halloysite based nanoionic Na₂ZnSiO₄ solid electrolyte: Structural and electrical properties // *Ceram. Int.* 2020. Vol. 46. P. 20369–20375.
129. Lee S., MacManus-Driscall J. L. Research update: Fast and tunable nanoionic in vertically aligned nanostructured films // *APL Mater.* 2017. Vol. 5. P. 042304.
130. Chen Y., Gerdes K., Song X. Nanoionics and nanocatalysts: Conformal mesoporous surface scaffold for cathode of solid oxide fuel cells // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. P. 32977.
131. Song J., Wang C., Hinestroza J. P. Electrostatic assembly of core-corona silica nanoparticles onto cotton fibers // *Cellulose.* 2013. Vol. 20. P. 1727–1736.
132. Fan L. Solid-state electrolytes for SOFC // In *Solid Oxide Fuel Cells: From Electrolyte-Based to Electrolyte-Free Devices*. Eds. B. Zhu, R. Raza, L. Fan, C. Sun. Wiley-VCH, Verlag, 2020. P. 35–78.
133. Liu H., Dong Y., Cherukara M. J., Sasikumar K., Narayanan B., Cai Z., Lai B., Stan L., Hong S., Chan M. K. Y., Sankaranarayanan S. K. R. S., Zhou H., Fong D. D. Quantitative observation of threshold defect behavior in memristive devices with operando x-ray microscopy // *ACS Nano.* 2018. Vol. 12. P. 4938–4945.
134. Zeira A., Berson J., Feldman I., Maoz R., Sagiv J. A bipolar electrochemical approach to constructive lithography: metal/monolayer patterns via consecutive site-defined oxidation and reduction // *Langmuir.* 2011. Vol. 27. P. 8562–8575.
135. Stathopoulos S., Khiaat A., Trapatseli M., Cortese S., Serb A., Valov I., Prodromakis T. Multibit memory operation of metal-oxide bi-layer memristors // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 17532.
136. Niu G., Calka P., Maur M. A., Santoni F., Guha S., Frischke M., Hamoumou P., Gautier B., Perez E., Walczyk C., Wenger C., Carlo A. D., Alff L., Schroeder T. Geometric conductive filament confinement by nanotips for resistive switching of HfO₂-RRAM devices with high performance // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. P. 25757.

137. Berson J., Burshtain D., Zeira A., Yoffe A., Maoz R., Sagiv J. Single-layer ionic conduction on carboxyl-terminated silane monolayers patterned by constructive lithography // *Nat. Mater.* 2015. Vol. 14. P. 613–621.
138. Valov I., Sapezanskaia I., Nayak A., Tsuruoka T., Bredow T., Hasegawa T., Staikov G., Aono M., Waser R. Atomically controlled electrochemical nucleation at superionic solid electrolyte surfaces // *Nat. Mater.* 2012. Vol. 11. P. 530–535.
139. Chiabrera F., Garbayo I., López-Conesa L., Martín G., Ruiz-Cardad A., Walls M., Ruiz-González L., Kordatos A., Núñez M., Morata A., Estradé S., Chronos A., Peiró F., Tarancón A. Engineering transport in manganites by tuning local nonstoichiometry in grain boundaries // *Adv. Mater.* 2019. Vol. 31. P. 1805360.
140. Tian X., Wang L., Wei J., Yang S., Wang W., Xu Z., Bai X. Filament growth dynamics in solid electrolyte-based resistive memories revealed by in situ TEM // *Nano Res.* 2014. Vol. 7. P. 1065–1072.
141. Karlsson M. Neutron scattering of proton-conducting ceramics // In *Neutron Applications in Materials for Energy. Neutron Scattering Applications and Techniques*. Eds. G. Kearley, V. Pateron. Springer, 2015. P. 243–271.
142. Banerjee W., Hwang H. Evolution of 0.7 conductance anomaly in electric field driven ferromagnetic CuO junction based resistive random access memory devices // *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 116. P. 053502.
143. Nayak A., Unayama S., Tai S., Tsuruoka T., Waser R., Aono M., Valov I., Hasegawa T. Nanoarchitectonics for controlling the number of dopant atoms in solid electrolyte nanodots // *Adv. Mater.* 2018. Vol. 30. P. 1703261.
144. Takada K., Ohta N., Zhang L., Xu X., Hang B. T., Ohnishi T., Osada M., Sasaki T. Interfacial phenomena in solid-state lithium battery with sulfide solid electrolyte // *Solid State Ionics*. 2012. Vol. 225. P. 594–597.
145. Takada K., Ohta N., Zhang L., Fukuda K., Sakaguchi I., Ma R., Osada M., Sasaki T. Interfacial modification for high-power solid-state lithium batteries // *Solid State Ionics*. 2008. Vol. 179. P. 1333–1337.
146. Simonds B. J., Subramanian A., O'Hayre R., Taylor P. C. Conduction electron resonance used to determine size of palladium nanoparticles in proton conducting ceramics // *J. Magn. Reson.* 2012. Vol. 225. P. 58–61.
147. Yang Y., Zhang X., Qin L., Zeng Q., Qiu X., Huang R. Probing nanoscale oxygen ion motion in memristive systems // *Nat. Commun.* 2016. Vol. 8. P. 15173.
148. Wang W., Wang M., Ambrosi E., Bricalli A., Laudato M., Sun Z., Chen X., Ielmini D. Surface diffusion-limited lifetime of silver and copper nanofilaments in resistive switching devices // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10. P. 81.
149. Terabe K., Tsuchiya T., Yang R., Aono M. Nanoionic devices enabling a multitude of new features // *Nanoscale*. 2016. Vol. 8. P. 13873.
150. Maier J. Nanoionics: ion transport and electrochemical storage in confined systems // *Nat. Mater.* 2005. Vol. 4. P. 805–815.
151. Zhu X., Oug C. S., Xu X., Hu B., Shaug J., Yang H., Katlakanta S., Liu Y., Chen X., Pan L., Ding J., Li R.-W. Direct observations of lithium-ion transport under an electrical field in LiCoO_2 nanograins // *Sci. Rep.* 2013. Vol. 3. P. 1084.
152. Tsuchiya T., Ito K., Miyoshi S., Enoki M., Yamaguchi S. *In-Situ* monitoring of oxide ion induced breakdown in amorphous tantalum oxide films using acoustic emission measurement // *Mater. Trans.* 2014. Vol. 5. P. 1553–1556.
153. Pillai P. B., De Souza M. M. A nanoionics based three terminal synaptic device using Zinc Oxide // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. Vol. 9. P. 1609–1618.
154. Xue W., Li Y., Liu G., Wang Z., Xiao W., Jiang K., Zhong Z., Gao S., Ding J., Miao X., Xu X.-H., Li R.-W. Controllable and stable quantized conductance states in a $\text{Pt}/\text{HfO}_2/\text{ITO}$ memristor // *Adv. Electron. Mater.* 2019. Vol. 6. P. 1901055.
155. Bathe M., Chrissey L. A., Herr D. J. C., Lin Q., Rasic D., Woolley A. T., Zadegan R. M., Zhirnov V. V. Roadmap on biological pathways for electronic nanofabrication and materials // *Nano Future*. 2019. Vol. 3. P. 012001.
156. Pervov V. S., Ovchinnikova S. I., Medvedeva A. E., Maikhonina E. V., Kireeva N. V. Nanoionics: Principles of ceramic materials fabrication for electrochemical power generation // *Inorg. Mater.* 2016. Vol. 52. P. 83–88.
157. Tsuchiya T., Terabe K., Yang R., Aono M. Nanoionic devices: Interface nanoarchitectonics for physical property tuning and enhancement // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 55. P. 1102A4.
158. Al-Harashsheh M., Al-Jarrah M., Alrebaki M., Mayyas M. Nanoionic exchanger with unprecedented loading capacity of uranium // *Sep. Purif. Technol.* 2020. Vol. 238. P. 116423.
159. Fan L., Zhu B., Su P.-C., He C. Nanomaterials and technologies for low temperature solid oxide fuel cells: Recent advances, challenges and opportunities // *Nano Energy*. 2018. Vol. 45. P. 148–176.
160. Li X., Wu J., Pan Y. Preparation of nanostructured Cu/Zr metal mixed oxides via self-sustained oxidation of a CuZr binary amorphous alloy // *J. Mater. Sci. Technol.* 2019. Vol. 35. P. 1601–1606.
161. Etoh D., Tsuchiya T., Kitagawa Y., Takayanagi M., Itoh Y., Tsuruoka T., Higuchi T., Terabe K. A mesoporous SiO_2 thin films-based ionic decision-maker for solving multi-armed bandit problems // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 59. P. SIIG01.
162. Kitagawa Y., Tsuchiya T., Etoh D., Takayanagi M., Namiki W., Higuchi T., Terabe K. A graphene oxide-based ionic decision-maker for simple fabrication and stable operation // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 59. P. SIIG03.
163. Ma L., Fu C., Li L., Mayilvahanan K. S., Watkins T., Perdue B. R., Zavadil K. R., Helms B. A. Nanoporous polymer films with a high cation transference number stabilize lithium metal anodes in light-weight batteries for electrified transportation // *Nano Lett.* 2019. Vol. 19. P. 1387–1394.
164. Sanchez C., Boissière C., Grosso D., Laberty C., Nicole L. Design, synthesis, and properties of inorganic and hybrid thin films having periodically organized nanoporosity // *Chem. Mater.* 2008. Vol. 20. P. 682–737.
165. https://en.wikipedia.org/wiki/Nanoionic_device
166. Zhirnov V. V., Cavin R. K. Charge of the heavy brigade // *Nat. Nanotechnol.* 2008. Vol. 3. P. 377–378.
167. Kern K., Maier J. Nanoionics and nanoelectronics // *Adv. Mater.* 2009. Vol. 21. P. 2569.
168. Hino T., Hasegawa T., Terabe K., Tsuruoka T., Nayak A., Ohno T., Aono M. Atomic switches: atomic-movement-controlled nanodevices for new types of computing // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2011. Vol. 12. P. 013003.
169. Lu W., Jeong D. S., Kozicki M., Waser R. Electrochemical metallization cells-blending nanoionics into nanoelectronics? // *MRS Bull.* 2012. Vol. 37. P. 124–130.
170. Zhu X., Lee S. H., Lu W. D. Nanoionic resistive-switching devices // *Adv. Electron. Mater.* 2019. Vol. 5. P. 1900184.
171. Sahoo S., Prabakaran S. R. S. Nano-ionic solid state resistive memories (Re-RAM): A Review // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2017. Vol. 17. P. 72–86.
172. Terabe K., Hasegawa T., Liang C., Aono M. Control of local ion transport to create unique functional nanodevices based on ionic conductors // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2007. Vol. 8. P. 536–542.
173. Ventraa M. D., Pershin Y. V. Memory materials: a unifying description // *Mater. Today*. 2011. Vol. 14. P. 584–591.
174. Hasegawa T., Terabe K., Sakamoto T., Aono M. Nanoionics and its device applications // In *Oxford Handbook of Nanoscience and Technology: Volume 3: Applications*. Eds. A. V. Narlikar, Y. Y. Fu. Oxford: University Press, 2010. Chapter 8.
175. Fra V., Beccaria M., Milano G., Guastella S., Bianco S., Porro S., Laurenti M., Stassi S., Ricciardi C. Hydrothermally grown ZnO nanowire array as an oxygen vacancies reservoir for improved resistive switching // *Nanotechnology*. 2020. Vol. 31. P. 374001.
176. Garbayo I., Baiutti F., Morata A., Tarancón A. Engineering mass transport properties in oxide ionic and mixed ionic-electronic thin film ceramic conductors for energy applications // *J. Eur. Cer. Soc.* 2019. Vol. 39. P. 101–114.
177. Ielmini D., Ambrogio S. Emerging neuromorphic devices // *Nanotechnology*. 2020. Vol. 31. P. 092001.

178. **Nikam R. D., Kwak M., Lee J., Rajput K. G., Hwang H.** Controlled ionic tunneling in lithium nanoionic synaptic transistor through atomically thin graphene layer for neuromorphic computing // *Adv. Electron. Mater.* 2020. Vol. 6. P. 1901100.
179. **Shpack I. E., Mikhailova A. M., Efanova V. V., Dubrova T. V.** Coulometric reversibility of electrochemical nanoionic integrators with long-term memory // *Russ. J. Gen. Chem.* 2019. Vol. 89. P. 559–564.
180. **Wan T., Zhang L., Du H., Lin X., Qu B., Xu H., Li S., Chu D.** Recent developments in oxide-based ionic conductors: Bulk materials, nanoionics, and their memory applications // *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2018. Vol. 43. P. 47–82.
181. **Xiao J., Zhan H., Xu Z., Wang X., Zhang K., Xiong Z., Simon G. P., Liu Z., Li D.** Nanoconfined, dynamic electrolyte gating and memory effects in multilayered graphene-based membranes // *arXiv*: 1911.12948.
182. **Xiao K., Tu B., Chen L., Heil T., Wen L., Jiang L., Antonietti M.** Photo-driven ion transport for a photodetector based on an asymmetric carbon nitride nanotube membrane // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2019. Vol. 58. P. 12574–12579.
183. **Деспотули А. Л.** Наноионика (Наноэлионика)-02 // Заявка на выполнение проекта РФФИ № 96-02-17334-а.
184. **Sirisubtawee S., Koonprasert S.** Exact traveling wave solutions of certain nonlinear partial differential equations using the (G'/G^2) -expansion method // *Adv. Math. Phys.* 2018. Vol. 2018. P. 7628651.
185. **Prasad B., Pfanzelt G., Fillis-Tsirakis E., Zachman M. J., Kourkoutis L. F., Mannhart J.** Integrated circuits comprising patterned functional liquids // *Adv. Mater.* 2018. Vol. 30. P. 1802598.
186. **Zhan H., Xiong Z., Cheng C., Liang Q., Liu J. Z., Li D.** Solvation-involved nanoionics: New opportunities from 2D nanomaterial laminar membranes // *Adv. Mater.* 2020. Vol. 32. P. 1904562.
187. **Rao A., Kumar G. S., Roy S., Rajesh A. T., Devatha G., Pillai P. P.** Turn-on selectivity in inherently nonselective gold nanoparticles for Pb detection by preferential breaking of interparticle interactions // *ACS Appl. Nano Mater.* 2019. Vol. 2. P. 5625–5633.
188. **Beeck J. O., Labyedh N., Sepúlveda A., Spampinato V., Franquet A., Conard T., Vereecken P. M., Celano U.** Direct imaging and manipulation of ionic diffusion in mixed electronic–ionic conductors // *Nanoscale*. 2018. Vol. 10. P. 12564–12572.
189. **Gulina L. B., Weigler M., Privalov A. F., Kasatkina I. A., Groszewicz P. B., Murin I. V., Tolstoy V. P., Vogel M.** Morphological and dynamical evolution of lanthanum fluoride 2D nanocrystals at thermal treatment // *Solid State Ionics*. 2020. Vol. 352. P. 115354.
190. **Saeed S. W., Norby T., Bjurheim T. S.** First-principles analyses of nanoionic effects at oxide–oxide heterointerfaces for electrochemical applications // *J. Phys. Chem. C*. 2020. Vol. 124. P. 14072.
191. **Yamaguchi S.** Nanoionics — Present and future prospects // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2007. Vol. 8. P. 503.
192. **Valov I., Bartlett P. N.** Preface // *Faraday Discuss.* 2019. Vol. 213. P. 9.
193. **Terabe K., Hasegawa T., Nakayama T., Aono M.** Invention and development of the atomic switch // In *Atomic switch. From Invention to Practical Use and Future Prospects*. Ed. by M. Aono. Springer. 2020. P. 1–15.
194. **Zuo W., Polenovich V., Tolstoguzov A., Zeng X., Wnag Z., Song X., Gusev S. I., Tian C., Fu D.** Mechano-chemical synthesis of crystalline superionic conductor $\text{CsAg}_4\text{Br}_{3-x}\text{I}_{2+x}$ ($x = 0.32$) and its application for Ag^+ ion-beam generation // *J. Alloys Comp.* 2019. Vol. 790. P. 109–116.
195. **Zuo W., Polenovich V., Tolstoguzov A., Ieshkin A. E., Zeng X., Wnag Z., Gololobov G., Suvorov D., Liu C., Fu D., Hu D.** Ion emission from solid electrolyte $\text{CsAg}_4\text{Br}_{2.68}\text{I}_{2.32}$ film deposited on Ag-tip: Characteristics and applications // *Vacuum*. 2019. Vol. 167. P. 382–388.
196. <http://irds.ieee.org/>
197. **Sangwan V. K., Hersam M. C.** Neuromorphic nanoelectronic materials // *Nat. Nanotechnol.* 2020. Vol. 15. P. 517–528.
198. **Neupane G. P., Zhang L., Yildirim T., Zhou K., Wang B., Tang Y., Ma W., Xue Y., Lu Y.** A prospective future towards bio/medical technology and bioelectronics based on 2D vdWs heterostructures // *Nano Res.* 2020. Vol. 13. P. 1–17.
199. <https://www.src.org/library/publication/p095388/p095388.pdf>
200. <https://www.src.org/library/publication/p095387/p095387.pdf>
201. **Lee J.-S., Adams S., Maier J.** A mesoscopic heterostructure as the origin of the extreme ionic conductivity in $\text{AgI}:\text{Al}_2\text{O}_3$ // *Solid State Ionics*. 2000. Vol. 136–137. P. 1261–1266.
202. <https://home.adh.edu.pl/index.html>
203. **Maier J.** Defect chemistry and ion transport in nanostructured materials: Part II. Aspects of nanoionics // *Solid State Ionics*. 2003. Vol. 157. P. 327–334.
204. **Maier J.** Nano-ionics: More than just a fashionable slogan // *J. Electroceram.* 2004. Vol. 13. P. 593–598.
205. **Maier J.** Nanoionics: Fundamentals and applications // In *21st Century Nanoscience. A Handbook. Exotic Nanostructures and Quantum Systems*. Ed. by K. D. Sattler. Boca Raton, CRC Press, 2020. Chapter 8.
206. **Tsurui T., Katsumata T., Inaguma I.** Direct observations of La ordering and domain structures in $\text{La}_{0.6}\text{Li}_{0.17}\text{TiO}_3$ by high resolution electron microscopy // *Phys. Mag.* 2009. Vol. 89. P. 843–852.
207. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Nanoionics as a way towards new discoveries and applications // <https://ssrn.com/abstract=2981163>
208. **Williams R.** How we found the missing memristor // *IEEE Spectrum*. 2008. Vol. 45. P. 28–35.
209. **Wang Z., Wang L., Nagai M., Xie L., Yi M., Huang W.** Nanoionics-enabled memristive devices: strategies and materials for neuromorphic applications // *Adv. Electron. Mater.* 2017. Vol. 3. P. 1600510.
210. **Tsuruoka T., Hasegawa T., Terabe K., Aono M.** Operating mechanism and resistive switching characteristics of two- and three-terminal atomic switches using a thin metal oxide layer // *J. Electroceram.* 2017. Vol. 39. P. 143–156.
211. **Valov I., Yang Y.** Memristors with alloyed electrodes // *Nat. Nanotechnol.* 2020. Vol. 15. P. 510–511.
212. **Aono M.** Focus on materials nanoarchitectonics // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2011. Vol. 12. P. 040301.
213. **Terabe K., Hasegawa T., Nakayama T., Aono M.** Quantized conductance atomic switch // *Nature*. 2005. Vol. 433. P. 47–50.
214. **Costa-Krämer J. L., García N., García-Mochales P., Serenab P. A.** Nanowire formation in macroscopic metallic contacts: quantum mechanical conductance tapping a table top // *Surf. Sci.* 1995. Vol. 342. P. L1144–L1149.
215. **Chua L. O.** Memristor — The missing circuit element // *IEEE Trans. Circuits Theory*. 1971. Vol. 18. P. 507–519.
216. **Ariga K., Yamauchi Y.** Nanoarchitectonics from Atom to Life // *Chem. Asian. J.* 2020. Vol. 15. P. 718–728.
217. **Supramolecular Chemistry: From Molecules to Nanomaterials**. 8 Volume Set. Eds: J. W. Steed, P. A. Gale. Wiley, 2012.
218. **Дорфман В. Ф.** Синтез твердотельных структур. М.: Металлургия, 1986. 273 с.
219. **Ariga K., Aono M.** Nanoarchitectonics // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 55. P. 1102A6.
220. **Seeman N. C.** Nucleic acid junctions and lattice // *J. Theor. Biol.* 1982. Vol. 99. P. 237–247.
221. **Seeman N. C.** DNA nanotechnology: Novel DNA constructions // *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.* 1998. Vol. 27. P. 225–248.
222. **Nangreave J., Han D., Liu Y., Yan H.** DNA origami: a history and current perspective // *Curr. Opin. Chem. Biol.* 2010. Vol. 14. P. 608–615.
223. **Zhirnov V. V., Cavin R. K.** Microsystems for Bioelectronics. Scaling and Performance Limits. 2nd Edition / William Andrew: 2015. 300 p.
224. **Klyucharev V. V., Klyuchareva S. V.** The geometry of closed sets in the state of chemical transformation // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2015. Vol. 119. P. 1633–1651.
225. **Wan C., Xiao K., Angelin A., Antonietti M., Chen X.** The rise of bioinspired ionotronics // *Adv. Intell. Syst.* 2019. Vol. 1. P. 1900073.
226. **Shi L., Jia K., Gao Y., Yang H., Ma Y., Lu S., Gao G., Bu H., Lu T., Ding S.** Highly stretchable and transparent ionic

conductor with novel hydrophobicity and extreme-temperature tolerance // AAAS Research. 2020. Article ID 2505619.

227. **Bisri S. Z., Shimizu S., Nakano M., Iwasa Y.** Endeavor of iontronics: from fundamentals to applications of ion-controlled electronics // *Adv. Mater.* 2017. Vol. 29. P. 1607054.

228. **Chun H., Chung T. D.** Iontronics // *Annu. Rev. Anal. Chem.* 2015. Vol. 8. P. 441–462.

229. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bioelectronics>

230. **Wagemaker M., Mulder F. M.** Properties and promises of nanosized insertion materials for Li-ion batteries // *ACC Chem. Res.* 2013. Vol. 46, No. 5. P. 1206–1215.

231. **Liu Y., Vishniakou S., Yoo J., Dayeh S. A.** Engineering heteromaterials to control lithium ion transport pathways // *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5. P. 18482.

232. **Xu L., Tang S., Cheng Y., Wang K., Liang J., Liu C., Cao Y.-C., Wei F., Mai L.** Interfaces in solid-state lithium batteries // *Joule.* 2018. Vol. 2. P. 1991–2015.

233. **Xiao Y., Wang Y., Bo S.-H., Kim J. C., Miara L. J., Ceder G.** Understanding interface stability in solid-state batteries // *Nat. Rev. Mater.* 2020. Vol. 5. P. 105–126.

234. **Shi Y., Li B., Zhu Q., Shen K., Tang W., Xiang Q., Chen W., Liu C., Luo J., Yang S.** MXene-based mesoporous nanosheets toward superior lithium ion conductors // *Adv. Energy Mater.* 2020. P. 1903534.

235. **Sonia F. J., Aslam M., Mukhopadhyay A.** Understanding the processing-structure-performance relationship of graphene and its variants as anode material for Li-ion batteries: A critical review // *Carbon.* 2020. Vol. 156. P. 130–165.

236. **Liu Z., Zhang Y., Hao J., Zhu Y., Guo X., Li L., Sly G., Wang H.** Fast lithium ionic conductivity observed in LiI–MoS₂ composite // *Inorg. Chem. Commun.* 2020. Vol. 112. P. 107761.

237. **Youn D.-Y., Kim C., Cheong J. Y., Cho S.-H., Yoon K. R., Jung J.-W., Kim N.-H., Kim I.-D.** Stable and High-Capacity Si Electrodes with Free-Standing Architecture for Lithium-Ion Batteries // *ACS Appl. Energy Mater.* 2020. Vol. 3. P. 208–217.

238. **Sakuda A., Hayashi A., Tatsumisago M.** Interfacial observation between LiCoO₂ electrode and Li₂S–P₂S₅ solid electrolytes of all-solid-state lithium secondary batteries using transmission electron microscopy // *Chem. Mater.* 2010. Vol. 22. P. 949–956.

239. **Takada K.** Progress and perspective of solid-state lithium batteries // *Acta Mater.* 2013. Vol. 61. P. 759–770.

240. **Tian Y., Shi T., Richards W. D., Li J., Kim J. C., Bo S.-H., Ceder G.** Compatibility issues between electrodes and electrolytes in solid-state batteries // *Energy Environ. Sci.* 2017. Vol. 10. P. 1150–1166.

241. **Ghidiu M., Ruhl J., Culver S. P., Zeier W. G.** Solution-Based Synthesis of Lithium Thiophosphate Superionic Conductors for Solid-State Batteries: A Chemistry Perspective // *J. Mat. Chem. A.* 2019. Vol. 7. P. 17735–17753.

242. **Deng W., Li X., Shi W., Liu Q., Jiang J., Feng X.** Enhancing ionic conductivity of glass-type electrolyte by strategically increasing the concentration of charge carrier // *J. Alloys Comp.* 2020. Vol. 843. P. 155942.

243. **Zhao Y., Daemen L. L.** Superionic conductivity in lithium-rich anti-perovskites // *J. Am. Chem. Soc.* 2012. Vol. 134. P. 15042–15047.

244. **Xu Z., Chen X., Chen R., Li X., Zhu H.** Anion charge and lattice volume dependent lithium ion migration in compounds with fcc anion sublattices // *npj Comput. Mater.* 2020. Vol. 6. P. 47.

245. **Allan N. L., Stølen S., Mohn C. E.** Think locally — linking structure, thermodynamics and transport in grossly non-stoichiometric compounds and solid solutions // *J. Mater. Chem.* 2008. Vol. 18. P. 4124–4132.

246. **Burbano J. C., Lara D. P., Correa H.** Diffusion study for α -RbAg₄I₅ system by molecular dynamics // *Phys. Status Solidi B.* 2020. P. 1900730.

247. **Jørgensen M., Shea P. T., Tomich A. W., Varley J. B., Berckx M., Lovera S., Cerný R., Zhou W., Udovic T. J., Lavallo V.,**

Jensen T. R., Wood B. C., Stavila V. Understanding superionic conductivity in lithium and sodium salts of weakly coordinating closo-hexahalocarborate anions // *Chem. Mater.* 2020. Vol. 32. P. 1475–1487.

248. **Liang X., Jiang Y., Cai W., Wu S., Wang L.-Y., Lei Z., Chen J., Lei Y., Yang L., Feng J.** New Li₁₀GeP₂S₁₂ structure ordering and Li-ion dynamics unveiled in Li₄GeS₄–Li₃PS₄ superionic conductors: A solid-state nuclear magnetic resonance study // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2020. Vol. 12, No. 24. P. 27029–27036.

249. **Деспотули А. Л., Андреева А. В., Рамбабу Б.** Наноионика — основа создания новых приборов для МСТ. В кн. Нано-и микросистемная техника. От исследований к разработкам (Под ред. П. П. Мальцева). Техносфера, Москва, 2005. С. 72.

250. https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_ion_conductor

251. **Yoshinari N., Yamashita S., Fukuda Y., Nakazawa Y., Konno T.** Mobility of hydrated alkali metal ions in metallosupramolecular ionic crystals // *Chem. Sci.* 2019. Vol. 10. P. 587–593.

252. **Studeniyak I. P., Kranjcek M., Bilanchuk V. V., Kokhan O. P., Orliukas A. F., Kezionis A., Kazakevicius E., Salkus T.** Temperature variation of electrical conductivity and absorption edge in Cu₇GeSe₃I advanced superionic conductor // *J. Phys. Chem. Solids.* 2009. Vol. 70. P. 478–481.

253. **Zhao Y., Guo J.** Development of flexible Li-ion batteries for flexible electronics // *InfoMat.* 2020. Vol. 2. P. 866–878.

254. **Han F., Zhu Y., He X., Mo Y., Wang C.** Electrochemical stability of Li₁₀GeP₂S₁₂ and Li₇La₃Zr₂O₁₂ solid electrolytes // *Adv. Energy Mater.* 2016. Vol. 6. P. 1–9.

255. **Wu X., Villevieille C., Novák P., Kazzi M. E.** Monitoring the chemical and electronic properties of electrolyte–electrode interfaces in all-solid-state batteries using operando X-ray photoelectron spectroscopy // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2018. Vol. 20. P. 11123–11129.

256. **Tarhouchi I., Viallet V., Vinatier P., Ménétrier M.** Electrochemical characterization of Li₁₀SnP₂S₁₂: an electrolyte or a negative electrode for solid state Li-ion batteries? // *Solid State Ionics.* 2016. Vol. 296. P. 18–25.

257. **Hakari T., Dequchi M., Mitsuhashi K., Ohta T., Saito K., Uchimoto Y., Kowada Y., Hayashi A., Tatsumisago M.** Structural and electronic-state changes of a sulfide solid electrolyte during the Li deinsertion–insertion processes // *Chem. Mater.* 2017. Vol. 9. P. 4768–4774.

258. **Curtarolo S., Hart G. L. W., Nardelli M. B., Mingo N., Sanvito S., Levy O.** The high-throughput highway to computational materials design // *Nat. Mater.* 2013. Vol. 12. P. 191–201.

259. **Matsumoto H., Furuya Y., Okada S., Tanji T., Ishihara T.** Nanoionics phenomenon in proton-conducting oxide: Effect of dispersion of nanosize platinum particles on electrical conduction properties // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2007. Vol. 8. P. 531–535.

260. **Matsui J., Miyata H., Hanaoka Y., Miyashita T.** Layered ultrathin proton conductive film based on polymer nanosheet assembly // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2011. Vol. 3. P. 1394–1397.

261. **Regmi Y. N., Peng X., Fornaciari J. C., Wei M., Myers D. J., Weber A. Z., Danilovic N.** A low temperature unitized regenerative fuel cell realizing 60 % round trip efficiency and 10 000 cycles of durability for energy storage applications // *Energy Environ. Sci.* 2020. Vol. 13. P. 2096–2105.

262. **Ярославцев А. Б., Кулова Т. Л., Скундин Т. М.** Электродные наноматериалы для литий-ионных аккумуляторов // *Успехи химии.* 2015. Т. 84. Вып. 8. С. 826–852.

263. **Первов В. С., Махонина Е. В., Зотова А. Е., Киреева Н. В., Кедринский И.-М. А.** Новые возможности получения керамических наногетероструктур с повышенной ионной проводимостью // *Российские нанотехнологии.* 2014. Т. 9. Вып. 7–8. С. 1–7.

264. **Sunandana C. S.** Introduction to Solid State Ionics: Phenomenology and Applications. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2015. 529 p.

A. L. Despotuli, Ph. D., Senior Scientist, e-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru,
A. V. Andreeva, Dr. Sci., Prof., Leading Scientist,
Institution of Russian Academy of Sciences,
Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS 6, Academician Ossipyan str.,
Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia

Corresponding author:

Despotuli Alexandr L., Senior Scientist, Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS; 6,
Academician Ossipyan str, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia
E-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru

Nanoionics — the Developing Information System. Part 2. From the First Works to the Current State of Nanoionics Abroad

Received on October 05, 2020

Accepted on October 13, 2020

A critical review presents the stages of formation, development, and current state of nanoionics in Russia and the world. Nanoionics is considered as a developing information system; its history is analyzed in terms of dynamic information theory and in the frame of strategic innovation management.

The second part of the review presents in the brief form a panoramic view of nanoionics development abroad. An extended definition of the scientific direction of "nanoionics" is given. Since the foreign literature on the subject of the review is extensive, the results of works in which the term "nanoionics" appears in the title, annotations, and keywords are mainly considered. More detailed analysis is given of the works that have seriously influenced the development of nanoionics and will determine its future. The development of nanoionic devices with memory function, Li-ion batteries, and fuel cells is considered. The important role of the creation of stable interface boundaries in nanoionic devices (on which electrochemical reactions take place) is emphasized. New areas of research such as nanoarchitectonics and iontronics are critically analyzed. On a comparative basis, a scheme for the correct introduction of the new scientific term is proposed.

Keywords: nanoionics, nanoarchitectonics, iontronics, dynamic information theory, strategic innovation management, atomic switches, memristors, Li-ion batteries, fuel cells

For citation:

Despotuli A. L., Andreeva A. V. Nanoionics — the Developing Informative System. Part 2. From the First Works to the Current State of Nanoionics Abroad, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 9, pp. 463–484.

DOI: 10.17587/nmst.22.463-484

References

1. **Despotuli A. L., Nikolaichik V. I.** A step towards nanoionics, *Solid State Ionics*, 1993, vol. 60, pp. 275–278.
2. **Chernavskij D. S.** Sinergetika i informaciya. Dinamicheskaya teoriya informacii. Moscow, Librokom, 2004, 300 p. (in Russian).
3. **Gol'dshtejn G. Ya.** Strategicheskij innovacionnyj menedzhment. Taganrog, TRTU, 2004, 267 p. (in Russian).
4. **GOST R 54147–2010.** Strategicheskij i innovacionnyj menedzhment. Terminy i opredeleniya. Moscow, Standartinform, 2011, 28 p. (in Russian).
5. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Nanoionika — razvivayushchayasya informacionnaya sistema. Chast' 1. Etapy stanovleniya i sovremennoe sostoyanie nanoioniki v Rossii, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 8, pp. 403–414 (in Russian).
6. **Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B.** Nanoionics of advanced superionic conductors, *Ionics*, 2005, vol. 11, pp. 306–314.
7. **Andreeva A. V., Despotuli A. L.** Interface design in nanosystems of advanced superionic conductors, *Ionics*, 2005, vol. 11, pp. 152–160.
8. **Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B.** Nanoionika — osnova sozdaniya novyh priborov dlya MST, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2005, no. 2, pp. 5–13 (in Russian).
9. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Sozdanie novyh tipov tverdo elektrolitnykh superkondensatorov dlya mikrosistemnoj tekhniki i mikro(nano)elektroniki. Chast' 1, *Mikrosistemnaya tekhnika*, 2003, no. 11, pp. 2–10 (in Russian).
10. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Nanoionics: new materials and supercapacitors, *Nanotechnol. Russ.*, 2010, vol. 5, pp. 506–520.
11. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Perspektivy razvitiya v Rossii gluboko subvol'tovoj nanoelektroniki i svyazannyh s nej tekhnologij, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, no. 10, pp. 2–11 (in Russian).
12. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** A short review on deep-sub-voltage nanoelectronics and related technologies, *Int. J. Nanosci.*, 2009, vol. 8, pp. 389–402.
13. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** "Advanced carbon nanostructures" for "advanced supercapacitors": What does it mean?, *Nanosci. Nanotechnol. Lett.*, 2011, vol. 3, pp. 119–124.
14. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Model', metod i formalizm novogo podhoda k opisaniyu processov ionnogo transporta na blokiruyushchih geteroperekhodah tverdykh elektrolit/elektronnykh provodnikov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 9, pp. 16–21 (in Russian).
15. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Modelirovanie na sub-nanometrovom masshtabe ion-transportnykh harakteristik blokiruyushchih geteroperekhodov elektronnykh provodnikov/tverdykh elektrolit, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 11, pp. 15–23 (in Russian).
16. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Tok smeshcheniya Maksvela v nanoionike i sobstvennye ion-transportnye svoystva model'nykh 1D-nanostruktur, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 8, pp. 2–9 (in Russian).

17. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Tok smeshcheniya Maksvela i "universal'nyj" dinamicheskij otklik v nanoionike, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2014, no. 5, pp. 3–10 (in Russian).
18. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Maxwell displacement current and nature of Jonsher's "universal" dynamic response in nanoionics, *Ionics*, 2015, vol. 21, pp. 459–469.
19. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Effektivnoe elektrostaticheskoe pole v strukturno-dinamicheskom podkhode nanoioniki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 14–24 (in Russian).
20. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Method of uniform effective field in structure-dynamic approach of nanoionics, *Ionics*, 2016, vol. 22, pp. 1291–1298.
21. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Razmernye faktory i nelinejnye processy v strukturno-dinamicheskom podkhode nanoioniki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 338–352 (in Russian).
22. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Dimensional factor and reciprocity theorem in structure-dynamic approach of nanoionics, *Ionics*, 2018, vol. 24, pp. 237–241.
23. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Spatial averaging of electrostatic potential differences in layered nanostructures with ionic hopping conductivity, *J. Electroanal. Chem.*, 2018, vol. 829, pp. 1–6.
24. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Structure-dynamic approach of nanoionics, In *21st Century Nanoscience. A Handbook. Exotic Nanostructures and Quantum Systems*. Ed. by K. D. Sattler. Boca Raton, CRC Press, 2020. Chapter 9.
25. **Andreeva A. V., Despotuli A. L.** New geometry and properties of advanced superionic conductors, In *Proceeding 11th International Conference on Nanomaterials — Research & Application, Brno, Czech Republic, EU, October 16th–18th, 2019*, 2020, pp. 48–53.
26. **Andreeva A. V., Despotuli A. L.** Universal dynamic response in polycrystals of advanced superionic conductors, *J. Mat. Sci.*, 2020, vol. 55, pp. 10375.
27. **Holton G.** Werner Heisenberg and Albert Einstein, *Phys. Today*, 2000, vol. 53, pp. 38–42.
28. **Maier J.** Crystalline solid electrolytes and defect chemistry: Some novel thermodynamic and kinetic results, *Solid State Ionics*, 1996, vol. 86–88, part 1, pp. 55–67.
29. **Maier J.** Pushing nanoionics to the limits: charge carrier chemistry in extremely small systems, *Chem. Mater.*, 2014, vol. 26, pp. 348–360.
30. **Lehovec K.** Space-charge layer and distribution of lattice defects at the surface of ionic crystals, *J. Chem. Phys.*, 1953, vol. 21, pp. 1123–1128.
31. **Tarancón A., Morata A.** New insights into the origin of the oxide ionic diffusion change in strained lattices of yttria stabilized zirconia, *Comput. Mater. Sci.*, 2015, vol. 103, pp. 206–215.
32. **Göbel M. C., Gregori G., Maier J.** Electronically blocking grain boundaries in donor doped cerium dioxide, *Solid State Ionics*, 2012, vol. 215, pp. 45–51.
33. **Hyodo J., Ida S., Kilner J. A., Ishihara T.** Electronic and oxide ion conductivity in $\text{Pr}_2\text{Ni}_{0.71}\text{Cu}_{0.24}\text{Ga}_{0.05}\text{O}_4/\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_2$ laminated film, *Solid State Ionics*, 2013, vol. 230, pp. 16–20.
34. **Maier J.** Nano-ionics: Trivial and non-trivial size effects on ion conduction in solids, *Z. Phys. Chem. (NF)*, 2003, vol. 217, pp. 415–436.
35. **Tarancón A., Morata A., Pla D., Saranya A. M., Chiabrera F., Garbayo I., Cavallaro A., Canales-Vázquez J., Kilner J. A., Burriel M.** Grain Boundary Engineering to Improve Ionic Conduction in Thin Films for micro-SOFCs, *ECS Trans.*, 2015, vol. 69, pp. 11–16.
36. **Elm M. T., Hofmann J. D., Suchomski C., Janek J., Brezesinski T.** Ionic conductivity of mesostructured yttria-stabilized zirconia thin films with cubic pore symmetry — On the influence of water on the surface oxygen ion transport, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, vol. 7, pp. 11792.
37. **Tiwari J. P., Rao C. R. K.** Template synthesized high conducting silver chloride Nanoplates, *Solid State Ionics*, 2008, vol. 179, pp. 299–304.
38. **Tong J., Subramanian A., Guthrey H., Clark D., Gorman B. P., O'Hayre R.** Electrical conductivities of nano ionic composite based on yttrium-doped barium zirconate and palladium metal, *Solid State Ionics*, 2012, vol. 211, pp. 26–33.
39. **Ya K. Z., Nbelayim P., Kikuchi T., Maegawa K., Kawamura G., Muto H., Matsuda A.** Effect of mixed alkali metal ions in highly proton conductive K/Cs-hydrogen sulfate-phosphotungstic acid composites prepared by mechanical milling, *Solid State Ionics*, 2019, vol. 340, pp. 115022.
40. **Liang C. C.** Conduction characteristics of the lithium iodide-aluminum oxide solid electrolytes, *J. Electrochem. Soc.*, 1973, vol. 120, pp. 1289–1292.
41. **Schoonman J.** Nanoionics, *Solid State Ionics*, 2003, vol. 157, pp. 319–326.
42. **Chadwick A. V., Savin S. L. P.** Structure and dynamics in nanoionic materials, *Solid State Ionics*, 2006, vol. 177, pp. 3001–3008.
43. **Ahmad S. I., Mohammed T., Bahafi A., Suresh M. B.** Effect of Mg doping and sintering temperature on structural and morphological properties of samarium-doped ceria for IT-SOFC electrolyte, *Appl. Nanosci.*, 2017, vol. 7, pp. 243–252.
44. **Rafique A., Ahmad M. A., Shakir I., Ali A., Abbas G., Javed M. S., Khan M. A., Raza R.** Multioxide phase-based nanocomposite electrolyte (M@SDC where $\text{M} = \text{Zn}^{2+}/\text{Ba}^{2+}/\text{La}^{3+}/\text{Zr}^{2+}/\text{Al}^{3+}$) materials, *Ceram. Int.*, 2020, vol. 46, pp. 6882–6888.
45. **Ibaraki T., Tanaka M., Kawakami H.** Fast surface proton conduction on acid-doped polymer nanofibers in polymer electrolyte composite membranes, *Electrochim. Acta*, 2019, vol. 296, pp. 1042–1048.
46. **Purushothama J. M., Vena A., Sorli B., Perret E.** Electronically re-configurable, non-volatile, nano-ionics-based RF-switch on paper substrate for chipless RFID applications, *Technologies*, 2018, vol. 6, p. 58.
47. **Vergentev T., Bانشchikov A., Filimonov A., Koroleva E., Sokolov N., Wurz M. C.** Longitudinal conductivity of $\text{LaF}_3/\text{SrF}_2$ multilayer heterostructures, *Sci. Technol. Adv.*, 2016, vol. 17, pp. 799–806.
48. [58] Patent RU (11) 2 298 257 (13) Superkondensator. 2005. (in Russian).
49. **Baek J. D., Liu K. Y., Su P.-C.** A functional micro-solid oxide fuel cell with a 10 nm-thick freestanding electrolyte, *J. Mater. Chem. A*, 2017, vol. 5, pp. 18414–18419.
50. **Lefler B. M., Duchoň T., Karapetrov G., Wang J., Schneider C. M., May S. J.** Reconfigurable lateral anionic heterostructures in oxide thin films via lithographically defined topochemistry, *Phys. Rev. Materials*, 2019, vol. 3, p. 073802.
51. **Koshmak K., Bانشchikov A., Ciancio R., Orgiani P., Borgatti F., Panaccione G., Giglia A., Céolin D., Rueff J.-P., Sokolov N. S., Pasquali L.** Buried interfaces effects in ionic conductive $\text{LaF}_3\text{—SrF}_2$ multilayers, *Adv. Mater. Interfaces*, 2017, vol. 4, p. 1600875.
52. **Chen Y., Pryds N., Kleibeuker J. E., Koster G., Sun J., Stamaté E., Shen B., Rijnders G., Linderöth S.** Metallic and insulating interfaces of amorphous SrTiO_3 -based oxide heterostructures, *Nano Lett.*, 2011, vol. 11, pp. 3774–3778.
53. **Peters A., Korte C., Hesse D., Zakharov N., Janek J.** Ionic conductivity and activation energy for oxygen ion transport in superlattices — The multilayer system $\text{CSZ} (\text{ZrO}_2 + \text{CaO})/\text{Al}_2\text{O}_3$, *Solid State Ionics*, 2007, vol. 178, pp. 67–76.
54. **Sangwan V. K., Lee H.-S., Bergeron H., Balla I., Beck M. E., Chen K.-S., Hersam M. C.** Multi-terminal memtransistors from polycrystalline monolayer molybdenum disulfide, *Nature*, 2018, vol. 554, pp. 500–504.
55. **Zhu X., Du C., Jeong Y., Lu W. D.** Emulation of synaptic metaplasticity in memristors, *Nanoscale*, 2016, vol. 9, pp. 45–51.
56. **Wolf K., Ailavajhala M. S., Tenne D. A., Barnaby H., Kozicki M., Mitkova M.** Electron beam effects in Ge—Se thinfilms and resistance change memory devices, *Emerg. Mater. Res.*, 2016, vol. 5, pp. 126–134.
57. **Kesharwani P., Sahu D. K., Mahipal Y. K., Agrawal R. C.** Conductivity enhancement in K^+ -ion conducting dry solid polymer electrolyte (SPE): [PEO: KNO_3]: A consequence of KI dispersal and nano-ionic effect, *Mater. Chem. Phys.*, 2017, vol. 193, pp. 524–531.

58. Hartmann P., Brezesinski T., Sann J., Lotnyk A., Eufinger J.-P., Kienle L., Janek J. Defect chemistry of oxide nanomaterials with high surface area: ordered mesoporous thin films of the oxygen storage catalyst $\text{CeO}_2\text{--ZrO}_2$, *ACS Nano*, 2013, vol. 7, pp. 2999–3013.
59. Nagata T., Haemori M., Chikyow T. Combinatorial synthesis of $\text{Cu}/(\text{Ta}_x\text{Nb}_{1-x})_2\text{O}_5$ stack structure for nanoionics-type ReRAM device, *ACS Comb. Sci.*, 2013, vol. 15, pp. 435–438.
60. Saranya A. M., Morata A., Pla D., Burriel M., Chiabrera F., Garbayo I., Hornés A., Kilner J. A., Tarancón A. Unveiling the outstanding oxygen mass transport properties of Mn-rich perovskites in grain boundary-dominated $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)_{0.85}\text{O}_{3\pm\delta}$ nanostructures, *Chem. Mater.*, 2018, vol. 30, pp. 5621–5629.
61. Ishibe T., Maeda Y., Terada T., Naruse N., Mera Y., Kobayashi E., Nakamura Y. Resistive switching memory performance in oxide hetero-nanocrystals with well-controlled interfaces, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2020, vol. 21, pp. 195–204.
62. Hayasaka Y., Matsui J., Miyashita T. Layered ultrathin ion conductive membrane using polymer nanosheet with amine group, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2013, vol. 579, pp. 17–21.
63. Thomas A. Memristor-based neural networks, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2013, vol. 46, p. 093001.
64. Xue M., Wang K. L. Molecular rotor as switchers, *Sensors*, 2012, vol. 12, p. 11612.
65. Deml A., Bunge A., Reznikov M., Kolessov A., O'Hayre R. Progress toward a solid-state ionic field effect transistor, *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 111, p. 074511.
66. Mahalanabis D., Gonzalez-Velo Y., Barnaby H. J., Kozicki M. N., Dandamudi P., Vrudhula S. Impedance measurement and characterization of $\text{Ag-Ge}_{30}\text{Se}_{70}$ based programmable metallization cells, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, vol. 61, pp. 3723–3730.
67. Hasegawa T., Itoh Y., Tanaka H., Hino T., Tsuruoka T., Terabe K., Miyazaki H., Tsukagoshi K., Ogawa T., Yamaguchi S., Aono M. Volatile/nonvolatile dual-functional atom transistor, *Appl. Phys. Express*, 2011, vol. 4, p. 015204.
68. Yang Y., Yin M., Yu Z., Wang Z., Zhang T., Cai Y., Lu W. D., Huang R. Multifunctional nanoionic devices enabling simultaneous heterosynaptic plasticity and efficient in-memory boolean logic, *Adv. Electron. Mater.*, 2017, vol. 3, p. 1700032.
69. Yang R., Terabe K., Liu G., Tsuruoka T., Hasegawa T., Gimzewski J. K., Aono M. On-demand nanodevice with electrical and neuromorphic multifunction realized by local ion migration, *ACS Nano*, 2012, vol. 6, pp. 9515–9521.
70. Weber D., Vofely R., Chen Y., Mourzina Y., Poppe U. Variable resistor made by repeated steps of epitaxial deposition and lithographic structuring of oxide layers by using wet chemical etchants, *Thin Solid Films*, 2013, vol. 533, pp. 43–47.
71. Thoma K.-A. T. Problems and the progress made in modeling devices based on ionic materials, *Russ. J. Electrochem*, 2009, vol. 45, pp. 693–698.
72. Zhang Z., Wang Y., Luo Y., He Y., Ma M., Yang R., Li H. Electrochemical metallization cell with anion supplying active electrode, *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, p. 12617.
73. Zhu X., Zhou J., Chen L., Guo S., Liu G., Li R.-W., Lu W. D. In-situ nanoscale electric field control of magnetism by nanoionics, *Adv. Mater.*, 2016, vol. 28, pp. 7658–7665.
74. Nikolaichik V. I., Despotuli A. L. Electron beam writing in thin films of highly conducting solid electrolytes RbAg_4I_5 and $\text{CsAg}_4\text{Br}_3 - x\text{I}_2 + x$, *Phil. Mag. Lett.*, 1993, vol. 67, pp. 19–24.
75. Doroshkevych O. S., Shylo A. V., Kirillov A. K., Saprykina A. V., Danilenko I. A., Troitskiy G. A., Konstantinova T. E., Zelenyak T. Y. Magnetically induced electrokinetic phenomena in the surface layers of zirconia nanoparticles, *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2015, vol. 9, pp. 564–572.
76. Chen C.-C., Maier J. Decoupling electron and ion storage and the path from interfacial storage to artificial electrodes, *Nature Energy*, 2018, vol. 3, pp. 102–108.
77. Sahoo S., Manoravi P., Prabaharn S. R. S. Titania based nano-ionic memristive crossbar arrays: Fabrication and resistive switching characteristics, *Nanoscience and Nanotechnology — Asia*, 2019, vol. 9, pp. 486–493.
78. Frechero M. A., Rocci M., Sánchez-Santolino G., Kumar A., Salafranca J., Schmidt R., Díaz-Guillén M. R., Durá O. J., Rivera-Calzada A., Mishra R., Jesse S., Pantelides S. T., Kalinin S. V., Varela M., Pennycook S. J., Santamaria J., Leon C. Paving the way to nanoionics: atomic origin of barriers for ionic transport through interfaces, *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, p. 17229.
79. Matsumoto H., Tanji T., Amezawa K., Kawada T., Uchimoto Y., Furuya Y., Sakai T., Matsuka M., Ishihara T. Nanoprotionics in perovskite-type oxides: Reversible changes in color and ion conductivity due to nanoionics phenomenon in platinum-containing perovskite oxide, *Solid State Ionics*, 2011, vol. 182, pp. 13–18.
80. Pilapil M. A., Pillai R. G., Freund M. S., Zhao J. H., Thomson D. J. Scaling and anisotropic conduction in electrochemically deposited polypyrrole hybrid junctions, *IEEE Electron Device Lett.*, 2011, vol. 32, pp. 815–817.
81. Rainwater B. H., Velisavljevic N., Park C., Sun H., Waller G. H., Tsoi G. M., Vohra Y. K., Liu M. High pressure structural study of samarium doped CeO oxygen vacancy conductor — Insight into the dopant concentration relationship to the strain effect in thin film ionic conductors, *Solid State Ionics*, 2016, vol. 292, pp. 59–65.
82. Zhang R., Jha P. K., Cruz M. O. Non-equilibrium ionic assemblies of oppositely charged nanoparticles, *Soft. Matter*, 2013, vol. 9, p. 5042–5051.
83. Tsuchiya T., Kawamura K., Namiki W., Furuichi S., Takayanagi M., Minohara M., Kobayashi M., Horiba K., Kumigashira H., Terabe K. Resonant photoemission and X-ray absorption spectroscopies of lithiated magnetite thin film, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 56, p. 04CK01.
84. Xu X., Takada K., Watanabe K., Sakaguchi I., Akatsuka K., Hang B. T., Ohnishi T., Sasaki T. Self-organized core-shell structure for high-power electrode in solid-state lithium batteries, *Chem. Mater.*, 2011, vol. 23, pp. 3798–3804.
85. Wagemaker M., Singh D. P., Borghols W. J. H., Lafont U., Haverkate L., Peterson V. K., Mulder F. M. Dynamic solubility limits in nanosized olivine LiFePO_4 , *J. Am. Chem. Soc.*, 2011, vol. 133, pp. 10222–10228.
86. Thermadam S. P., Bhagat S. K., Alford T. L., Sakaguchi Y., Kozicki M. N., Mitkova M. Influence of Cu diffusion conditions on the switching of Cu-SiO_2 -based resistive memory devices, *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, pp. 3293–3298.
87. Ohno T., Hasegawa T. Observation of a Ag protrusion on a Ag_2S island using a scanning tunneling microscope, *Results Phys.*, 2015, vol. 5, pp. 182–183.
88. Despotuli A. L., Shestakov A. A., Lichkova N. V. An external electric field effect in electron-beam lithography of RbAg_4I_5 solid electrolyte film, *Solid State Ionics*, 1994, vol. 70–71, part 1, pp. 130–133.
89. Kotomin E. A., Alexandrov V., Gryaznov D., Evarestov R. A., Maier J. Confinement effects for ionic carriers in SrTiO_3 ultrathin films: first-principles calculations of oxygen vacancies, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2011, vol. 13, pp. 923–926.
90. Pryds N., Esposito V. When two become one: An insight into 2D conductive oxide interfaces, *J. Electroceram.*, 2017, vol. 38, pp. 1–23.
91. Tsuchiya T., Terabe K., Ochi M., Higuchi T., Osada M., Yamashita Y., Ueda S., Aono M. In situ tuning of magnetization and magnetoresistance in Fe_3O_4 thin film achieved with all-solid-state redox device, *ACS Nano*, 2016, vol. 10, pp. 1655–1661.
92. Tsuchiya T., Tsuruoka T., Terabe K., Aono M. In situ and nonvolatile photoluminescence tuning and nanodomain writing demonstrated by all-solid-state devices based on graphene oxide, *ACS Nano*, 2015, vol. 9, pp. 2102–2110.
93. Asano T., Kaneko Y., Omote A., Adachi H., Fujii E. Conductivity modulation of gold thin film at room temperature via all-solid-state electric-double-layer gating accelerated by nonlinear ionic transport, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, vol. 9, pp. 5056–5061.
94. Baeumer C., Schmitz C., Marchewka A., Mueller D. N., Valenta R., Hackl J., Raab N., Rogers S. P., Khan M. I., Nemsak S., Shim M., Menzel S., Schneider C. M., Waser R., Dittmann R. Quantifying redox-induced Schottky barrier variations in memristive

devices via in operando spectromicroscopy with graphene electrodes, *Nature Commun.*, 2016, vol. 7, p. 12398.

95. An H., Ohno T., Kanno Y., Kageyama Y., Monnai Y., Maki H., Shi J., Ando K. Current-induced magnetization switching using an electrically insulating spin-torque generator, *Sci. Adv.*, 2018, vol. 4, p. eaar2250.

96. Atesci H., Coneri F., Leeuwenhoek M., Bommer J., Seddon J. R. T., Hilgenkamp H., Van Ruitenbeek J. M. On the formation of a conducting surface channel by ionic-liquid gating of an insulator, *Ann. Phys.*, 2018, vol. 530, p. 1700449.

97. Soni R., Meuffels P., Petraru A., Hansen M., Ziegler M., Vavra O., Kohlstedt H., Jeong D. S. Bipolar switching polarity reversal by electrolyte layer sequence in electrochemical metallization cells with dual-layer solid electrolytes, *Nanoscale*, 2013, vol. 5, p. 12598.

98. Waser R., Dittmann R., Staikov G., Szot K. Redox-based resistive switching memories — nanoionic mechanisms, prospects, and challenges, *Adv. Mater.*, 2009, vol. 21, pp. 2632–2663.

99. Cho D.-Y., Tappertzhofen S., Waser R., Valov I. Chemically-inactive interfaces in thin film Ag/AgI systems for resistive switching memories, *Sci. Rep.*, 2013, vol. 3, p. 1169.

100. Tian X., Yang S., Zeng M., Wang L., Wei J., Xu Z., Wang W., Bai X. Bipolar electrochemical mechanism for mass transfer in nanoionic resistive memories, *Adv. Mater.*, 2014, vol. 26, pp. 3649–3654.

101. Bagdzevicius S., Boudard M., Caicedo J. M., Rapenne L., Mescot X., Rodríguez-Lamas R., Robaut F., Santiso J., Burriel M. Superposition of interface and volume type resistive switching in perovskite nanoionic devices, *J. Mater. Chem. C.*, 2019, vol. 7, pp. 7580–7592.

102. Tappertzhofen S., Mundein H., Valov I., Waser R. Nanoionic transport and electrochemical reactions in resistively switching silicon dioxide, *Nanoscale*, 2012, vol. 4, pp. 3040–3043.

103. Valov I., Linn E., Tappertzhofen S., Schmelzer S., Hurk J., Lentz F., Waser R. Nanobatteries in redox-based resistive switches require extension of memristor theory, *Nature Commun.*, 2013, vol. 4, p. 1771.

104. Shang D., Li P., Wang T., Carria E., Sun J., Shen B., Taubner T., Valov I., Waser R., Wuttig M. Understanding the conductive channel evolution in Na:WO_{3-x}-based planar devices, *Nanoscale*, 2015, vol. 7, pp. 6023–6030.

105. Kawamura K., Tsuchiya T., Takayanagi M., Terabe K., Higuchi T. Electrical-pulse-induced resistivity modulation in Pt/TiO/Pt multilayer device related to nanoionics-based neuromorphic function, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 56, p. 06GH01.

106. Marchewka A., Roesgen B., Skaja K., Du H., Jia C.-L., Mayer J., Rana V., Waser R., Menzel S. Resistive switching memory: nanoionic resistive switching memories: On the physical nature of the dynamic reset process, *Adv. Electron. Mater.*, 2016, vol. 2, p. 1500233.

107. Tappertzhofen S., Valov I., Tsuruoka T., Hasegawa T., Waser R., Aono M. Generic relevance of counter charges for cation-based nanoscale resistive switching memories, *ACS Nano*, 2013, vol. 7, pp. 6396–6402.

108. Chen Y., Gerdes K., Navia S. A. P., Liang L., Hinerman A., Song X. Nanoionics for accelerating high-temperature electrochemical reactions in solid oxide, *Nano Lett.*, 2019, vol. 19, pp. 8767–8773.

109. Wang Q., He D. Time-decay memristive behavior and diffusive dynamics in one forget process operated by a 3D vertical Pt/Ta₂O₅-x/W device, *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, p. 822.

110. Mai V. H., Moradpour A., Senzier P. A., Pasquier C., Wang K., Rozenberg M. J., Giapintzakis J., Mihailescu C. N., Orfanidou C. M., Svoukis E., Breza A., Lioutas C. B., Franger S., Revcolevschi A., Maroutian T., Lecoer P., Aubert P., Agnus G., Salot R., Albouy P. A., Weil R., Alamarguy D., March K., Jomard F., Chretien P., Schneegans O. Memristive and neuromorphic behavior in a Li_xCoO₂ nanobattery, *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, p. 7761.

111. Chen G., Das S. Scaling laws and ionic current inversion in polyelectrolyte-grafted nanochannels, *J. Phys. Chem. B.*, 2015, vol. 119, pp. 12714–12726.

112. White S. L., Banerjee P., Jain P. K. Liquid-like cationic sublattice in copper selenide clusters, *Nature Commun.*, 2017, vol. 8, p. 14514.

113. Maier J. Nanoionics: ionic charge carriers in small systems, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2009, vol. 11, pp. 3011–3022.

114. Prodromakis T., Peh B. P., Papavassiliou C., Tounmazou C. Versatile memristor model with non-linear dopant kinetics, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2011, vol. 58, pp. 3099–3105.

115. Fish J. S., Li C.-P., Fehribach J. D., Wolden C. A., O'Hayre R., Bunge A. L., Goodyer C. E. Poisson–Boltzmann model of space charge layer effects on conductivity in randomly distributed nanoionic composites, *Electrochim. Acta*, 2012, vol. 83, pp. 454–462.

116. Takada K., Ohno T. Experimental and computational approaches to interfacial resistance in solid-state batteries, *Front. Energy Res.*, 2016, vol. 4, p. 10.

117. Amirsoleimani A., Shamsi J., Ahmadi M., Ahmadi A., Alirezadeh S., Mohammadi K., Karami M. A., Yakopcic C., Kavehei O., Al-Sarawi S. Accurate charge transport model for nanoionic memristive devices, *Microelectronics J.*, 2017, vol. 65, pp. 49–57.

118. Saremi M., Barnaby H. J., Edwards A., Kozicki M. N. Analytical relationship between anion formation and carrier-trap statistics in chalcogenide glass films, *ECS Electrochem. Lett.*, 2015, vol. 4, pp. H29–H31.

119. Sayle X. T., Cantoni M., Bhatta U. M., Parker S. C., Hall S. R., Möbus G., Molinari M., Reid D., Seal S., Sayle D. C. Strain and architecture-tuned reactivity in ceria nanostructures: enhanced catalytic oxidation of CO to CO₂, *Chem. Mater.*, 2012, vol. 24, pp. 1811–1821.

120. Alam N., Alam M. An analytical method for solving exact solutions of a nonlinear evolution equation describing the dynamics of ionic currents along microtubules, *J. Taibah Univ. Sci.*, 2017, vol. 11, pp. 939–948.

121. Goodyer C. E., Fish J. S., Fehribach J. D., O'Hayre R., Bunge A. L. Modeling space charge layer interaction and conductivity enhancement in nanoionic composites, *Electrochim. Acta*, 2011, vol. 56, pp. 9295–9302.

122. Habasaki J., Leon C., Ngai K. L. Dynamics of Glassy, Crystalline and Liquid Ionic Conductors, Cham, Springer, 2017, 600 p.

123. Habasaki J. Molecular Dynamics of Nanostructures and Nanoionics, Jenny Stanford Publishing, 2020, 338 p.

124. Stevenson P., Gotz C., Baiz C. R., Akerboom J., Tokmakoff A., Vaziri A. Visualizing KcsA conformational changes upon ion binding by infrared spectroscopy and atomistic modeling, *J. Phys. Chem. B.*, 2015, vol. 119, pp. 5824–5831.

125. Funke K. Is there a "universal" explanation for the "universal" dynamic response?, *Ber. Bunsen. Phys. Chem.*, 1991, vol. 95, pp. 955–964.

126. Macdonald J. R. Comparison of the universal dynamic response power-law fitting model for conducting systems with superior alternative models, *Solid State Ionics.*, 2000, vol. 133, pp. 79–97.

127. Despotuli A., Andreeva A. Fundamental and applied nanoionics in IMT RAS, In *Proceeding 11th International Conference on Nanomaterials — Research & Application, Brno, Czech Republic, EU, October 16th–18th 2019*, 2020, pp. 32–37.

128. Joharia N. S. M., Adnan S. B. R. S., Ahmad N. Novel halloysite based nanoionic Na₂ZnSiO₄ solid electrolyte: Structural and electrical properties, *Ceram. Int.*, 2020, vol. 46, pp. 20369–20375.

129. Lee S., MacManus-Driscall J. L. Research update: Fast and tunable nanoionic in vertically aligned nanostructured films, *APL Mater.*, 2017, vol. 5, p. 042304.

130. Chen Y., Gerdes K., Song X. Nanoionics and nanocatalysts: Conformal mesoporous surface scaffold for cathode of solid oxide fuel cells, *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, p. 32977.

131. Song J., Wang C., Hinestroza J. P. Electrostatic assembly of core-corona silica nanoparticles onto cotton fibers, *Cellulose*, 2013, vol. 20, pp. 1727–1736.

132. Fan L. Solid-state electrolytes for SOFC, In *Solid Oxide Fuel Cells: From Electrolyte-Based to Electrolyte-Free Devices*. Eds. B. Zhu, R. Raza, L. Fan, C. Sun. Wiley-VCH, Verlag, 2020, pp. 35–78.

133. Liu H., Dong Y., Cherukara M. J., Sasikumar K., Narayanan B., Cai Z., Lai B., Stan L., Hong S., Chan M. K. Y., Sanka-

- ranarayanan S. K. R. S., Zhou H., Fong D. D. Quantitative observation of threshold defect behavior in memristive devices with operando x-ray microscopy, *ACS Nano*, 2018, vol. 12, pp. 4938–4945.
134. Zeira A., Berson J., Feldman I., Maoz R., Sagiv J. A bipolar electrochemical approach to constructive lithography: metal/monolayer patterns via consecutive site-defined oxidation and reduction, *Langmuir*, 2011, vol. 27, pp. 8562–8575.
135. Stathopoulos S., Khat A., Trapatseli M., Cortese S., Serb A., Valov I., Prodromakis T. Multibit memory operation of metal-oxide bi-layer memristors, *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, p. 17532.
136. Niu G., Calka P., Maur M. A., Santoni F., Guha S., Frischke M., Hamoumou P., Gautier B., Perez E., Walczyk C., Wenger C., Carlo A. D., Alff L., Schroeder T. Geometric conductive filament confinement by nanotips for resistive switching of HfO₂-RRAM devices with high performance, *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, p. 25757.
137. Berson J., Burshtain D., Zeira A., Yoffe A., Maoz R., Sagiv J. Single-layer ionic conduction on carboxyl-terminated silane monolayers patterned by constructive lithography, *Nat. Mater.*, 2015, vol. 14, pp. 613–621.
138. Valov I., Sapezanskaia I., Nayak A., Tsuruoka T., Bredow T., Hasegawa T., Staikov G., Aono M., Waser R. Atomically controlled electrochemical nucleation at superionic solid electrolyte surfaces, *Nat. Mater.*, 2012, vol. 11, pp. 530–535.
139. Chiabrera F., Garbayo I., López-Conesa L., Martín G., Ruiz-Cardad A., Walls M., Ruiz-González L., Kordatos A., Núñez M., Morata A., Estradé S., Chronos A., Peiró F., Tarancón A. Engineering transport in manganites by tuning local nonstoichiometry in grain boundaries, *Adv. Mater.*, 2019, vol. 31, p. 1805360.
140. Tian X., Wang L., Wei J., Yang S., Wang W., Xu Z., Bai X. Filament growth dynamics in solid electrolyte-based resistive memories revealed by in situ TEM, *Nano Res.*, 2014, vol. 7, pp. 1065–1072.
141. Karlsson M. Neutron scattering of proton-conducting ceramics, In *Neutron Applications in Materials for Energy. Neutron Scattering Applications and Techniques*, Eds. G. Kearley, V. Paterson. Springer, 2015, pp. 243–271.
142. Banerjee W., Hwang H. Evolution of 0.7 conductance anomaly in electric field driven ferromagnetic CuO junction based resistive random access memory devices, *Appl. Phys. Lett.*, 2020, vol. 116, p. 053502.
143. Nayak A., Unayama S., Tai S., Tsuruoka T., Waser R., Aono M., Valov I., Hasegawa T. Nanoarchitectonics for controlling the number of dopant atoms in solid electrolyte nanodots, *Adv. Mater.*, 2018, vol. 30, p. 1703261.
144. Takada K., Ohta N., Zhang L., Xu X., Hang B. T., Ohnishi T., Osada M., Sasaki T. Interfacial phenomena in solid-state lithium battery with sulfide solid electrolyte, *Solid State Ionics*, 2012, vol. 225, pp. 594–597.
145. Takada K., Ohta N., Zhang L., Fukuda K., Sakaguchi I., Ma R., Osada M., Sasaki T. Interfacial modification for high-power solid-state lithium batteries, *Solid State Ionics*, 2008, vol. 179, pp. 1333–1337.
146. Simonds B. J., Subramaniam A., O'Hayre R., Taylor P. C. Conduction electron resonance used to determine size of palladium nanoparticles in proton conducting ceramics, *J. Magn. Reson.*, 2012, vol. 225, pp. 58–61.
147. Yang Y., Zhang X., Qin L., Zeng Q., Qiu X., Huang R. Probing nanoscale oxygen ion motion in memristive systems, *Nat. Commun.*, 2016, vol. 8, p. 15173.
148. Wang W., Wang M., Ambrosi E., Bricalli A., Laudato M., Sun Z., Chen X., Ielmini D. Surface diffusion-limited lifetime of silver and copper nanofilaments in resistive switching devices, *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, p. 81.
149. Terabe K., Tsuchiya T., Yang R., Aono M. Nanoionic devices enabling a multitude of new features, *Nanoscale*, 2016, vol. 8, p. 13873.
150. Maier J. Nanoionics: ion transport and electrochemical storage in confined systems, *Nat. Mater.*, 2005, vol. 4, pp. 805–815.
151. Zhu X., Oug C. S., Xu X., Hu B., Shaug J., Yang H., Katlakanta S., Liu Y., Chen X., Pan L., Ding J., Li R.-W. Direct observations of lithium-ion transport under an electrical field in Li₂CoO₂ nanograins, *Sci. Rep.*, 2013, vol. 3, p. 1084.
152. Tsuchiya T., Ito K., Miyoshi S., Enoki M., Yamaguchi S. In-Situ monitoring of oxide ion induced breakdown in amorphous tantalum oxide films using acoustic emission measurement, *Mater. Trans.*, 2014, vol. 5, pp. 1553–1556.
153. Pillai P. B., De Souza M. M. A nanoionics based three terminal synaptic device using Zinc Oxide, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, vol. 9, pp. 1609–1618.
154. Xue W., Li Y., Liu G., Wang Z., Xiao W., Jiang K., Zhong Z., Gao S., Ding J., Miao X., Xu X.-H., Li R.-W. Controllable and stable quantized conductance states in a Pt/HfO_x/ITO memristor, *Adv. Electron. Mater.*, 2019, vol. 6, p. 1901055.
155. Bathe M., Chrisey L. A., Herr D. J. C., Lin Q., Rasic D., Woolley A. T., Zidegan R. M., Zhirnov V. V. Roadmap on biological pathways for electronic nanofabrication and materials, *Nano Future*, 2019, vol. 3, p. 012001.
156. Pervov V. S., Ovchinnikova S. I., Medvedeva A. E., Makhonina E. V., Kireeva N. V. Nanoionics: Principles of ceramic materials fabrication for electrochemical power generation, *Inorg. Mater.*, 2016, vol. 52, pp. 83–88.
157. Tsuchiya T., Terabe K., Yang R., Aono M. Nanoionic devices: Interface nanoarchitectonics for physical property tuning and enhancement, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 55, p. 1102A4.
158. Al-Harashsheh M., Al-Jarrah M., Alrebaki M., Mayyas M. Nanoionic exchanger with unprecedented loading capacity of uranium, *Sep. Purif. Technol.*, 2020, vol. 238, p. 116423.
159. Fan L., Zhu B., Su P.-C., He C. Nanomaterials and technologies for low temperature solid oxide fuel cells: Recent advances, challenges and opportunities, *Nano Energy*, 2018, vol. 45, pp. 148–176.
160. Li X., Wu J., Pan Y. Preparation of nanostructured Cu/Zr metal mixed oxides via self-sustained oxidation of a CuZr binary amorphous alloy, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2019, vol. 35, pp. 1601–1606.
161. Etoh D., Tsuchiya T., Kitagawa Y., Takayanagi M., Itoh Y., Tsuruoka T., Higuchi T., Terabe K. A mesoporous SiO₂ thin film-based ionic decision-maker for solving multi-armed bandit problems, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2020, vol. 59, p. S11G01.
162. Kitagawa Y., Tsuchiya T., Etoh D., Takayanagi M., Namiki W., Higuchi T., Terabe K. A graphene oxide-based ionic decision-maker for simple fabrication and stable operation, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2020, vol. 59, p. S11G03.
163. Ma L., Fu C., Li L., Mayilvahanan K. S., Watkins T., Perdue B. R., Zavadil K. R., Helms B. A. Nanoporous polymer films with a high cation transference number stabilize lithium metal anodes in light-weight batteries for electrified transportation, *Nano Lett.*, 2019, vol. 19, pp. 1387–1394.
164. Sanchez C., Boissière C., Grosso D., Laberty C., Nicole L. Design, synthesis, and properties of inorganic and hybrid thin films having periodically organized nanoporosity, *Chem. Mater.*, 2008, vol. 20, pp. 682–737.
165. https://en.wikipedia.org/wiki/Nanoionic_device
166. Zhirnov V. V., Cavin R. K. Charge of the heavy brigade, *Nat. Nanotechnol.*, 2008, vol. 3, pp. 377–378.
167. Kern K., Maier J. Nanoionics and nanoelectronics, *Adv. Mater.*, 2009, vol. 21, p. 2569.
168. Hino T., Hasegawa T., Terabe K., Tsuruoka T., Nayak A., Ohno T., Aono M. Atomic switches: atomic-movement-controlled nanodevices for new types of computing, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2011, vol. 12, p. 013003.
169. Lu W., Jeong D. S., Kozicki M., Waser R. Electrochemical metallization cells-blending nanoionics into nanoelectronics?, *MRS Bull.*, 2012, vol. 37, pp. 124–130.
170. Zhu X., Lee S. H., Lu W. D. Nanoionic resistive-switching devices, *Adv. Electron. Mater.*, 2019, vol. 5, p. 1900184.
171. Sahoo S., Prabaharan S. R. S. Nano-ionic solid state resistive memories (Re-RAM): A Review, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2017, vol. 17, pp. 72–86.
172. Terabe K., Hasegawa T., Liang C., Aono M. Control of local ion transport to create unique functional nanodevices based on ionic conductors, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2007, vol. 8, pp. 536–542.
173. Ventraa M. D., Pershin Y. V. Memory materials: a unifying description, *Mater. Today*, 2011, vol. 14, pp. 584–591.

174. Hasegawa T., Terabe K., Sakamoto T., Aono M. Nanoionics and its device applications, *In Oxford Handbook of Nanoscience and Technology*, vol. 3, Applications. Eds. A. V. Narlikar, Y. Y. Fu. Oxford: University Press, 2010. Chapter 8.
175. Fra V., Beccaria M., Milano G., Guastella S., Bianco S., Porro S., Laurenti M., Stassi S., Ricciardi C. Hydrothermally grown ZnO nanowire array as an oxygen vacancies reservoir for improved resistive switching, *Nanotechnology*, 2020, vol. 31, p. 374001.
176. Garbayo I., Baiutti F., Morata A., Tarancón A. Engineering mass transport properties in oxide ionic and mixed ionic-electronic thin film ceramic conductors for energy applications, *J. Eur. Cer. Soc.*, 2019, vol. 39, pp. 101–114.
177. Ielmini D., Ambrogio S. Emerging neuromorphic devices, *Nanotechnology*, 2020, vol. 31, p. 092001.
178. Nikam R. D., Kwak M., Lee J., Rajput K. G., Hwang H. Controlled ionic tunneling in lithium nanoionic synaptic transistor through atomically thin graphene layer for neuromorphic computing, *Adv. Electron. Mater.*, 2020, vol. 6, p. 1901100.
179. Shpack I. E., Mikhailova A. M., Efanova V. V., Dubrova T. V. Coulometric reversibility of electrochemical nanoionic integrators with long-term memory, *Russ. J. Gen. Chem.*, 2019, vol. 89, pp. 559–564.
180. Wan T., Zhang L., Du H., Lin X., Qu B., Xu H., Li S., Chu D. Recent developments in oxide-based ionic conductors: Bulk materials, nanoionics, and their memory applications, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, 2018, vol. 43, pp. 47–82.
181. Xiao J., Zhan H., Xu Z., Wang X., Zhang K., Xiong Z., Simon G. P., Liu Z., Li D. Nanoconfined, dynamic electrolyte gating and memory effects in multilayered graphene-based membranes, *arXiv*, 2011, p. 12948.
182. Xiao K., Tu B., Chen L., Heil T., Wen L., Jiang L., Antonietti M. Photo-driven ion transport for a photodetector based on an asymmetric carbon nitride nanotube membrane, *Angew. Chem. Int.*, Ed., 2019, vol. 58, pp. 12574–12579.
183. Despotuli A. L. Nanoionika (Nanoelionika)-02, Zayavka na vypolnenie proekta RFFI № 96-02-17334-a. (in Russian).
184. Sirisubtawee S., Koonprasert S. Exact traveling wave solutions of certain nonlinear partial differential equations using the (G'/G^2) -expansion method, *Adv. Math. Phys.*, 2018, vol. 2018, p. 7628651.
185. Prasad B., Pfanzelt G., Fillis-Tsirakis E., Zachman M. J., Kourkoutis L. F., Mannhart J. Integrated circuits comprising patterned functional liquids, *Adv. Mater.*, 2018, vol. 30, p. 1802598.
186. Zhan H., Xiong Z., Cheng C., Liang Q., Liu J. Z., Li D. Solvation-involved nanoionics: New opportunities from 2D nanomaterial laminar membranes, *Adv. Mater.*, 2020, vol. 32, p. 1904562.
187. Rao A., Kumar G. S., Roy S., Rajesh A. T., Devatha G., Pillai P. P. Turn-on selectivity in inherently nonselective gold nanoparticles for Pb detection by preferential breaking of interparticle interactions, *ACS Appl. Nano Mater.*, 2019, vol. 2, pp. 5625–5633.
188. Beeck J. O., Labyedh N., Sepúlveda A., Spampinato V., Franquet A., Conard T., Vereecken P. M., Celano U. Direct imaging and manipulation of ionic diffusion in mixed electronic–ionic conductors, *Nanoscale*, 2018, vol. 10, pp. 12564–12572.
189. Gulina L. B., Weigler M., Privalov A. F., Kasatkina I. A., Groszewicz P. B., Murin I. V., Tolstoy V. P., Vogel M. Morphological and dynamical evolution of lanthanum fluoride 2D nanocrystals at thermal treatment, *Solid State Ionics*, 2020, vol. 352, p. 115354.
190. Saeed S. W., Norby T., Bjørnheim T. S. First-principles analyses of nanoionic effects at oxide–oxide heterointerfaces for electrochemical applications, *J. Phys. Chem. C*, 2020, vol. 124, p. 14072.
191. Yamaguchi S. Nanoionics — Present and future prospects, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2007, vol. 8, p. 503.
192. Valov I., Bartlett P. N. Preface, *Faraday Discuss*, 2019, vol. 213, p. 9.
193. Terabe K., Hasegawa T., Nakayama T., Aono M. Invention and development of the atomic switch, *In Atomic switch. From Invention to Practical Use and Future Prospects*, Ed. by M. Aono. Springer, 2020, pp. 1–15.
194. Zuo W., Polenovich V., Tolstoguzov A., Zeng X., Wnag Z., Song X., Gusev S. I., Tian C., Fu D. Mechano-chemical synthesis of crystalline superionic conductor $\text{CsAg}_4\text{Br}_3 - x\text{I}_{2+x}$ ($x = 0.32$) and its application for Ag^+ ion-beam generation, *J. Alloys Comp.*, 2019, vol. 790, pp. 109–116.
195. Zuo W., Polenovich V., Tolstoguzov A., Ieshkin A. E., Zeng X., Wnag Z., Gololobov G., Suvorov D., Liu C., Fu D., Hu D. Ion emission from solid electrolyte $\text{CsAg}_4\text{Br}_{2.68}\text{I}_{2.32}$ film deposited on Ag-tip: Characteristics and applications, *Vacuum*, 2019, vol. 167, pp. 382–388.
196. [irds.ieee.org/](https://ieeexplore.ieee.org/)
197. Sangwan V. K., Hersam M. C. Neuromorphic nanoelectronic materials, *Nat. Nanotechnol.*, 2020, vol. 15, pp. 517–528.
198. Neupane G. P., Zhang L., Yildirim T., Zhou K., Wang B., Tang Y., Ma W., Xue Y., Lu Y. A prospective future towards bio/medical technology and bioelectronics based on 2D vdWs heterostructures, *Nano Res.*, 2020, vol. 13, pp. 1–17.
199. <https://www.src.org/library/publication/p095388/p095388.pdf>
200. <https://www.src.org/library/publication/p095387/p095387.pdf>
201. Lee J.-S., Adams S., Maier J. A mesoscopic heterostructure as the origin of the extreme ionic conductivity in $\text{AgI}:\text{Al}_2\text{O}_3$, *Solid State Ionics*, 2000, vol. 136–137, pp. 1261–1266.
202. home.adh.edu.pl/index.html
203. Maier J. Defect chemistry and ion transport in nanostructured materials: Part II. Aspects of nanoionics, *Solid State Ionics*, 2003, vol. 157, pp. 327–334.
204. Maier J. Nano-ionics: More than just a fashionable slogan, *J. Electroceram.*, 2004, vol. 13, pp. 593–598.
205. Maier J. Nanoionics: Fundamentals and applications, *In 21st Century Nanoscience. A Handbook. Exotic Nanostructures and Quantum Systems*, Ed. by K. D. Sattler. Boca Raton, CRC Press, 2020. Chapter 8.
206. Tsurui T., Katsumata T., Inaguma I. Direct observations of La ordering and domain structures in $\text{La}_{0.6}\text{Li}_{0.17}\text{TiO}_3$ by high resolution electron microscopy, *Phys. Mag.*, 2009, vol. 89, pp. 843–852.
207. Despotuli A. L., Andreeva A. V. Nanoionics as a way towards new discoveries and applications // <https://ssrn.com/abstract=2981163>
208. Williams R. How we found the missing memristor, *IEEE Spectrum*, 2008, vol. 45, pp. 28–35.
209. Wang Z., Wang L., Nagai M., Xie L., Yi M., Huang W. Nanoionics-enabled memristive devices: strategies and materials for neuromorphic applications, *Adv. Electron. Mater.*, 2017, vol. 3, p. 1600510.
210. Tsuruoka T., Hasegawa T., Terabe K., Aono M. Operating mechanism and resistive switching characteristics of two- and three-terminal atomic switches using a thin metal oxide layer, *J. Electroceram.*, 2017, vol. 39, pp. 143–156.
211. Valov I., Yang Y. Memristors with alloyed electrodes, *Nat. Nanotechnol.*, 2020, vol. 15, pp. 510–511.
212. Aono M. Focus on materials nanoarchitectonics, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2011, vol. 12, p. 040301.
213. Terabe K., Hasegawa T., Nakayama T., Aono M. Quantized conductance atomic switch, *Nature*, 2005, vol. 433, pp. 47–50.
214. Costa-Krämer J. L., García N., García-Mochales P., Serenab P. A. Nanowire formation in macroscopic metallic contacts: quantum mechanical conductance tapping a table top, *Surf. Sci.*, 1995, vol. 342, pp. L1144–L1149.
215. Chua L. O. Memristor — The missing circuit element, *IEEE Trans. Circuits Theory*, 1971, vol. 18, pp. 507–519.
216. Ariga K., Yamauchi Y. Nanoarchitectonics from Atom to Life, *Chem. Asian. J.*, 2020, vol. 15, pp. 718–728.
217. Supramolecular Chemistry: From Molecules to Nanomaterials. 8 Vol. Set. Eds. J. W. Steed, P. A. Gale. Wiley, 2012.
218. Dorfman V. F. Sintez tverdotelnykh struktur, Moscow, Metallurgiya, 1986, 273 p. (in Russian).
219. Ariga K., Aono M. Nanoarchitectonics, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 55, p. 1102A6.
220. Seeman N. C. Nucleic acid junctions and lattice, *J. Theor. Biol.*, 1982, vol. 99, pp. 237–247.
221. Seeman N. C. DNA nanotechnology: Novel DNA constructions, *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.*, 1998, vol. 27, pp. 225–248.
222. Nangreave J., Han D., Liu Y., Yan H. DNA origami: a history and current perspective, *Curr. Opin. Chem. Biol.*, 2010, vol. 14, pp. 608–615.

223. Zhirnov V. V., Cavin R. K. Microsystems for Bioelectronics. Scaling and Performance Limits. 2nd Edition / William Andrew: 2015. 300 p.
224. Klyucharev V. V., Klyuchareva S. V. The geometry of closed sets in the state of chemical transformation, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2015, vol. 119, pp. 1633–1651.
225. Wan C., Xiao K., Angelin A., Antonietti M., Chen X. The rise of bioinspired iontronics, *Adv. Intell. Syst.*, 2019, vol. 1, p. 1900073.
226. Shi L., Jia K., Gao Y., Yang H., Ma Y., Lu S., Gao G., Bu H., Lu T., Ding S. Highly stretchable and transparent ionic conductor with novel hydrophobicity and extreme-temperature tolerance, *AAAS Research*, 2020, Article ID 2505619.
227. Bisri S. Z., Shimizu S., Nakano M., Iwasa Y. Endeavor of iontronics: from fundamentals to applications of ion-controlled electronics, *Adv. Mater.*, 2017, vol. 29, p. 1607054.
228. Chun H., Chung T. D. Iontronics, *Annu. Rev. Anal. Chem.*, 2015, vol. 8, pp. 441–462.
229. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bioelectronics>
230. Wagemaker M., Mulder F. M. Properties and promises of nanosized insertion materials for Li-ion batteries, *ACC Chem. Res.*, 2013, vol. 46, no. 5, pp. 1206–1215.
231. Liu Y., Vishniakou S., Yoo J., Dayeh S. A. Engineering heteromaterials to control lithium ion transport pathways, *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, pp. 18482.
232. Xu L., Tang S., Cheng Y., Wang K., Liang J., Liu C., Cao Y.-C., Wei F., Mai L. Interfaces in solid-state lithium batteries, *Joule*, 2018, vol. 2, pp. 1991–2015.
233. Xiao Y., Wang Y., Bo S.-H., Kim J. C., Miara L. J., Ceder G. Understanding interface stability in solid-state batteries, *Nat. Rev. Mater.*, 2020, vol. 5, pp. 105–126.
234. Shi Y., Li B., Zhu Q., Shen K., Tang W., Xiang Q., Chen W., Liu C., Luo J., Yang S. MXene-based mesoporous nanosheets toward superior lithium ion conductors, *Adv. Energy Mater.*, 2020, p. 1903534.
235. Sonia F. J., Aslam M., Mukhopadhyay A. Understanding the processing-structure-performance relationship of graphene and its variants as anode material for Li-ion batteries: A critical review, *Carbon*, 2020, vol. 156, pp. 130–165.
236. Liu Z., Zhang Y., Hao J., Zhu Y., Guo X., Li L., Sly G., Wang H. Fast lithium ionic conductivity observed in LiI-MoS₂ composite, *Inorg. Chem. Commun.*, 2020, vol. 112, p. 107761.
237. Youn D.-Y., Kim C., Cheong J. Y., Cho S.-H., Yoon K. R., Jung J.-W., Kim N.-H., Kim I.-D. Stable and High-Capacity Si Electrodes with Free-Standing Architecture for Lithium-Ion Batteries, *ACS Appl. Energy Mater.*, 2020, vol. 3, pp. 208–217.
238. Sakuda A., Hayashi A., Tatsumisago M. Interfacial observation between LiCoO₂ electrode and Li₂S–P₂S₅ solid electrolytes of all-solid-state lithium secondary batteries using transmission electron microscopy, *Chem. Mater.*, 2010, vol. 22, pp. 949–956.
239. Takada K. Progress and prospective of solid-state lithium batteries, *Acta Mater.*, 2013, vol. 61, pp. 759–770.
240. Tian Y., Shi T., Richards W. D., Li J., Kim J. C., Bo S.-H., Ceder G. Compatibility issues between electrodes and electrolytes in solid-state batteries, *Energy Environ. Sci.*, 2017, vol. 10, pp. 1150–1166.
241. Ghidui M., Ruhl J., Culver S. P., Zeier W. G. Solution-Based Synthesis of Lithium Thiophosphate Superionic Conductors for Solid-State Batteries: A Chemistry Perspective, *J. Mat. Chem. A.*, 2019, vol. 7, pp. 17735–17753.
242. Deng W., Li X., Shi W., Liu Q., Jiang J., Feng X. Enhancing ionic conductivity of glass-type electrolyte by strategically increasing the concentration of charge carrier, *J. Alloys Comp.*, 2020, vol. 843, p. 155942.
243. Zhao Y., Daemen L. L. Superionic conductivity in lithium-rich anti-perovskites, *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, vol. 134, pp. 15042–15047.
244. Xu Z., Chen X., Chen R., Li X., Zhu H. Anion charge and lattice volume dependent lithium ion migration in compounds with fcc anion sublattices, *npj Comput. Mater.*, 2020, vol. 6, p. 47.
245. Allan N. L., Stolen S., Mohn C. E. Think locally — linking structure, thermodynamics and transport in grossly non-stoichiometric compounds and solid solutions, *J. Mater. Chem.*, 2008, vol. 18, pp. 4124–4132.
246. Burbano J. C., Lara D. P., Correa H. Diffusion study for α -RbAg₄I₅ system by molecular dynamics, *Phys. Status Solidi B.*, 2020, p. 1900730.
247. Jørgensen M., Shea P. T., Tomich A. W., Varley J. B., Bercx M., Lovera S., Cerný R., Zhou W., Udovic T. J., Lavallo V., Jensen T. R., Wood B. C., Stavila V. Understanding superionic conductivity in lithium and sodium salts of weakly coordinating closo-hexahalocarborate anions, *Chem. Mater.*, 2020, vol. 32, pp. 1475–1487.
248. Liang X., Jiang Y., Cai W., Wu S., Wang L.-Y., Lei Z., Chen J., Lei Y., Yang L., Feng J. New Li₁₀GeP₂S₁₂ structure ordering and Li-ion dynamics unveiled in Li₄GeS₄–Li₃PS₄ superionic conductors: A solid-state nuclear magnetic resonance study, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, vol. 12, no. 24, pp. 27029–27036.
249. Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B. Nanoionika — osnova sozdaniya novykh priborov dlya MST. V kn. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. Ot issledovaniy k razrabotkam (Ed. P. P. Mal'cev). Tekhnosfera, Moscow, 2005, p. 72 (in Russian).
250. https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_ion_conductor
251. Yoshinari N., Yamashita S., Fukuda Y., Nakazawa Y., Konno T. Mobility of hydrated alkali metal ions in metallosupramolecular ionic crystals, *Chem. Sci.*, 2019, vol. 10, pp. 587–593.
252. Studenyak I. P., Kranjcec M., Bilanchuk V. V., Kokhan O. P., Orliukas A. F., Kezionis A., Kazakevicius E., Salkus T. Temperature variation of electrical conductivity and absorption edge in Cu₇GeSe₅I advanced superionic conductor, *J. Phys. Chem. Solids.*, 2009, vol. 70, pp. 478–1481.
253. Zhao Y., Guo J. Development of flexible Li-ion batteries for flexible electronics, *Info Mat.*, 2020, vol. 2, pp. 866–878.
254. Han F., Zhu Y., He X., Mo Y., Wang C. Electrochemical stability of Li₁₀GeP₂S₁₂ and Li₇La₃Zr₂O₁₂ solid electrolytes, *Adv. Energy Mater.*, 2016, vol. 6, pp. 1–9.
255. Wu X., Villevieille C., Novák P., Kazzi M. E. Monitoring the chemical and electronic properties of electrolyte–electrode interfaces in all-solid-state batteries using operando X-ray photoelectron spectroscopy, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2018, vol. 20, pp. 11123–11129.
256. Tarhouchi I., Viallet V., Vinatier P., Ménétrier M. Electrochemical characterization of Li₁₀SnP₂S₁₂: an electrolyte or a negative electrode for solid state Li-ion batteries?, *Solid State Ionics*, 2016, vol. 296, pp. 18–25.
257. Hakari T., Dequchi M., Mitsuhashi K., Ohta T., Saito K., Uchimoto Y., Kowada Y., Hayashi A., Tatsumisago M. Structural and electronic-state changes of a sulfide solid electrolyte during the Li deinsertion–insertion processes, *Chem. Mater.*, 2017, vol. 9, pp. 4768–4774.
258. Curtarolo S., Hart G. L. W., Nardelli M. B., Mingo N., Sanvito S., Levy O. The high-throughput highway to computational materials design, *Nat. Mater.*, 2013, vol. 12, pp. 191–201.
259. Matsumoto H., Furuya Y., Okada S., Tanji T., Ishihara T. Nanoionics phenomenon in proton-conducting oxide: Effect of dispersion of nanosize platinum particles on electrical conduction properties, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2007, vol. 8, pp. 531–535.
260. Matsui J., Miyata H., Hanaoka Y., Miyashita T. Layered ultrathin proton conductive film based on polymer nanosheet assembly, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2011, vol. 3, pp. 1394–1397.
261. Regmi Y. N., Peng X., Fornaciari J. C., Wei M., Myers D. J., Weber A. Z., Danilovic N. A low temperature unitized regenerative fuel cell realizing 60 % round trip efficiency and 10 000 cycles of durability for energy storage applications, *Energy Environ. Sci.*, 2020, vol. 13, pp. 2096–2105.
262. Yaroslavcev A. B., Kulova T. L., Skundin T. M. Elektrodnye nanomaterialy dlya litij-ionnykh akkumulyatorov, *Uspekhi himii*, 2015, vol. 84, is. 8, pp. 826–852 (in Russian).
263. Pervov V. S., Mahonina E. V., Zotova A. E., Kireeva N. V., Kedrinskii I.-M. A. Novye vozmozhnosti polucheniya keramicheskikh nanoteterostruktur s povyshennoy ionnoy provodimost'yu, *Rossiyskie nanotekhnologii*, 2014, vol. 9, no. 7–8, pp. 1–7 (in Russian).
264. Sunandana C. S. Introduction to Solid State Ionics: Phenomenology and Applications, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2015, 529 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 005

DOI: 10.17587/nmst.22.485-488

Д. А. Дормидошина, зам. генерального директора АО "ЦКБ "Дейтон", доц. каф. НИУ МИЭТ, e-mail: Dormidoshina@Deyton.ru,

Ю. В. Рубцов, генеральный директор АО "ЦКБ "Дейтон", г. Москва, Зеленоград, зам. зав. каф. НИУ МИЭТ, г. Москва, e-mail: Rubtsov@Deyton.ru,

М. Л. Савин, науч. сотрудник каф. НИУ МИЭТ, e-mail: Savin@Deyton.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ICMN В ПРОЦЕССАХ СБОРА, ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Поступила в редакцию 14.09.2020

Наиболее объективную и достоверную информацию для оценки возможности применения изделий микроэлектроники в радиоэлектронной аппаратуре дают данные, полученные в результате их сбора, обработки и анализа от организаций, заказывающих, проектирующих, разрабатывающих, изготавливающих, испытывающих, поставляющих, применяющих и эксплуатирующих изделия. Анализ таких данных позволяет оценить уровень фактической надежности изделия, выявить слабые места в технологиях проектирования, изготовления, нормах применения и эксплуатации, разработать конкретные мероприятия по обеспечению надежности.

В настоящее время отмечается значительный рост затрат на сбор, обработку и анализ информации о надежности изделий микроэлектроники по причинам увеличения степени их миниатюризации, роста номенклатуры применяемых изделий микроэлектроники в радиоэлектронной аппаратуре. В то же время усиливаются требования со стороны потребителей и заказчиков к оптимизации затрат на сбор, обработку и анализ информации, что создает противоречия, для преодоления которых используются различные технологии и приемы, в том числе ICMN, исследуемая в данной работе в целях обеспечения цифровизации информации о надежности изделий микроэлектроники.

Ключевые слова: изделия микроэлектроники, радиоэлектронная аппаратура, сбор, анализ, информация, надежность, стандартизация

Введение

ICMN является аббревиатурой от Information Classification, Marking and Handling, определяется как совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих методов и инструментов, применяемых для решения задач сбора, обработки и анализа информации и получения достоверных данных. ICMN относительно недавно начали использовать на практике согласно национальным и международным стандартам для регламентирования процессов сбора, обработки и анализа информации и решения задач по оптимизации затрат. За относительно

небольшое время ICMN показала достаточно высокую результативность в ее использовании как на концептуальном, так и на системном уровнях. При использовании ICMN выдвигаются понятные требования, подтверждаются разумные ожидания и достигается надлежащий баланс между тем, что необходимо и что будет сделано, повышается достоверность результатов, пригодных для контроля, верификации и применения в автоматизированных процессах, обеспечивается устойчивость информации к изменениям под действием различных факторов.

Исследование требований к классификации и маркировке информации

На начальном этапе использование ИСМН предполагает разработку или модернизацию действующей системы сбора и обработки информации с применением различных доступных методов, обеспечивающих объективность, полноту, достоверность и актуальность информации с соблюдением соглашений и правил обмена информацией и ее обработки.

Для выполнения процессов сбора, обработки и анализа информации о надежности изделий микроэлектроники она должна быть классифицирована и маркирована. Маркировка должна соответствовать конкретным правилам классификации информации, т. е. конкретную информацию необходимо индексировать определенным знаком. Метаданные, раскрывающие сведения о признаках и свойствах, характеризующих данные, позволяющие автоматически искать и управлять данными в больших информационных потоках, не рекомендуется использовать в качестве эквивалента знака маркировки, за исключением случая, когда они предназначены для целей классификации, при этом они должны соответствовать маркировке.

Классификации и маркировке подлежит информация о надежности изделий микроэлектроники, содержащая следующие данные:

- об отказах и наработке конкретных изделий;
- содержащие условное обозначение изделия, обозначение документа на поставку, технические характеристики;
- о результатах оценки надежности, разработанных и проведенных мероприятиях по ее повышению, а также справочные данные по надежности.

Данные об отказах формируют по признакам несоответствия свойств и характеристик изделия микроэлектроники установленным нормам, которые наблюдаются при контроле этих характеристик и их измерении. Они могут содержать информацию о полной потере работоспособности изделия, несоответствии параметров нормам, указанным в документах на поставку, дефектам внешнего вида и независимы от места возникновения отказа и причины.

Причины возникновения отказа классифицируют и маркируют по признакам смысловой принадлежности:

- 1) ошибки и несовершенство конструкции изделия и конструкторской документации;
- 2) ошибки и несовершенство технологического процесса;

3) нарушение требований, предъявляемых к контролю изделий, упаковке, транспортировке, хранению, применению и эксплуатации;

4) прочие причины.

Примеры классификации и маркировки информации о несоответствии параметров нормам, указанным в документах на поставку с применением ИСМН

Несоответствие параметров нормам, указанным в документах на поставку, можно классифицировать и маркировать для различных изделий микроэлектроники в соответствии с Общероссийским классификатором изделий и конструкторских документов, обозначаемым как ОК 012-93, и действующими стандартами. Для микросхем интегральных цифровых это несоответствие параметров, указанных в документах на поставку или в протоколе разрешения на применение в случае использования изделия в условиях, отличных от указанных в документах на поставку, основные из них:

а) выходное напряжение низкого уровня — U_{OL} ;
б) выходное напряжение высокого уровня — U_{OH} ;

в) напряжение срабатывания U_{IT+} — наименьшее постоянное напряжение на входе микросхемы, при котором происходит переход элемента схемы изделия из одного устойчивого состояния в другое;

г) напряжение отпускания U_{IT-} — величина, по смыслу противоположная напряжению срабатывания; по причине ошибок в конструкторской документации несоответствие может быть в значении напряжения гистерезиса U_h , определяющего разность между напряжением срабатывания и напряжением отпускания;

д) выходной ток низкого уровня I_{OL} — ток, протекающий в выходной цепи микросхемы при выходном напряжении низкого уровня;

е) выходной ток высокого уровня I_{OH} — величина, по смыслу противоположная выходному току низкого уровня;

ж) выходной ток низкого (высокого) уровня в состоянии "Выключено" I_{OZL} (I_{OZH}) — выходной ток микросхемы, выход которой находится в состоянии "Выключено" при подаче на измеряемый выход заданного напряжения низкого (высокого) уровня. Данная классификация используется для изделий с тремя состояниями на выходе. На выходе микросхема может быть в состоянии высокого уровня, низкого уровня, а также в третьем — отключенном состоянии, которое называется высокоимпедансным, или состоянием высокого сопротивления. В качестве примера может быть мик-

росхема 1533АПЗТММ (разработка ПАО "Микрон" 2018 г.) — два 4-канальных формирователя с инверсией информации и тремя состояниями на выходах;

з) время задержки распространения при включении t_{PHL} — интервал времени между входным и выходным импульсами при переходе напряжения на входе микросхемы от напряжения высокого уровня к напряжению низкого уровня, измеренный на уровне 0,5 или на заданном в конструкторской документации уровне напряжения;

и) время задержки распространения при выключении t_{PLH} — интервал времени между входным и выходным импульсами при переходе напряжения на выходе микросхемы от напряжения низкого уровня к напряжению высокого уровня, измеренный на уровне 0,5 или на заданном в конструкторской документации уровне напряжения;

к) время задержки распространения при переходе из состояния "Выключено" в состояние высокого (низкого) уровня t_{PZH} (t_{PZL}) — интервал времени между входным и выходным импульсами при переходе напряжения на выходе микросхемы от напряжения высокого (низкого) уровня к напряжению в состоянии "Выключено", измеренный на заданном в конструкторской документации уровне напряжения для изделий с тремя состояниями на выходе;

л) время задержки распространения при переходе из состояния высокого (низкого) уровня в состояние "Выключено" t_{PHZ} (t_{PLZ}) — величина, по смыслу противоположная времени задержки распространения при переходе из состояния "Выключено" в состояние высокого (низкого) уровня;

м) время нарастания (спада) сигнала t_R (t_F) — интервал времени нарастания (спада) амплитуды выходного сигнала микросхемы от уровня 0,1 до уровня 0,9 от заданного в конструкторской документации значения.

Основные параметры изделий микроэлектроники, предназначенные для обработки информации, их несоответствие нормам, указанным в документах на поставку, можно классифицировать и маркировать в зависимости от вида изделия микроэлектроники, конкретного функционального назначения и схемотехнического решения следующим образом:

1) аналогично микросхемам интегральным цифровым: выходное напряжение низкого уровня U_{OL} ; выходное напряжение высокого уровня U_{OH} ; выходной ток низкого уровня I_{OL} ; выходной ток высокого уровня I_{OH} ; выходной ток низкого (высокого) уровня в состоянии "Выключено" I_{OZL} (I_{OZH}); время задержки распространения при включении (выключении) t_{PH} (t_{PLH}); время задержки

распространения при переходе из состояния "Выключено" в состояние высокого (низкого) уровня t_{PZH} (t_{PZL}); время задержки распространения при переходе из состояния высокого (низкого) уровня в состояние "Выключено" t_{PHZ} (t_{PLZ}); время нарастания (спада) сигнала t_R (t_F);

2) ток утечки низкого (высокого) уровня на входе I_{LIL} (I_{LIH}) (ток утечки во входной цепи микросхемы при входных напряжениях в диапазоне, соответствующем низкому уровню, и при заданных режимах на остальных выводах);

3) рабочая частота f ;

4) частота следования импульсов тактовых сигналов f_C ;

5) время выбора f_{CS} (интервал времени, измеренный на заданных уровнях, между подачей сигнала на управляющий вход и получением на выходе сигнала информации при условии, что все остальные необходимые сигналы поданы).

Аналогичные исследования были проведены для других видов изделий микроэлектроники и применены в информационной поисковой системе "Дейтон" разработки АО "ЦКБ "Дейтон" для оценки возможности применения изделий микроэлектроники в радиоэлектронной аппаратуре.

Заключение

В ходе исследований были изучены требования документов по стандартизации надежности изделий, параметров изделий микроэлектроники, необходимых для оценки их надежности, современные результаты исследований ИСМН, применяемой для классификации и маркировки информации. Исследования показали целесообразность применения ИСМН в целях обеспечения функционирования процессов сбора, обработки и анализа информации о надежности изделий микроэлектроники и получения достоверных и актуальных данных.

Список литературы

1. ГОСТ Р 58545—2019. Менеджмент знаний. Руководящие указания по сбору, классификации, маркировке и обработке информации.
2. ГОСТ Р 57435—2017. Микросхемы интегральные. Термины и определения.
3. ГОСТ Р 57441—2017. Микросхемы интегральные. Термины, определения и буквенные обозначения электрических параметров.
4. ГОСТ 27.002—2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.
5. ГОСТ Р 55893—2013. Микросхемы интегральные. Основные параметры.
6. ГОСТ РВ 27.2.01—2005. Надежность ВТ. Классификация отказов и предельных состояний.
7. РД 50-204—87. Методические указания. Надежность в технике. Сбор и обработка информации о надежности изделий в эксплуатации. Основные положения.

8. **Балашева С. А., Ветошкин Е. В.** Система сбора и обработки информации по качеству и надежности // Вестник ИГЭУ. 2012. № 1. С. 57–61.

9. **Taylor M.** Do you ICMH? URL: <https://ion.icaew.com/technews/b/weblog/posts/do-you-icmh> (дата обращения: 20.08.2020).

10. **BSI BS 10010.** Information classification, marking and handling — Specification. URL: <http://www.iprosoft.ru/docs/?nd=440169701&tab=3> (дата обращения: 20.08.2020).

11. **Quality & Reliability.** Integrated Silicon Solution Inc. URL: http://www.issi.com/WW/pdf/ISSI_QualityReliability-Manual.pdf (дата обращения: 20.08.2020).

D. A. Dormidoshina, Deputy General Director of Central design office "Deyton", Dormidoshina@Deyton.ru,
Yu. V. Rubtsov, General Director of Central design office "Deyton",
Head of Chair, Rubtsov@Deyton.ru, **M. L. Savin**, Researcher of National Research University
of Electronic Technology, Savin@Deyton.ru, Moscow, Russian Federation

Corresponding author:

Dormidoshina Daria A., Deputy General Director of Central design office "Deyton", Moscow, Zelenograd, 124460,
Russian Federation

E-mail: Dormidoshina@deyton.ru

The Application of ICMH in the Collection, Processing and Analysis of Information on the Reliability of Microelectronic Products

Received on September 14, 2020

Accepted on September 29, 2020

The most objective and reliable information for assessing the possibility of using microelectronic products in electronic equipment is provided by the data obtained as a result of their collection, processing and analysis from organizations ordering, designing, developing, manufacturing, testing, supplying, using and operating products. The analysis of such data makes it possible to assess the level of the actual reliability of the product, to identify weak points in design technology, manufacturing, application and operation standards, and to develop specific measures to ensure reliability.

Currently, there is a significant increase in the costs of collecting, processing and analyzing information on the reliability of microelectronic products due to the increase in the degree of their miniaturization, the growth of the range of used microelectronic products in radio electronic equipment. At the same time, demands from consumers and customers to optimize the costs of collecting, processing and analyzing information are increasing, which creates contradictions to overcome which various technologies and techniques are used, including ICMH, which is studied in this article in order to ensure the digitalization of information about reliability microelectronic products.

Keywords: microelectronic products, electronic equipment, collection, analysis, information, reliability, standardization

For citation:

Dormidoshina D. A., Rubtsov Yu. V., Savin M. L. The Application of ICMH in the Collection, Processing and Analysis of Information on the Reliability of Microelectronic Products, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 9, pp. 485–488.

DOI: 10.17587/nmst.22.485-488

References

1. **GOST R 58545—2019.** Knowledge management. Guide for information collection, classification, marking and handling (in Russian).

2. **GOST R 57435—2017.** Integrated circuits. Terms and definitions (in Russian).

3. **GOST R 57441—2017.** Integrated circuits. Terms, definitions and letter symbols of electrical parameters (in Russian).

4. **GOST 27.002—2015.** Dependability in techniques. Terms and definitions (in Russian).

5. **GOST R 55893—2013.** Integrated microcircuits. Basic parameters (in Russian).

6. **GOST RV 27.2.01—2005.** Dependability of military techniques. Classification of failures and limit states (in Russian).

7. **RD 50-204—87.** Methodical instructions. Reliability in technology. Collection and processing of information about the reliability of products in operation. Basic provisions (in Russian).

8. **Balashova S. A., Vetoshkin E. V.** System of collection and processing of data on quality and reliability. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2012, no. 1, pp. 57–61 (in Russian).

9. **Taylor M.** Do you ICMH? URL: <https://ion.icaew.com/technews/b/weblog/posts/do-you-icmh> (date of the application: 20.08.2020).

10. **BSI BS 10010.** Information classification, marking and handling — Specification. URL: <http://www.iprosoft.ru/docs/?nd=440169701&tab=3> (date of the application: 20.08.2020).

11. **Quality & Reliability.** Integrated Silicon Solution Inc. URL: http://www.issi.com/WW/pdf/ISSI_QualityReliability-Manual.pdf (date of the application: 20.08.2020).

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

УДК 621.362

DOI: 10.17587/nmst.22.489-492

М. Г. Мустафаев, канд. техн. наук, ассистент, **Г. А. Мустафаев**, д-р техн. наук, проф.,
Д. Г. Мустафаева, канд. техн. наук, доц., dzhamilya79@yandex.ru,
ФГБОУ ВО "Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)", г. Владикавказ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР С ВОСПРОИЗВОДИМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Поступила в редакцию 17.07.2020

Показано, что повышение роли методов контроля, выявления закономерностей и точности выполнения технологических операций, установление взаимосвязи характеристик технологического процесса и выхода годных изделий позволяет обеспечить воспроизводимость технологии и формирования приборных структур с заданными параметрами. В технологическом процессе производства формируются приборные структуры и реализуются конструктивно-технологические основы, на которых в технологических и конечных испытаниях устанавливаются заданные параметры.

Ключевые слова: структура, дефект, деградация, отказ, технология, процесс, надежность, параметр, формирование, анализ

Введение

В технологическом процессе изготовления приборов, особенно при производстве с субмикрометровыми минимальными размерами, усиливается взаимосвязь между рабочими параметрами схемы собственно приборных структур и технологией их изготовления.

В приборных структурах возможны различные виды дефектов. Дефекты, возникающие в системе многослойных соединений, многообразны: пробой диэлектрика между слоями металлизации; коррозия металлизации; электромиграция материала токопроводящих дорожек; деградация контактов металл—полупроводник [1—7].

Существенное влияние на параметры изделий оказывает процесс формирования приборных структур, особенно при создании элементов интегральной электроники [8—11]. Уменьшение размеров элементов содействует активации различных процессов деградации и обостряет проблему обеспечения заданных параметров, как приборных структур, так и радиоэлектронных устройств, в которых их применяют [12—20].

Формирование приборных структур с воспроизводимыми параметрами

Выходные характеристики изделий обеспечиваются при выработке основных концепций их со-

здания. При реализации технологии создания изделий в производственных условиях формируются конструктивно-технологические основы, на которых в технологических и конечных испытаниях устанавливаются заданные параметры. Все эти виды работ по обеспечению заданных параметров на разных стадиях технологии изготовления и эксплуатации изделий объединяются интегральным планом и системой информации.

Анализ производственного процесса показывает: большое число отказов приборных структур обусловлено дефектами оксидов; нередко отказы вследствие нарушения металлизации; значительное число отказов вызвано ошибками при использовании в составе аппаратуры.

Различные виды дефектов в подложке — дислокации, дефекты упаковки, примесные структуры, действуют на прибор путем увеличения токов утечки через p — n -переходы и границы инверсионных слоев. Токи утечки определяют время восстановления информации в динамических системах памяти.

На участках с меньшим сечением плотность тока увеличивается, и процесс переноса материала ускоряется, могут образовываться разрывы электрической цепи. Явления взаимной диффузии материалов и электромиграция имеют место и в контактах металл—полупроводник. Коррозия токо-

ведущих дорожек может привести к появлению коротких замыканий между соседними дорожками.

В ходе производственного процесса проводится анализ приборных структур. Для этого используют оптическую и электронную микроскопию, методы локального химического анализа. Проводят также анализ и исследование механизма отказов.

Для обеспечения заданных параметров элементов интегральной электроники, зависящей от производственных процессов, повышают электрическую прочность слоев оксида SiO_2 , так как электрический пробой оксидной пленки приводит к отказу элементов. Улучшение производственного процесса, уменьшение числа посторонних частиц в воздухе чистых комнат позволяют существенно уменьшить количество дефектов в оксидных пленках. Совершенствование чистоты при проведении производственного процесса позволяет понизить уровень дефектности структур.

Обеспечение заданных параметров в значительной степени связано с совершенствованием технологии производства элементов интегральной электроники, методов анализа отказов и дефектов, методов моделирования, контроля над производственными процессами, введением новых методов контроля.

Обеспечение заданных параметров связано также с механизмами деградации, влияющими на срок службы и надежность элементов интегральной электроники: надежность электрической схемы, воздействия окружающей среды. Механизмами деградации, зависящими от электрической схемы, являются воздействие электростатических разрядов, электромиграция, воздействия окружающей среды — отказы, вызванные влиянием посторонних частиц, тепловые и механические воздействия, коррозия. Интенсивность электромиграции является функцией плотности постоянного тока, она экспоненциально зависит от абсолютной температуры.

Надежность элементов зависит от посторонних частиц, коррозии, механических и тепловых нагрузок. При разработке элементов интегральной электроники принимают меры для обеспечения надежности при этих воздействиях. Конструкция, исходные материалы, защитные покрытия выбирают с учетом воздействий этих факторов.

Обеспечение надежности достигается совершенствованием конструкции элементов интегральной электроники, знанием механизмов отказов и влиянием параметров схем и условий окружающей среды на эти механизмы.

Развитие конструкций элементов интегральной электроники, уменьшение размеров компонентов увеличивает напряженности электрического поля в схемах, плотности токов в полосках металлизации и усложняет работы по обеспечению надежности и устранению дефектов, возникающих при разработке и постановке производственного процесса.

Несогласованность коэффициентов теплового расширения отдельных элементов может быть причиной отказов многих элементов интегральной электроники, причиной понижения надежности. Анализ тепловых воздействий и связанных с ними механических нагрузок позволяет оценить оптимальность выбранных материалов и уточнить вероятные механизмы отказов.

Учитывая все эти обстоятельства, можно сформулировать некоторые принципы обеспечения заданных параметров элементов интегральной электроники:

- изучить процессы, определяющие механизмы; разработать модель, определить параметры модели для прогнозирования;
- сформулировать задачи проектирования;
- проектировать элементы, руководствуясь данными задачами;
- базируясь на модели и на этих задачах, проверить надежность.

Исследования физических причин деградации позволяют улучшить технологию изготовления и применения приборов, а путем изучения закономерностей развития процессов во времени предсказывать поведение прибора. Знание механизмов отказа позволяет рассчитывать надежность прибора на этапе его проектирования, а также предсказывать надежность разрабатываемой аппаратуры.

Для обеспечения воспроизводимости технологии проводят статистический анализ технологического процесса. При статистическом анализе выполняют:

- первичную статистическую обработку;
- установление статистических связей параметров;
- определение закономерностей технологического процесса;
- построение регрессионных моделей связи выхода годных изделий и режимов технологических операций;
- анализ устойчивости технологического процесса.

Первичную статистическую обработку проводят для определения средних значений и дисперсий параметров, проверяют вид закона распределения. Корреляционный анализ выполняют для установления взаимосвязей между характеристиками технологического процесса и выходом годных изделий. Выявления закономерностей технологического процесса проводят методами факторного анализа. После выявления взаимосвязей характеристик технологического процесса строят регрессионные модели. Оценку технологии производства выполняют с помощью линейной функции регрессии.

Уменьшение геометрических размеров элементов и рост степени интеграции вызывает необходимость повышения точности выполнения техно-

логических операций и методов их контроля. Стандартизация методов контроля параметров изделий и производственного процесса позволяет усовершенствовать технологию производства и обеспечивает изготовление изделий с воспроизводимыми параметрами. Стандартизация единых принципов выбора показателей технологического процесса, основанная на общих свойствах изделий и факторах, влияющих на выбор номенклатуры показателей и их численные значения, позволяет обеспечить единообразие и оптимизацию протекания процессов при групповой технологии изготовления.

В качестве характеристик настройки технологической операции и точности ее выполнения используют статистические показатели, характеризующие положение центра распределения измеренных параметров и их разброс, т. е. средние значения и средние квадратические отклонения.

Интегральные показатели настройки технологического процесса определяют по параметрам функционального элемента, а настройку и точность выполнения операций — по параметрам элементов физической структуры.

Для обеспечения точности технологического процесса производства используют статистическое регулирование на основе измеренных значений параметров и определения их положения относительно границ регулирования.

Заключение

Формирование структур с заданными параметрами в значительной степени связано с совершенствованием технологии, методов анализа отказов и дефектов, методов контроля в производственном процессе. Прослеживаемость взаимосвязи параметров приборных структур и технологии их изготовления позволяет обеспечить формирование структур с заданными параметрами и понизить уровень их дефектности. Выявление физических причин деградации позволяет улучшить технологию изготовления и применения интегральных элементов в составе радиоэлектронных устройств и аппаратуры в целом.

Список литературы

1. Курносоев А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1986. 368 с.

2. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987. 464 с.
3. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. СПб.: ЛАНЬ, 2002. 479 с.
4. Козырь И. Я. Качество и надежность интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1987. 144 с.
5. Таруи Я. Основы технологии СБИС. М.: Радио и связь, 1985. 286 с.
6. Любимова Л. К. Металлизация в полупроводниковых приборах // Электронная техника. Сер. 2. 1977. Вып. 3. С. 35—38.
7. Комник Ю. Ф. Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты. М.: Атомиздат, 1979. 196 с.
8. Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г. Снижение дефектов структуры и повышение надежности интегральных элементов // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 1. С. 52—58.
9. Мустафаев М. Г. Инструменты эффективной организации производственных процессов и их совершенствования при создании изделий радиоэлектроники // Радиопромышленность. 2018. № 4. С. 93—100.
10. Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г. Формирование структур пленочных преобразователей с заданными параметрами // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 1. С. 40—44.
11. Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г. Получение однородных по структуре и равномерных по толщине диэлектрических покрытий при формировании приборных структур // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 3. С. 131—136.
12. Bodde M. D. Silicon planar ACCUFET improved power MOSFET structure // Electron. Lett. 1989. Vol. 36, N. 10. P. 913—915.
13. Alok D., Baliga B. J. High voltage (450 V) 6H-SiC lateral MESFET structure // Electron Lett. 1996. Vol. 32, N. 20. P. 1929—1931.
14. Syau T., Venkatraman P., Baliga B. J. Extended trench-gate power UMOSFET structure with low specific on-resistance // Electron. Lett. 1992. Vol. 28, N. 9. P. 865—867.
15. Ajit J. S., Baliga B. J., Tandon S., Reisman A. The minority carrier injection controlled field-effect transistor (MICFET): a new MOS-gated power transistor structure // IEEE Transaction Electron Devices. 1992. Vol. 39, N. 8. P. 1954—1960.
16. Baliga B. J. Power semiconductor devices for variable-frequency drives // Proc. IEEE. 1994. Vol. 82, N. 8. P. 1112—1122.
17. Averbuch A., Israeli M., Ravve I., Yavneh I. Computation for electromigration in interconnects of microelectronics devices // Journal of Computational Physics. 2001. Vol. 167. P. 316—371.
18. Manghisoni M., Ratti L., Re L., Speziali V. Submicron CMOS Technologies for Low-Noise Analog Front-End Circuits // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2002. Vol. 49, N. 4. P. 1783—1790.
19. Manghisoni M., Ratti L., Re V., Speziali V., Traversi G. 130 and 90 nm CMOS technologies for detector front-end applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2007. A572. P. 368—370.
20. Protc D., Krings T., Schleichert R. Development of Double-Sided Microstructured Si(Li) Detectors // IEEE Trans, on Nuclear Science. 2002. Vol. 49, N. 4. P. 1993—1998.

M. G. Mustafaev, Ph. D., Assistant, **G. A. Mustafaev**, D. Sc., Professor,
D. G. Mustafaeva, Ph. D., Associate Professor, dzhamilya79@yandex.ru,
 North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz,
 Russian Federation

Corresponding author:

Mustafaeva Dzhamilya G., Ph. D., Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
 (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation
 E-mail: dzhamilya79@yandex.ru

Technological Principles for the Formation of Instrument Structures with Reproducible Parameters

Received on July 17, 2020
Accepted on August 04, 2020

It is shown that increasing the role of control methods, identifying patterns and accuracy of performing technological operations, establishing the relationship between the characteristics of the technological process and the yield of suitable products, will ensure the reproducibility of technology and the formation of instrument structures with specified parameters. In the technological process of production, instrument structures are formed and constructive and technological foundations are implemented, on which the specified parameters are established in technological and final tests. Providing the specified parameters of device structures, depending on the production processes, is carried out on the basis of increasing the dielectric strength of oxide layers, improving the production process, and reducing the number of defects in oxide films. Improving the cleanliness during the production process allows you to reduce the level of defective structures. The inconsistency of the coefficients of thermal expansion of the materials used is the cause of failures of elements of integral electronics and a decrease in their reliability. Analysis of thermal effects and associated mechanical loads allows one to assess the optimality of the selected materials and to clarify the likely failure mechanisms. Knowledge of the failure mechanisms makes it possible to calculate the reliability of the device at the design stage, as well as to predict the reliability of the equipment being developed. The reproducibility of the technology is ensured by conducting a statistical analysis of the technological process, containing statistical processing, establishing statistical relationships between parameters, determining the regularities of the technological process, constructing regression models for the relationship between the yield of good products and modes of technological operations, and analyzing the stability of the technological process. The traceability of the relationship between the parameters of instrument structures and the technology of their manufacture allows to reduce the level of their defectiveness, statistical regulation, based on the measured values of the parameters, and determining their position relative to the regulation limits, ensures the accuracy of the production process.

Keywords: structure, defect, degradation, failure, technology, process, reliability, parameter, formation, analysis

For citation:

Mustafaev M. G., Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G. Technological Principles for the Formation of Instrument Structures with Reproducible Parameters, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 9, pp. 489–492.

DOI: 10.17587/nmst.22.489-492

References

1. **Kurnosov A. I., Judin V. V.** Tehnologija proizvodstva poluprovodnikovyyh priborov i integral'nyh mikroshem, Moscow, Vysshaya shkola, 1986, 368 p. (in Russian).
2. **Chernjaev V. N.** Tehnologija proizvodstva integral'nyh mikroshem i mikroprocessorov. Moscow, Radio i svyaz', 1987, 464 p. (in Russian).
3. **Pasynkov V. V., Chirkin L. K.** Poluprovodnikovyye pribory, Sankt Petersburg: LAN', 2002, 479 p. (in Russian).
4. **Kozyr' I. Ja.** Kachestvo i nadezhnost' integral'nyh mikroshem, Moscow, Vysshaya shkola, 1987, 144 p. (in Russian).
5. **Tarui Ja.** Osnovy tehnologii SBIS, Moscow, Radio i svyaz', 1985, 286 p. (in Russian).
6. **Ljubimova L. K.** Metallizatsiya v poluprovodnikovyyh priborah, *Elektronnaya tekhnika*, ser. 2, 1977, vol. 3, pp. 35–38 (in Russian).
7. **Komnik Ju. F.** Fizika metallicheskih plenok. Razmernye i strukturnye efekty, Moscow, Atomizdat, 1979, 196 p. (in Russian).
8. **Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.** Snizhenie defektov struktury i povyshenie nadezhnosti integral'nyh jelementov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 52–58 (in Russian).
9. **Mustafaev M. G.** Instrumenty jeffektivnoj organizacii proizvodstvennyh processov i ih sovershenstvovaniya pri sozdanii izdelij radioelektroniki, *Radiopromyshlennost'*, 2018, no. 4, pp. 93–100 (in Russian).
10. **Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.** Formirovanie struktur plenochnyh preobrazovatelej s zadannymi parametrami, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 40–44.
11. **Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.** Poluchenie odnorodnyh po strukture i ravnomerny po tolshhine dijelektricheskikh pokrytij pri formirovanii pribornyh struktur, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 131–136 (in Russian).
12. **Bodde M. D.** Silicon planar ACCUFET improved power MOSFET structure, *Electron. Lett.*, 1989, vol. 36, no. 10, pp. 913–915.
13. **Alok D., Baliga B. J.** High voltage (450 V) 6H-SiC lateral MESFET structure, *Electron. Lett.*, 1996, vol. 32, no. 20, pp. 1929–1931.
14. **Syau T., Venkatraman P., Baliga B. J.** Extended trench-gate power UMOSFET structure with low specific on-resistance, *Electron. Lett.*, 1992, vol. 28, no. 9, pp. 865–867.
15. **Ajit J. S., Baliga B. J., Tandon S., Reisman A.** The minority carrier injection controlled field-effect transistor (MICFET): a new MOS-gated power transistor structure, *IEEE Transaction Electron Devices*, 1992, vol. 39, no. 8, pp. 1954–1960.
16. **Baliga B. J.** Power semiconductor devices for variable-frequency drives, *Proc. IEEE*, 1994, vol. 82, no. 8, pp. 1112–1122.
17. **Averbuch A., Israeli M., Ravve I., Yavneh I.** Computation for electromigration in interconnects of microelectronics devices, *Journal of Computational Physics*, 2001, vol. 167, pp. 316–371.
18. **Manghisoni M., Ratti L., Re L., Speziali V.** Submicron CMOS Technologies for Low-Noise Analog Front-End Circuits, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 1783–1790.
19. **Manghisoni M., Ratti L., Re V., Speziali V., Traversi G.** 130 and 90 nm CMOS technologies for detector front-end applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2007, A572, pp. 368–370.
20. **Protic D., Krings T., Schleichert R.** Development of Double-Sided Microstructured Si(Li) Detectors, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 1993–1998.

А. С. Койгеров, канд. техн. наук, инженер каф. МНЭ, a.koigerov@gmail.com,
СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург,
С. С. Андрейчев, ген. директор, andreychev.s@gmail.com,
ООО "СВЧ решения", Санкт-Петербург

РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ОСНОВЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Поступила в редакцию 10.09.2020

Приведена краткая классификация режекторных фильтров. Рассмотрены различные варианты пассивных режекторных фильтров. Предложена и изготовлена конструкция режекторного фильтра на поверхностных акустических волнах на основе однонаправленных преобразователей. Центральная частота — 40,05 МГц, подавление — не менее 40 дБ, полоса заграждения по уровню -3 дБ — не менее 135 кГц (относительное значение — 0,34 %), полоса заграждения по уровню -40 дБ — не менее 35 кГц (относительное значение — 0,0875 %).

Ключевые слова: режекторный фильтр, полосно-заграждающий фильтр, режекторный фильтр на ПАВ, однонаправленный преобразователь, пьезоэлектрическая подложка, поверхностная акустическая волна, метод связанных мод, метод конечных элементов

Введение

Устройства обработки и фильтрации сигналов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) находят широкое применение в разнообразных радиоэлектронных системах. Наиболее востребованными устройствами на ПАВ являются такие классы устройств, как полосовые фильтры, резонаторы, линии задержки, дисперсионные линии задержки, чувствительные элементы датчиков, радиометки. Несколько обособленным для акустоэлектронных устройств являются полосно-заграждающие или режекторные фильтры, которые не получили широкого распространения, однако имеют ряд интересных особенностей и преимуществ перед типами фильтров, работающих на других принципах, но выполняющих функции избирательного подавления сигнала.

Целью разработки является режекторный фильтр на 40,05 МГц с подавлением 40 дБ, полосой заграждения по уровню -3 дБ — не менее 135 кГц (относительное значение — 0,34 %), полосой заграждения по уровню -40 дБ — не менее 35 кГц (относительное значение — 0,0875 %).

Требования минимизации габаритных размеров при высоких требованиях по электрическим параметрам для данного частотного диапазона накладывают ограничения на выбор фильтров, построенных по другим принципам работы.

На основе метода связанных мод были рассчитаны и изготовлены ключевые элементы на ПАВ для режекторного фильтра с требуемыми параметрами на подложке пьезоэлектрического материала 36°YX Quartz. Ключевым элементом ПАВ выбран однонаправленный преобразователь типа DART.

Практическая значимость: данный тип режекторного фильтра может быть полезен как дополнение к полосно-пропускающим фильтрам, не имеющим крутых скатов АЧХ и подавления 40 дБ в нужном частотном диапазоне и, как следствие, может помочь подавить нежелательные помехи очень близко расположенных полос частот соседних систем связи.

Схемы построения режекторных фильтров

Режекторный фильтр или полосно-заграждающий фильтр — это фильтр, который не пропускает некоторую полосу частот в выбранном частотном

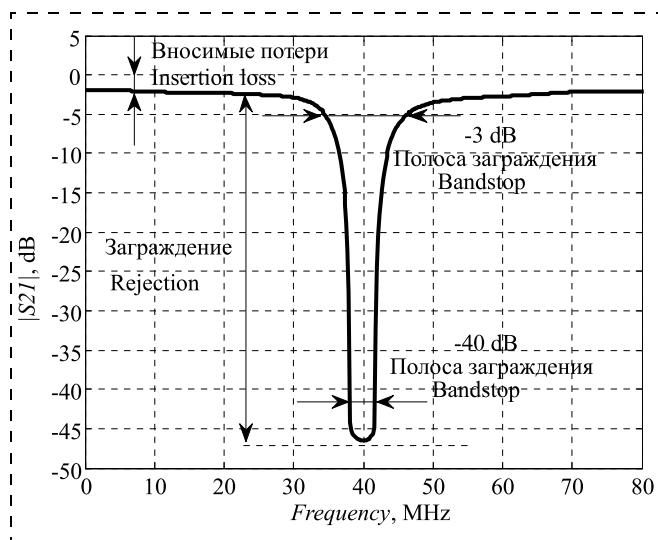


Рис. 1. Типовая амплитудно-частотная характеристика режекторного фильтра и его основные параметры

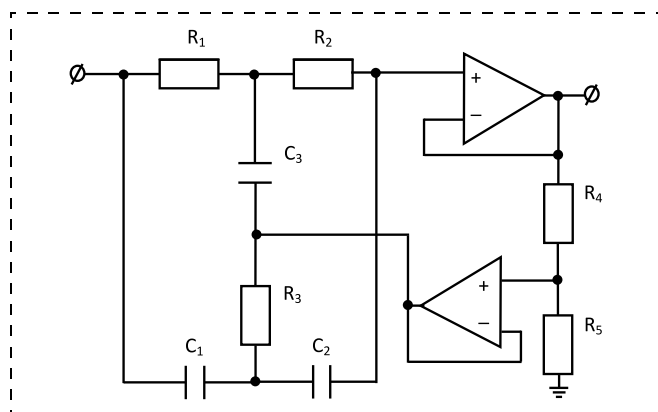


Рис. 2. Схема активного режекторного фильтра на двух операционных усилителях

диапазоне, и, соответственно пропускает колебания с частотами, выходящими за пределы этой полосы. В англоязычной литературе такой фильтр, как правило, называется фильтром-пробкой (англ. *notch filter*).

Как правило, полосно-заграждающие фильтры (ПЗФ) применяют в том случае, когда необходимо подавить нежелательный сигнал в одном конкретном диапазоне частот.

Основные характеристики режекторного фильтра — центральная частота подавления, вносимые потери, ширина полосы заграждения и заграждения по определенным уровням (подавления сигнала) представлены на рис. 1.

По типу элементной базы режекторные фильтры можно разделить на пассивные и активные. Активные фильтры имеют в своем составе активные радиоэлементы, как правило, нелинейные элементы — транзисторы или операционные усилители, требующие электропитания [1, 2]. Простая схема

одного из вариантов активного фильтра представлена на рис. 2.

Пассивные фильтры для работы не требуют какого-либо электропитания и состоят из пассивных элементов — катушек индуктивности, конденсаторов, резисторов и/или их распределенных аналогов. Схемы пассивных LC-режекторных фильтров представлены на рис. 3.

На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) представлена АЧХ реального фильтра третьего порядка (см. рис. 3, в), в котором использованы покупные конденсаторы и катушки индуктивности. Полоса режекции по уровням -3 и -40 дБ составляет 16 и 3,2 МГц (относительные значения 40 и 8 %) соответственно. Потери вне полосы — не более 0,4 дБ. Габаритные размеры фильтра в таком SMD-исполнении — 10×13 мм.

Недостатками LC-фильтров являются большая полоса заграждения по уровню -3 дБ, высокие требования к разбросу номиналов элементов, сложности получения режекторных фильтров большой частоты.

К пассивным фильтрам также относятся микрополосковые фильтры [3, 4] (рис. 5). Частотные характеристики для двух типов фильтров представлены на рис. 6.

Центральная частота — 4 ГГц. Габаритные размеры этих микрополосковых фильтров пятого порядка составляют для варианта 1 (рис. 5, а) — 38×18 мм, для варианта 2 (рис. 5, б) — 38×4 мм. Материал подложки — поликор ВК-100 толщиной 0,5 мм.

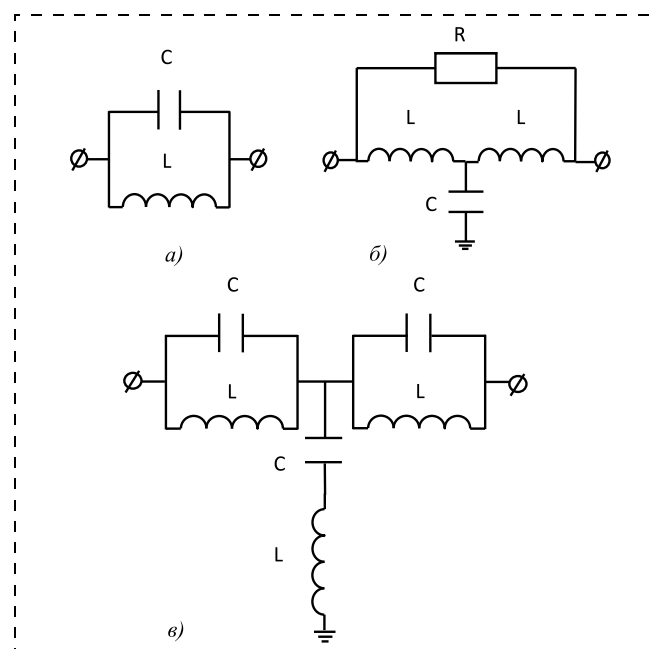


Рис. 3. Схема пассивного LC-режекторного фильтра:

а — простой колебательный контур; б — Т-мост; в — фильтр третьего порядка

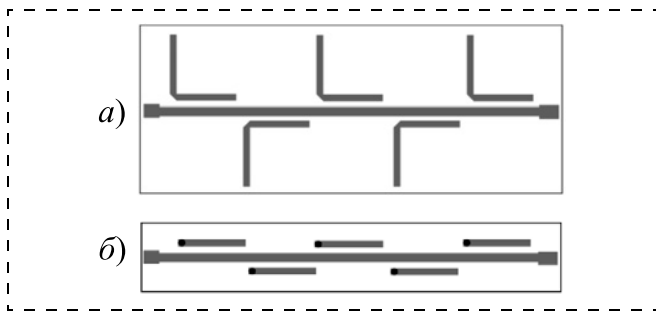


Рис. 5. Топология некоторых типов микрополосковых режекторных фильтров:

a — тип 1; *б* — тип 2

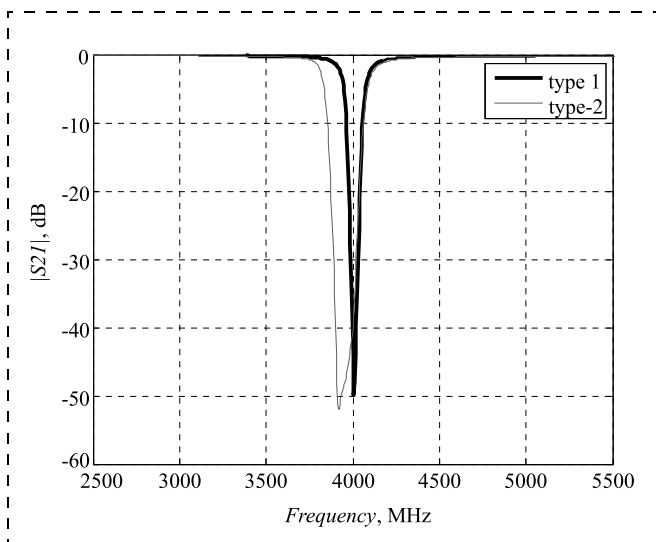


Рис. 6. АЧХ микрополосковых фильтров двух типов

Поскольку основной элемент таких фильтров — полуволновые резонаторы, микрополосковые фильтры крайне затруднительно использовать для низких частот, вследствие больших габаритных размеров. Так, например, для частоты 100 МГц длина фильтра третьего порядка при аналогичной конфигурации топологии составляет около 1 м.

Также существуют волноводные фильтры, фильтры на диэлектрических резонаторах, на коаксиальных диэлектрических резонаторах, на объемных резонаторах [5, 6].

Применение устройств на ПАВ для построения режекторных фильтров

Для большей селекции сигналов можно использовать режекторные фильтры на ПАВ (рис. 7) [7–10]. Значение добротности резонаторов в фильтрах на ПАВ значительно выше добротности резонатора на LC -элементах и микрополосковых резонаторов, что обеспечивает значительно более крутые скаты в АЧХ фильтра.

Модифицированный вариант Т-моста в комбинации с ключевыми элементами на ПАВ, кото-

рыми в данном случае являлись резонаторы на ПАВ, представлен на рис 7, *a* [8]. Как правило, выбор в качестве ключевого элемента ПАВ-резонатора позволяет получить очень узкую полосу режекции, что при температурных уходах может быть недостаточно для обеспечения требуемой полосы. В качестве ключевых элементов на ПАВ в работе [9] предложено использовать только встречно-штыревой преобразователь (ВШП) с большим числом периодов для получения слабо выраженных свойств частотной характеристики преобразователя, тем самым расширяя полосу режекции (рис. 7, *б*). Еще один вариант — модифицированный вариант Т-моста с использованием двухпортового резонатора (рис. 7, *в*) [9]. Более сложная мостовая схема представлена на рис. 7, *г* [10], что позволяет достичь большей ширины полосы режекции за счет дополнительных настроечных элементов L и C . Кроме того, для получения режекторного фильтра можно использовать не только модифицированные варианты Т-моста, но и подход, основанный на звеньях лестничного фильтра (рис. 7, *д*) [11]. Элементарным звеном лестничного фильтра является Г-образное звено, состоящее из последовательно включенного резонатора S и параллельно подключенного на землю резонатора P .

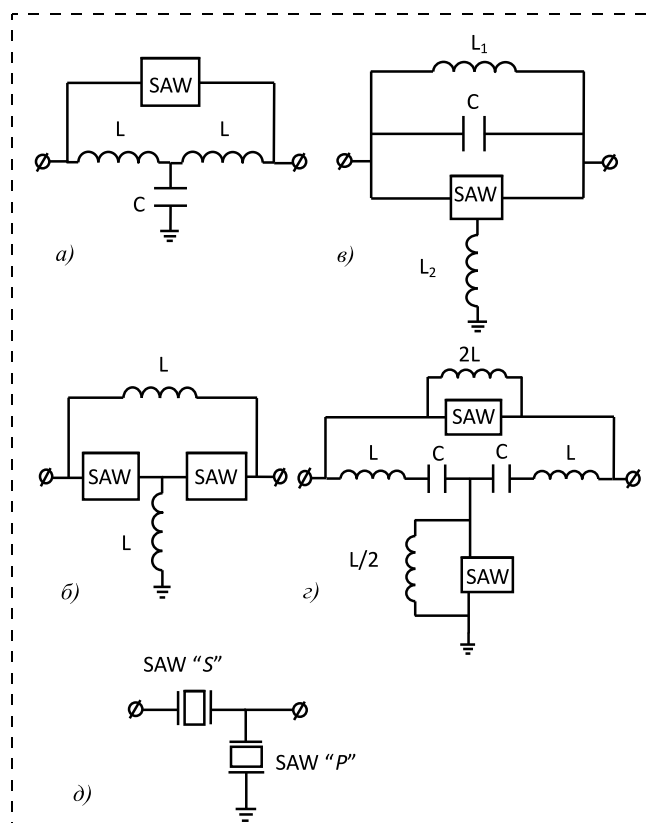


Рис. 7. Схемы режекторных фильтров на ПАВ элементах:

a — вариант Т-моста; *б* — вариант Т-моста; *в* — вариант Т-моста с использованием двухпортового резонатора; *г* — сложная мостовая схема; *д* — звено лестничного фильтра

В отечественной литературе известен ряд оригинальных конструкций режекторных фильтров.

Фильтр, описанный в патенте [12], построен по мостовой схеме, акустический элемент имел 200 пар электродов. Центральная частота — 99 МГц, режекция — около 48 дБ. Полоса заграждения по уровню -3 дБ — не менее 1 МГц (относительное значение — 1 %), полоса заграждения по уровню -40 дБ — не менее 200 кГц (относительное значение — 0,2 %). Фильтр имеет большие потери вне полосы режекции (в полосе пропускания) до 10 дБ.

Режекторный фильтр, представленный в [13], содержит пьезоэлектрическую подложку с расположенными на ее поверхности несколькими однородными ВШП. В результате реализуется приемлемый уровень режекции — более 60 дБ на частоте 95,5 МГц. Полоса заграждения по уровню -3 дБ — не менее 1,4 МГц (относительное значение — 1,5 %), полоса заграждения по уровню -40 дБ — не менее 280 кГц (относительное значение — 0,3 %). Потери в полосе пропускания — не более 1,5 дБ.

В изобретении [14] задачей являлась разработка нового импедансного режекторного фильтра на ПАВ на частоте 80 МГц с неравномерностью АЧХ вне полосы режекции — менее 3 дБ. Режекция — до 50 дБ. Полоса заграждения по уровню -32 дБ — не менее 500 кГц (относительное значение — 0,6 %). Фильтр содержит несколько ВШП, причем ВШП — веерного типа.

Рассмотренные в данных работах фильтры имеют свои преимущества и недостатки, но не позволяют решить поставленную задачу по реализации фильтра с заданной полосой заграждения.

Разработка нового режекторного фильтра на 40,05 МГц

Выбор схемы. В качестве схемы, на основе которой был реализован режекторный фильтр, выбрана схема, представленная на рис. 7, г. Для обеспечения уверенного подавления в 40 дБ и требуемой относительной ширины полосы заграждения по уровню -3 дБ 0,34 % и по уровню -40 дБ 0,0875 % было принято решение использовать каскадное включение двух фильтров (рис. 8). Каждый фильтр (каскад) имеет свою центральную частоту за счет элементов на ПАВ, соответственно рассчитанных. Частотную характеристику фильтра получим из перемножения индивидуальных коэффициентов передачи каждого каскада.

Выбор и расчет ключевого элемента ПАВ. Ключевым элементом в этих фильтрах является элемент на ПАВ в виде отдельного ВШП, который является однопортовым устройством с несколькими слабо выраженными резонансными свойствами, в

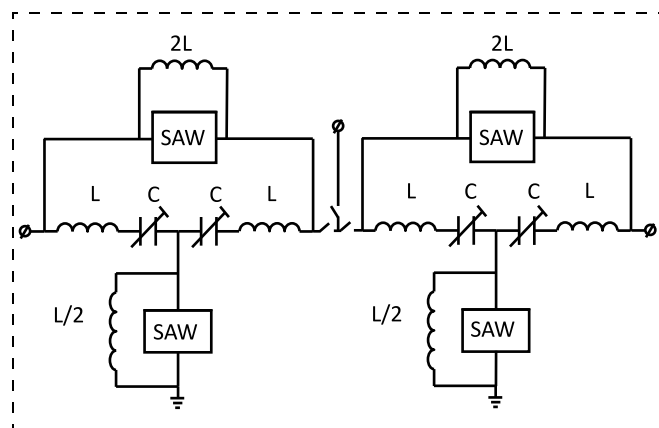


Рис. 8. Схема двухкаскадного режекторного фильтра на ПАВ с настраиваемыми конденсаторами

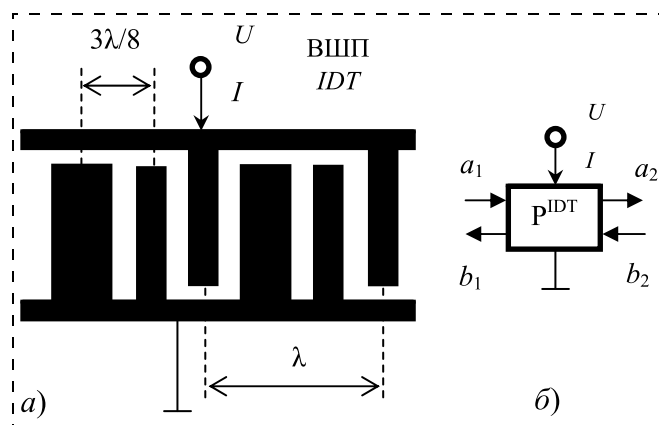


Рис. 9. Схемы преобразователя:

а — топология DART; б — преобразованная эквивалентная акустоэлектронная схема устройства

отличие от классического однопортового резонатора на ПАВ, для которого типичным является быстрое изменение фазы в районе резонансной частоты. Таким образом, формируется требование к крутизне фазовой характеристики входного импеданса выбранного ключевого элемента в области центральной частоты.

В качестве ключевого элемента ПАВ выбран однонаправленный преобразователь на основе конструкции типа DART (рис. 9). Материал пьезоэлектрика — кварц. Основной тип волны — волна Рэлея. Преобразователь DART реализован с использованием 500 периодов ($L = 500\lambda$). Параметры DART: $\lambda_1 = 79,29$ мкм; $\lambda_2 = 79,21$ мкм; апертуры — 50 и 100 λ .

Одной из наиболее известных методик расчета топологий устройств на ПАВ является метод связанных мод (англ. *coupled of mode (COM)*) [15, 16]. На основе теории метода связанных мод и P -матриц была рассчитана полная проводимость однонаправленного преобразователя DART. Суть метода и конечная P -матрица преобразователя типа

DART, связывающая комплексные амплитуды волн на входе и выходе, представлены на рис. 9, 10.

Акустические компоненты P_{11} , P_{12} , P_{21} , P_{22} описывают коэффициенты передачи и отражения по акустическим порам. Акустоэлектрические компоненты P_{13} , P_{23} показывают эффективность возбуждения поверхностных акустических волн посредством подачи напряжения U на шины ВШП. Электроакустические компоненты P_{31} , P_{32} характеризуют эффективность преобразования ПАВ в электрический ток I в шинах ВШП. Искомую проводимость ВШП Y определяет элемент P_{33} суммарной матрицы канала:

$$P_{33} = Y(\omega) = G_a(\omega) + jB_a(\omega) + j\omega C_t$$

где $G_a(\omega)$ — активная составляющая проводимости излучения, которая прямо пропорциональна излученной акустической мощности в пьезоподложку; $B_a(\omega)$ — реактивная составляющая проводимости излучения и является преобразованием Гильберта от $G_a(\omega)$; C_t — статическая емкость.

Результаты расчета и измерений частотной зависимости полной проводимости представлены на рис. 11. Причем результаты расчета методом связанных мод (COM-метод) подтверждены расчетами методом конечных элементов (МКЭ) в пакете *COMSOL Multiphysics*. Картина механических смещений волны Рэлея, полученную с помощью МКЭ, под преобразователем типа DART можно наблюдать на рис. 12 (см. вторую сторону обложки).

Реальная часть входной проводимости разрабатываемого ключевого элемента ПАВ в окрестностях центральной частоты имеет два не ярко выраженных пика (см. рис. 11), тем самым мнимая часть входной проводимости за счет преобразова-

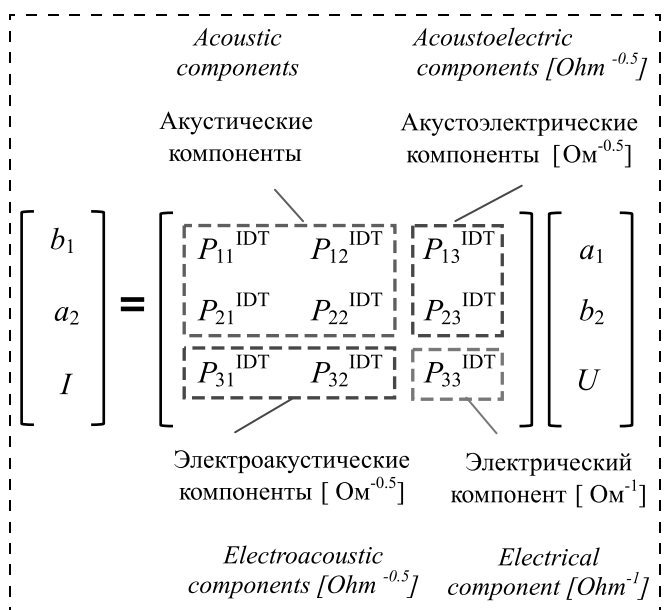


Рис. 10. Основы метода Р-матриц

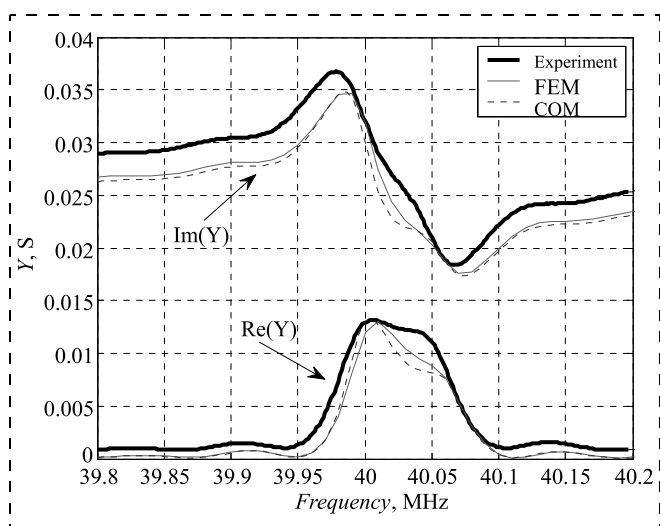


Рис. 11. Проводимость преобразователя DART

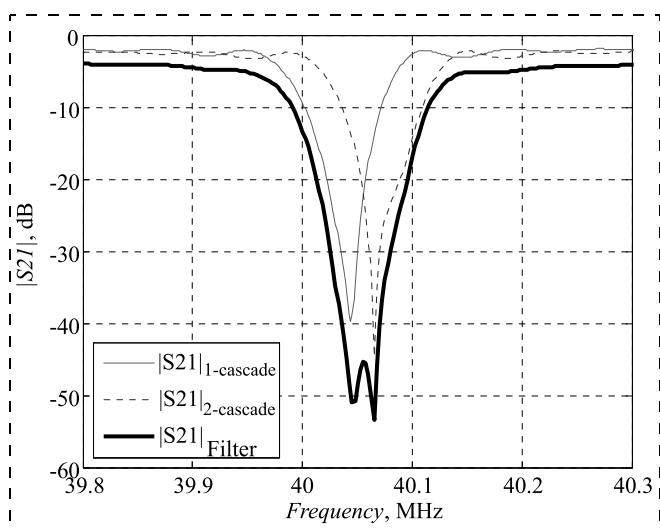


Рис. 13. Принцип формирования коэффициента передачи режекторного фильтра, состоящего из двух каскадов

ния Гильберта имеет в этой же частотной области квази плоский участок и фазовая характеристика имеет не такую яркую крутизну.

Принцип формирования коэффициента передачи режекторного фильтра, состоящего из двух каскадов, каждый из которых имеет ключевые элементы на ПАВ со своими центральными частотами показан на рис. 13.

Выбор и настройка пассивных элементов цепи Т-моста. Режекторный фильтр, реализованный по схеме на рис. 8, состоит из элементов на ПАВ и пассивных элементов, требующих точной настройки — выбор номинала каждого элемента.

Для регулирования частотного диапазона полосы заграждения и значения заграждения непосредственно в аппаратуре заказчика с высокой точностью (до 1 кГц) были предусмотрены переменные конденсаторы (конденсаторы с переменной

емкостью). Переменные конденсаторы также облегчают первоначальный подбор всех элементов согласования — указанные на рис. 8 соотношения номиналов катушек индуктивностей ориентировочные, в печатной плате присутствуют свои паразитные емкостные и индуктивные составляющие, а номиналы подстроечных элементов имеют погрешности.

Для точной настройки потребовались промежуточные значения индуктивностей стандартных значений номинального ряда E24, так как отклонение значения одной из индуктивностей L на 2...5 % может приводить в рамках одного каскада к смещению частоты режекции до 10 кГц, уменьшения значения режекции до 10 дБ, увеличения затухания в полосе пропускания до 2 дБ.

Большое внимание также было уделено добротности катушек индуктивности, которые сильно

влияют на затухание в полосе пропускания. Например, при использовании катушек индуктивности с добротностью менее 15 (в диапазоне требуемых частот), затухание вне полосы режекции опускается до -10 дБ и ниже.

Для удобства настройки и контроля параметров каждого из каскадов в макетном образце предусмотрен промежуточный радиочастотный выход (в работе настроенного фильтра отключен и никак не участвует).

Результаты

Экспериментальные исследования разработанного устройства показали, что предлагаемая в данной работе конструкция режекторного фильтра на ПАВ позволила получить следующие характеристики, представленные на рис. 14 и 15.

Габаритные размеры разработанного фильтра вместе с разъемами составляют $90 \times 74 \times 16$ мм (рис. 16, см. вторую сторону обложки).

Заключение

Рассмотрены основные виды режекторных фильтров. На основе ПАВ-устройств с односторонними преобразователями был рассчитан и изготовлен режекторный фильтр на 40,05 МГц с подавлением 40 дБ, полосой заграждения по уровню -3 дБ — не менее 135 кГц (относительное значение — 0,34 %), полосой заграждения по уровню -40 дБ — не менее 35 кГц (относительное значение — 0,0875 %).

Список литературы

1. Bainter J. R. Active filter has stable notch and response can be regulated // Electronics. Oct. 2. 1975. P. 115—117.
2. Bactor S. A. A Novel second-order canonical RC-Active Realization of High-Pass-Notch Filter // Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems. 1974. P. 640—644.
3. Mongia R., Bahl I., Bhartia P. RF and Microwave Coupled-Line Circuits. Second Edition. London: Artech House, 2007. 549 p.
4. Hong J., Lancaster M. J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. John Wiley & Sons. Inc., 2001. 457 p.
5. Chan R. Dielectric Resonator Bandstop filter. The University of Leeds, 2011.
6. Matthaei G., Young L., Jones E. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. Dedham: Artech House Books, 1980. 1096 p.
7. Lorenz P. A., Thompson D. F. Wide bandwidth low cost SAW notch filters // Proc. 1998 IEEE Ultrasonic symposium. P. 51—55.
8. Zhiquan Lin, Jiuling Liu, Wenhui Ren, Shitang He. A Wide Passband SAW Notch Filter // Modern applied science. 2008. Vol. 2. N. 5. P. 46—49.
9. Gopani S., Horine B. A. SAW Waveguide-coupled resonator notch filter // Proc. 1990 IEEE Ultrasonic symposium. P. 1—5.
10. Hartmann C. S., Andle J. C., King M. B. SAW notch filters // Proc. 1987 IEEE Ultrasonic symposium. P. 131—138.
11. Beaudin S., Jian C., Sychaleun D. A new SAW band reject filter and its applications in wireless systems // Proc. IEEE 2002 Ultrasonic symposium. P. 147—151.

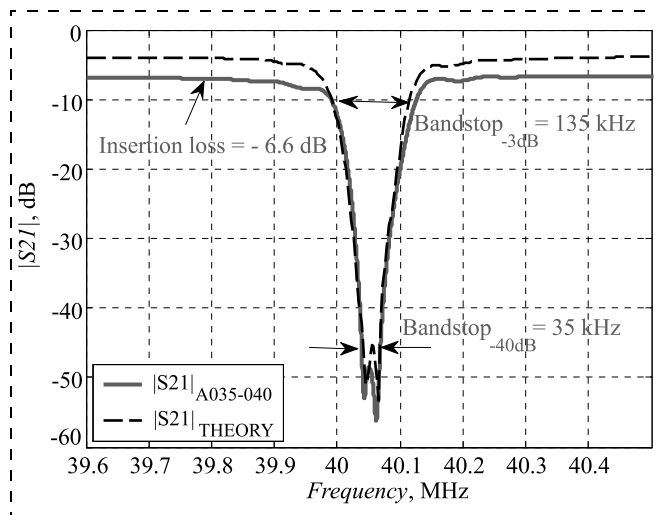


Рис. 14. Расчетная и измеренная АЧХ режекторного фильтра A035-040

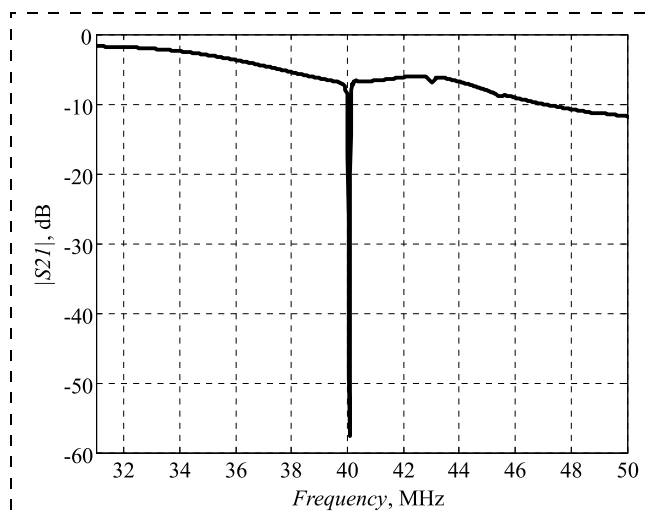


Рис. 15. Измеренная АЧХ режекторного фильтра A035-040

12. Багдасарян Н. А., Багдасарян А. С., Кондратьев С. Н., Семенов В. В., Аверкин С. В. Режекторный фильтр на поверхностных акустических волнах. Патент RU 2195071 C1 / № 2002109428/09; Заявл. 12.04.2002; Оpubл. 20.12.2002. Бюл. № 35.

13. Кошкин П. К., Бобровских Ю. М., Иванов А. С., Шаповалов В. Н. Режекторный фильтр на поверхностных акустических волнах. Патент RU 2103806 C1 / № 94018407/09; Заявл. 19.05.1994; Оpubл. 27.01.1998.

14. Аверкин С. В., Семенов Г. А., Бичурин М. И. Импедансный режекторный фильтр на поверхностных акустических волнах. Патент RU 2252481 C2 / № 2003116316/09; Заявл. 02.06.2003; Оpubл. 02.05.2005. Бюл. № 14.

15. Plessky V. P., Koskela J. Coupling-of-modes analysis of SAW devices // Int. J. High Speed El. and Syst. Dec. 2000. Vol. 10.

16. Дмитриев В. Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 9. С. 1134—1143.

A. S. Koigerov, Ph. D., Engineer of MNE department, a.koigerov@gmail.com, Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197376, St. Petersburg, Russian Federation,
S. S. Andreychev, Leading Process Engineer, andreychev.s@gmail.com, LLC "RF Solution", 198095, St. Petersburg, Russian Federation

Corresponding author:

Koigerov Aleksey S., Ph. D., Engineer, Department of micro- and nano electronics, e-mail: a.koigerov@gmail.com, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197376, Saint Petersburg, Russian Federation

The Notch Filter on Surface Acoustic Wave on Base of Single Phase Unidirectional Transducers

Received on September 10, 2020

Accepted on September 30, 2020

High requirements on the electrical parameters of the filters are made in radio engineering systems. For bandpass filters, these requirements apply to the squareness coefficient of the amplitude frequency response and rejection. Therefore, the notch filter can be used as a complement to bandpass filters, since it serves to suppress signals in a certain frequency range. Notch filters on surface acoustic waves are not widely used, but they have a number of interesting features and advantages over types of filters that work on other principles.

The purpose of the development is to produce a notch filter on surface acoustic waves at 40.05 MHz with 40 dB suppression, a bandstop at the level of -3 dB at least 135 kHz (relative value — 0.34 %), a bandstop at the level of -40 dB at least 35 kHz (relative value — 0.0875 %).

Results: a brief classification of notch filters is given. Various variants of passive notch filters are considered. Based on the method of coupling of modes and the finite element method, key elements on surface acoustic waves were calculated and manufactured for a notch filter with the required parameters on a substrate of a 36°YX Quartz piezoelectric material. The key element is a unidirectional transducer of DART type. The scheme is based on a bridge scheme with additional passive tuning elements. It is shown that in order to implement this filter, it is necessary not only to select all the topology parameters of individual key elements included in the filter very precisely, but also to perform precise configuration and selection of passive LC-elements. These calculations are confirmed by the results of experiments.

Keywords: notch filter, surface acoustic wave, SAW, SAW notch filter, single phase unidirectional transducer, DART, piezoelectric substrate, coupling of modes, COM, finite element method, FEM

For citation:

Koigerov A. S., Andreychev S. S. The Notch Filter on Surface Acoustic Wave on Base of Single Phase Unidirectional Transducers, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 9, pp. 493—500.

DOI: 10.17587/nmst.22.493-500

References

1. Bainter J. R. Active filter has stable notch and response can be regulated. *Electronics*, 1975, Oct. 2, pp. 115—117.

2. Boctor S. A. A Novel second-order canonical RC-Active Realization of High-Pass-Notch Filter, *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, 1974, pp. 640—644.

3. Mongia R., Bahl I., Bhartia P. RF and Microwave Coupled-Line Circuits, Second Edition, London, Artech house, 2007, 549 p.

4. Hong J., Lancaster M. J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, John Wiley & Sons. Inc., 2001. 457 p.

5. Chan R. Dielectric Resonator Bandstop filter. The University of Leeds, 2011.

6. Matthaei G., Young L., Jones E. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. Dedham, Artech House Books, 1980. 1096 p.

7. Lorenz P. A., Thompson D. F. Wide bandwidth low cost SAW notch filters, *Proc. 1998 IEEE Ultrasonic symposium*, pp. 51—55.

8. Zhiqun Lin, Jiuling Liu, Wenhui Ren, Shitang He. A Wide Passband SAW Notch Filter, *Modern applied science*, 2008, vol. 2, no. 5, pp. 46—49.

9. **Gopani S., Horine B. A.** SAW Waveguide-coupled resonator notch filter, *Proc. 1990 IEEE Ultrasonic symposium*, pp. 1—5.
10. **Hartmann C. S., Andle J. C., King M. B.** SAW notch filters, *Proc. 1987 IEEE Ultrasonic symposium*, pp. 131—138.
11. **Beaudin S., Jian C., Sychaleun D.** A new SAW band reject filter and its applications in wireless systems, *Proc. IEEE 2002 Ultrasonic symposium*, pp. 147—151.
12. **Bagdasaryan N. A., Bagdasaryan A. S., Kondrat'ev S. N., Semenov V. V., Averkin S. V.** Rezhektornyj fil'tr na poverhnostnyh akusticheskikh volnah. Patent RU 2195071. (in Russian).

13. **Koshkin P. K., Bobrovskih Y. M., Ivanov A. S., Shapovalov V. N.** Rezhektornyj fil'tr na poverhnostnyh akusticheskikh volnah. Patent RU 2103806. (in Russian).
14. **Averkin S. V., Semenov G. A., Bichurin M. I.** Impedantnyj rezhektornyj fil'tr na poverhnostnyh akusticheskikh volnah. Patent RU 2252481 (in Russian).
15. **Plessky V. P., Koskela J.** Coupling-of-modes analysis of SAW devices, *Int. J. High Speed El. and Syst.*, Dec. 2000, vol. 10.
16. **Dmitriev V. F.** Modified equations of coupled surface acoustic waves, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 9, pp. 1077—1086.

УДК 621.315.592

DOI: 10.17587/nmst.22.500-510

Н. А. Кульчицкий, д-р техн. наук, проф., зам. начальника управления,
e-mail n.kulchitsky@gmail.com,
Государственный научный центр РФ, Акционерное общество
"Научно-производственное объединение "Орион", Россия, 111538, Москва,
МИРЭА — Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Россия,
119454, Москва,
А. В. Наумов, ст. науч. сотр., **В. В. Старцев**, гл. конструктор,
Акционерное общество "Оптико-механическое конструкторское бюро "Астрон", Россия,
140080, Лыткарино, Московская обл.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ИК ДИАПАЗОНА

Поступила в редакцию 07.08.2020

В обзоре рассмотрены инфракрасные детекторы тепловизионной техники. Устройства востребованы в системах и комплексах гражданской и медицинской термографии, охранного и пожарного наблюдения, персональных системах ночного видения и обеспечения безопасности. Представлено сравнение фотонных и тепловых детекторов разного типа от разных мировых производителей. Дан экспертный прогноз изменений динамики роста рынка и тенденций его пост-пандемического развития.

Ключевые слова: тепловизоры, болометры, фотонные детекторы

Введение

С момента возникновения рынок инфракрасной (ИК) тепловизионной техники рос вследствие военных применений. Сегодня военный сектор по-прежнему обеспечивает некоторый рост рынка. Но парадигма развития изменилась — основной рост обеспечивает гражданская и медицинская термография, охранное и пожарное наблюдение, персональные системы ночного видения и локальные рынки безопасности (муниципальные, частные и пр.). Устройства с использованием тепловизоров позволяют осуществлять наблюдение в условиях плохой видимости, обнаруживать людей с повышенной температурой в толпе и др. (рис. 1, см. третью сторону обложки) [1, 2].

По "до-пандемическому" прогнозу фирмы *Maxtech International* (США) и сегодняшним оценкам авторов рынок ИК систем (гражданских и военных), составив 10,5 млрд долл. в 2017 г., в 2025 г.

может достигнуть 20 млрд долл. (ввиду пандемии прогнозы *Maxtech International* были пересчитаны в сторону увеличения) (рис. 2).

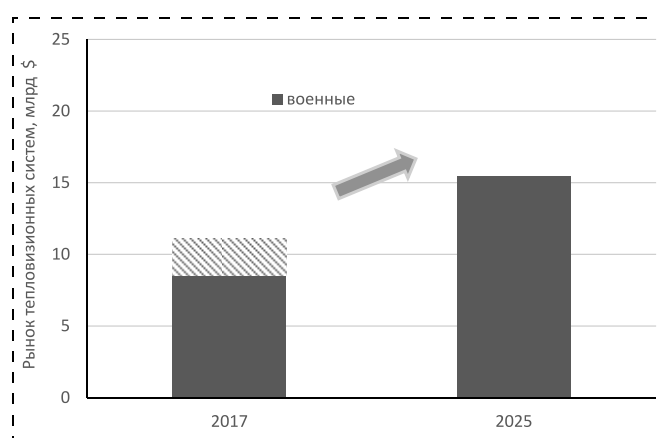


Рис. 2. Прогноз рынка ИК систем до 2025 г. (источник — *Maxtech International*, оценка авторов)

Классификация инфракрасных детекторов

Тепловизионные приборы можно разделить на два класса: более эффективные на фотонных (охлаждаемых и неохлаждаемых) детекторах и менее чувствительные на тепловых (неохлаждаемых) детекторах (микроболометрах).

Инфракрасные камеры воссоздают образ теплового объекта по сигналам от первичных детекторов теплового излучения. Инфракрасная энергия от объектов сцены фокусируется посредством оптики на ИК детектор, информация от него передается на электронику для обработки изображения, которое транслируется на стандартный видеоэкран. В любом детекторе поглощенное электромагнитное излучение приводит к возникновению или изменению электрического сигнала [1, 2]. Это поглощенное излучение возбуждает или нагревает электронную либо решеточную подсистемы детекторов, что приводит к изменениям их свойств или распределения электронов по энергиям, изменяя движение заряженных носителей. Такие изменения фиксируются измерениями физических параметров детектора. В фотонных детекторах, а это в основном полупроводниковые детекторы, излучение поглощается непосредственно чувствительным к данному излучению материалом — электронами, связанными с атомами решетки (находящихся в валентной зоне — "собственные" детекторы) или примесными атомами ("несобственные" или примесные детекторы), или свободными носителями (детекторы на свободных носителях) внутри валентной зоны или зоны проводимости и в металле вблизи границы металл—полупроводник (фотоэмиссионные детекторы — Шоттки-детекторы (SBD — Schottki Barrier Diode детекторы) (рис. 3). Таким образом, фотонные детекторы реагируют только на фотоны, энергия которых превышает некоторые пороговые значения, например, ширину запрещенной зоны полупроводника ("собствен-

ные" детекторы), энергию переходов в квантовых ямах (КЯ), квантовых точках (КТ) и сверхрешетках (СР), высоту барьера $q\varphi_b$ в детекторах на основе диодов Шоттки. Количество носителей заряда, генерированных в фотонном детекторе за счет поглощения излучения, можно измерять непосредственно (напряжение или ток), а отклик квадратичных (поглощенная мощность пропорциональна квадрату напряженности электрического поля) фотонных детекторов пропорционален числу поглощенных фотонов.

Принцип работы тепловых детекторов основан на изменении электрических характеристик приемника за счет энергии поглощенного теплового излучения. Падающее излучение нагревает материал, что приводит к изменению сопротивления. Прямого взаимодействия фотонов с электронами материала в данном случае нет [1, 2].

Почти до конца XX века развитие ИК технологий определялось доминирующим вкладом фотонных детекторов. Существенным недостатком ИК фотонных детекторов является необходимость криогенного охлаждения. Это необходимо для предотвращения тепловой генерации носителей заряда, являющейся источником шумов, ограничивающих параметры приемников излучения. Вторая революция в ИК видении началась в последние десятилетия XX века. На протяжении конца 1970-х — начала 1990-х годов несколько компаний разработало неохлаждаемые тепловые детекторы, основанные на различных принципах обнаружения тепловых потоков (ИК излучения), что позволило формировать крупноформатные массивы (матрицы) приемников ИК излучения. По сравнению с фотонными, тепловые детекторы во второй половине XX века применяли в меньшей степени, поскольку они работали относительно медленно (время ответа $t > 5 \cdot 10^{-2}$ с) и с более низкой чувствительностью. Но создавая чувствительные пиксе-

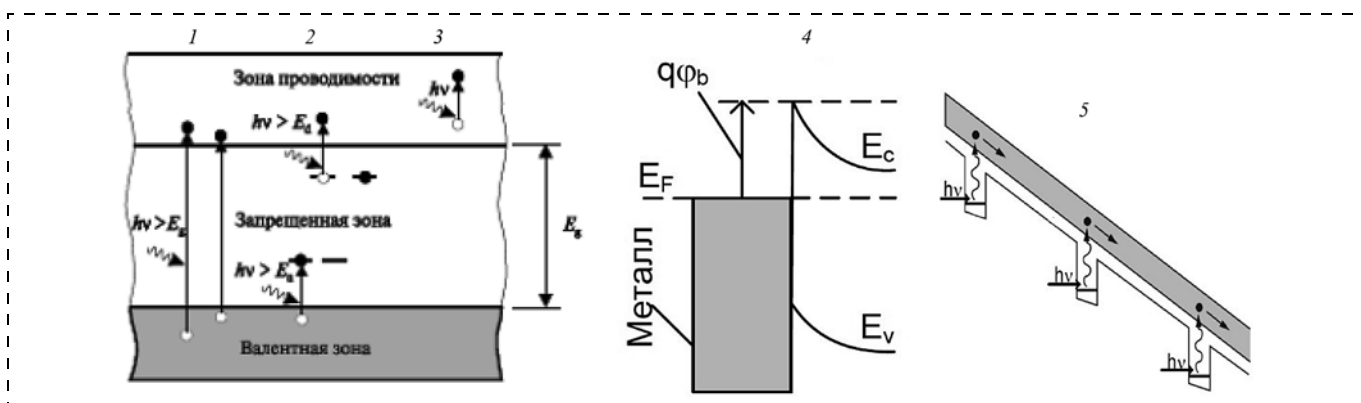


Рис. 3. Фотонные механизмы возбуждения электронной подсистемы в фотонных детекторах:

1 — собственное возбуждение; 2 — примесное возбуждение; 3 — поглощение свободными носителями; 4 — возбуждение в диодах Шоттки; 5 — возбуждение в квантовых ямах

ли с меньшими размерами, удалось значительно уменьшить время отклика: тепловая константа времени t сегодня может составлять около 20 мс и менее. Начиная с конца 1970-х произошел значительный прогресс, связанный с увеличением числа элементов в линейках и матрицах детекторов, что делает их гораздо более экономически эффективными, в первую очередь, благодаря применению кремниевых интегральных схем считывания и обработки информации (*Read out Integrated Circuits — ROICs*). Интеграция таких схем с разными типами детекторов позволила создавать ИК матричные фотоприемные устройства (МФПУ), которые могут насчитывать до 10^8 ИК детекторов, что соответствует числу чувствительных рецепторов в глазу человека ($\sim 2 \cdot 10^8$).

Начиная с 2000-х гг. микроболометры стали преобладающим типом детекторов для создания неохлаждаемых и относительно недорогих МФПУ. К сегодняшнему дню матриц тепловых детекторов производится в несколько раз больше, чем всех остальных ИК матриц вместе взятых. Эта ситуация сохранится и в дальнейшем (рис. 4). Стоимость МФПУ на основе неохлаждаемых болометров при промышленном производстве на два порядка меньше, чем стоимость фотонных матриц [3, 4].

Степень технологической готовности для промышленности по условной шкале фотоприемников различного типа можно сравнить по табл. 1 [4]

Фотонные охлаждаемые детекторы

Типичная конструкция показана на рис. 5 (см. третью сторону обложки). Гибридный фотоприемный узел, включающий матрицу фоточувствительных элементов, состыкованную с кремниевой интегральной схемой считывания, смонтирован в вакуумный корпус. Охлаждение МФПУ обеспечивается микрокриогенной системой охлаждения (МКС), интегрированной с корпусом МФПУ и работающей по циклу Стирлинга.

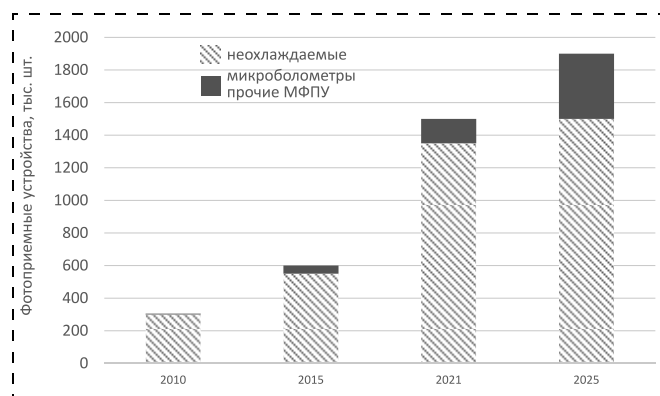


Рис. 4. Динамика и прогноз развития фотоприемных устройств (источник — Yole Development, оценка авторов)

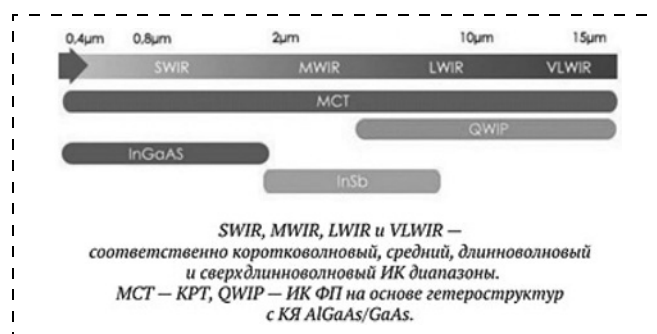


Рис. 6. Основные полупроводниковые материалы для охлаждаемых тепловизионных матриц и рабочие диапазоны

Основой МФПУ являются полупроводниковые фоточувствительные материалы. Основные материалы, используемые для создания фотонных приемников — твердые растворы кадмий—ртуть—теллур (CdHgTe) для спектральных диапазонов 1...2,5 мкм; 3...5 мкм; 8...14 мкм; двойное полупроводниковое соединение антимонид индия (InSb) для спектрального диапазона 3...5 мкм; твердые растворы индий—галлий—мышьяк (InGaAs) для спектрального диапазона 0,4...2,3 мкм; структуры с квантовыми ямами (QWIP) для спектральных диапазонов 3...5 мкм; 8...14 мкм (рис. 6).

Для высокочувствительных и дальнодействующих тепловизионных приборов применяются МФПУ, изготовленные из кадмий—ртуть—теллура (КРТ) и антимонида индия (InSb). В настоящее время производится примерно равное число МФПУ, изготовленных на основе КРТ и на основе InSb (рис. 7, см. четвертую сторону обложки), и это соотношение сохранится в среднесрочной перспективе.

Основным материалом МФПУ длинноволнового спектрального диапазона остается КРТ. КРТ доминирует для военных применений, где требуется высокая чувствительность и быстродействие. Сегодня достигнуты высокие результаты по получению качественных эпитаксиальных структур КРТ на различных полупроводниковых подложках. Наиболее качественные структуры выращивают на подложках CdZnTe — кадмий—цинк—теллур (КЦТ), согласованных с КРТ по постоянной кристаллической решетки. Сложная и многоступенчатая технология получения КРТ включает глубокую очистку исходных Cd, Hg и Te, синтез соединений HgTe и CdTe, получение CdHgTe. Сейчас слои КРТ получают методами жидкофазной или молекулярно-лучевой эпитаксии на подходящей подложке.

В настоящее время основным промышленным методом изготовления эпитаксиальных слоев в ведущих мировых фирмах, производящих многоэлементные и матричные фотодиоды, является метод жидкофазной эпитаксии на подложке из соеди-

нения КЦТ. Преимущества этого метода: относительно низкая стоимость и высокая производительность оборудования, автоматическая доочистка поверхности на начальном этапе роста, дополнительная очистка от примесей в процессе роста и однородность состава по площади. Однако подложки большой площади из КЦТ остаются дорогим изделием с плохо воспроизводимыми характеристиками. Высокая стоимость КЦТ заставляет развивать эпитаксию на альтернативных подложках — арсенид галлия, кремний, германий, анти-

монид галлия и др. В связи с этим повсеместно разрабатываются технологии создания гетероструктур CdHgTe на альтернативных подложках, таких как Si, GaAs, Ge. Большое различие параметров кристаллических решеток, химическая и структурная несогласованность КРТ на Si, GaAs, Ge делает задачу изготовления МФПУ на основе структур КРТ/Si, (GaAs, Ge) с подходящими параметрами, чрезвычайно сложной [3].

Основной тенденцией в настоящее время является снижение массогабаритных показателей и

Таблица 1

Сравнение существующих детекторов для длинноволнового ИК излучения

Типы датчиков и степень промышленной освоенности (от 1 до 9)	Болометры	InSb	HgCdTe	II тип СР	QWIP	QDIP/QDWIP
	Уровень 9	Уровень 9	Уровень 9	Уровень 2—3	Уровень 8	Уровень 1—2
Военные системы	Оружейные прицелы, очки ночного видения, самонаводящиеся ракеты, датчики небольших беспилотных летательных аппаратов, автономные сенсоры наземного базирования	Самонаводящиеся ракеты, захват целей, платформы космического базирования для зондирования земной поверхности	Предпочтительны для применений, требующих высоких параметров	Исследования и разработки	Используются в некоторых военных приложениях	Исследования и разработки
Примеры применения	Предпочтительны для применений, требующих средних или невысоких параметров	Предпочтительны для применений, требующих высоких параметров	Ракетный перехват, наземное и воздушное видение, регистрирующий спектрометр, гиперспектральность, самонаводящиеся ракеты, захват целей, платформы космического базирования для зондирования земной поверхности	В настоящее время разрабатываются в университетах и тестируются в промышленных исследовательских центрах	Используются в некоторых гражданских приложениях	Ранние этапы разработок в университетах
Ограничения	Низкая чувствительность и ограничения по скорости реагирования	Возможность применения только в спектральной области 3—5 мкм	Чувствительность эффективности к вариациям производства. Сложности с применением в спектральной области > 14 мкм	Требуются значительные инвестиции > \$100 млн и фундаментальные исследования новых материалов	Узкая спектральная область и низкая чувствительность	Узкая спектральная область и низкая чувствительность
Преимущества	Низкая стоимость и не требуется активное охлаждение. Используется стандартное технологическое оборудование для производства Si чипов	Близкие к теоретическим характеристики. Останется основным материалом в ближайшие 10—15 лет	Близкие к теоретическим характеристики. Останется основным материалом в ближайшие 10—15 лет	Теоретически лучше, чем КРТ при $\lambda > 14$ мкм. Возможность использования коммерческих III—V технологий изготовления	Низкая стоимость. Возможность использования коммерческих производственных процессов. Однородный материал	Недостаточно данных для характеристики преимуществ материала
СР — сверхрешетка, QWIP — ИК фотоприемник с квантовыми ямами (QWIP — quantum well IR photodetector), QDIP — ИК фотоприемник с квантовыми точками (QDIP — quantum dot IR photodetector)						

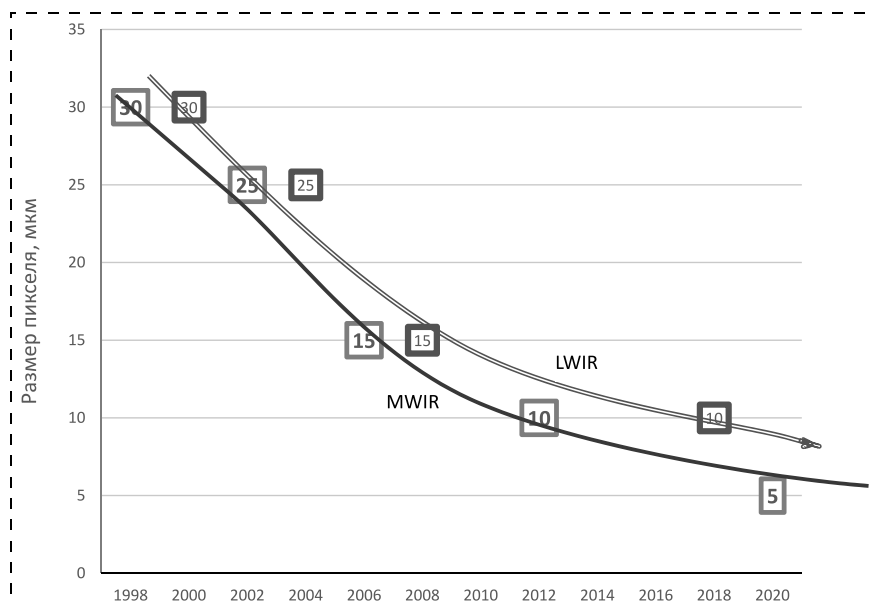


Рис. 8. Динамика снижения размера пикселя для МФПУ на КРТ

потребляемой мощности фотоэлектронных модулей. Формат МФПУ 640×512 элементов при шаге 15 мкм является в настоящее время основным форматом и, по-видимому, по соотношению "цена—качество" на ближайшие 5—10 лет он таковым и останется.

Ведущими фирмами-разработчиками МФПУ в качестве коммерчески доступного достигнут мегапиксельный формат 1280×1024 элементов. В настоящее время цены на такие матрицы достаточно высоки и не позволяют разработчикам аппаратуры осуществить массовый переход на него. Однако уже к 2025 г. такой переход произойдет. За рубежом в направлении разработки и производства изделий фотоэлектроники работает большое число компаний: *AIM Infrared Modules* (Германия), *BAE Systems* (США), *Brandywine photonics LLC* (США), *CalSensors Inc.* (США), *EGIDE USA* (США), *China Germanium Co. Ltd.* (Китай), *FLIR Systems* (США), *SCD* (Израиль), *Raytheon Vision Systems* (США),

RICOR (Израиль), *Selex ES* (Великобритания), *Thales Cryogenics* (Франция), *Lynred* (Франция), *Spectrolab Inc.* (США) и др.

Уменьшение шага и повышение формата является всеобщим трендом практически для всех мировых разработчиков и производителей ИК МФПУ. Фирма *Leonardo* (Великобритания) уже получила шаг 8 мкм для матриц мегапиксельного формата средневолнового ИК диапазона, а фирма *Lynred* (Франция) в текущем году достигнет шага 5...7 мкм для таких матриц (рис. 8). Снижение шага и повышение формата приводит к значительному росту дальности распознавания объектов [5—7].

Для повышения эффективности опико-электронных теп-

ловизионных комплексов наблюдения может быть использован поляризационный контраст, обусловленный различием коэффициентов излучения объекта в спектральном рабочем диапазоне канала для компонентов этого излучения, поляризованных в плоскости выхода его из поверхности объекта и перпендикулярно ей. В последнее время многие передовые производители опико-электронных тепловизионных комплексов используют поляризационные эффекты и создают поляризационные каналы в своих комплексах.

Охлаждаемые МФПУ для спектрального диапазона 3...5 мкм

МФПУ, приведенные в сравнительной табл. 2, выпускают серийно ведущие мировые производители и Россия, они наиболее широко представлены на мировом рынке. Основной формат — 640×512 пикселей, осуществляется переход на формат 1280×1024 пикселей. Достижения в тех-

Таблица 2

Матричные ФПУ для диапазона 3...5 мкм различных мировых производителей

Марка	Scorpio MW	Jupiter MW	Pelican MW	Black-bird	Hawk MW	Hawk HD	HiPIR 1280M	Neutrino	CD640-12-M	640-15K-B	C615M	—	—
Фирма Страна	Lynred Франция		SCD Израиль		Finmeccanica Англия		AIM Германия	FLIR США	DRS США	i3System Корея	GST Китай	НПО "Орион" Россия	МЗ "Сапфир" Россия
Формат	640×512	1280×1024	640×512	1920×1536	640×512	1280×1024	1280×1024	640×512	640×480	640×512	640×512	640×512	320×256
Шаг, мкм	15	15	15	10	16	8	15	15	12	15	15	15	30
Технология	HgCdTe	HgCdTe	InSb	InSb	HgCdTe	HgCdTe	HgCdTe	InSb	HgCdTe	InSb	HgCdTe	InSb	InSb
$T_{\text{раб}}, \text{K}$	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80



Рис. 9. Изображения, полученные в средне- и длинноволновом диапазонах с помощью МФПУ формата 1280×720 с шагом 12 мкм фирмы HRL (США)

нологиях ИК датчиков позволили увеличить размеры матриц и уменьшить размеры пикселей для получения мегапиксельных матриц. Материалы — InSb, KPT, InAsSb.

Охлаждаемые МФПУ для спектрального диапазона 8...12 мкм

МФПУ, представленные в табл. 3, также выпускают серийно ведущие производители и они широко представлены на мировом рынке. Основные форматы — 320×256 , 384×288 и 640×512 , разработаны образцы мегапиксельных МФПУ. Материалы — KPT, QWIP.

Двух- и многоспектральные МФПУ активно разрабатывают практически все ведущие фирмы. Достижимое при их использовании повышение информативности и вероятности обнаружения и распознавания, а также компактность оптико-электронных систем являются основными движущими силами развития этого направления. В следующем десятилетии двухспектральные МФПУ станут коммерчески доступными изделиями ИК фотоэлектроники. Для реализации двухспектральных МФПУ, чувствительных в диапазонах 3...5 и 8...12 мкм, применяют, в основном, технологии на основе KPT. Пример изображений в двух диапазонах (рис. 9), полученных с двухцветного МФПУ,

позволяет оценить степень детальной проработки сцены.

Неохлаждаемые МФПУ

По сравнению с фотонными, тепловые детекторы во второй половине XX века применяли в меньшей степени, поскольку они работали относительно медленно (время ответа $t > 5 \cdot 10^{-2}$ с) и с более низкой чувствительностью. За последние два десятилетия достигнут значительный прогресс в создании неохлаждаемых тепловых детекторов ИК диапазона, которые приблизились по пороговым характеристикам к фотонным детекторам при значительно меньшей стоимости. Стоимость МФПУ на основе болометров при промышленном производстве на два порядка меньше, чем стоимость матриц на основе CdHgTe, InSb [2—4].

Излучение регистрируется при накоплении в объеме приемника теплоты от воздействия энергии излучения за время кадра. Для этого чувствительный элемент максимально теплоизолирован от подложки. Теплоизоляция достигается за счет использования технологии MEMS, которая базируется на глубоком и сухом травлении кремния с применением "жертвенных" слоев (до трех). На поверхности созданных таким путем мембранных конструкций толщиной менее 1 мкм, удерживае-

Таблица 3

Матричные ФПУ для диапазона 8...12 мкм различных мировых производителей

Марка	Mars L	Scorpio LW	Sirius LW	Hawk LW	Harier LW	—	C615S	АСТРОН-640KPT15A810
Фирма	Lynred Франция			Finmeccanica Англия		AIM Германия	GST Китай	ОКБ Астрон, ИФП СО РАН, Россия
Страна								
Формат	320×256	640×512	640×512	640×512	640×512	640×512	640×512	640×512
Шаг, мкм	30	15	20	16	24	15	15	15
Технология	HgCdTe/CdZnTe		QWIP	HgCdTe/CdZnTe		QWIP	T2SL	HgCdTe/Si
$T_{\text{раб}}, \text{ К}$	80	80	73	80	80	70	≤ 80	70

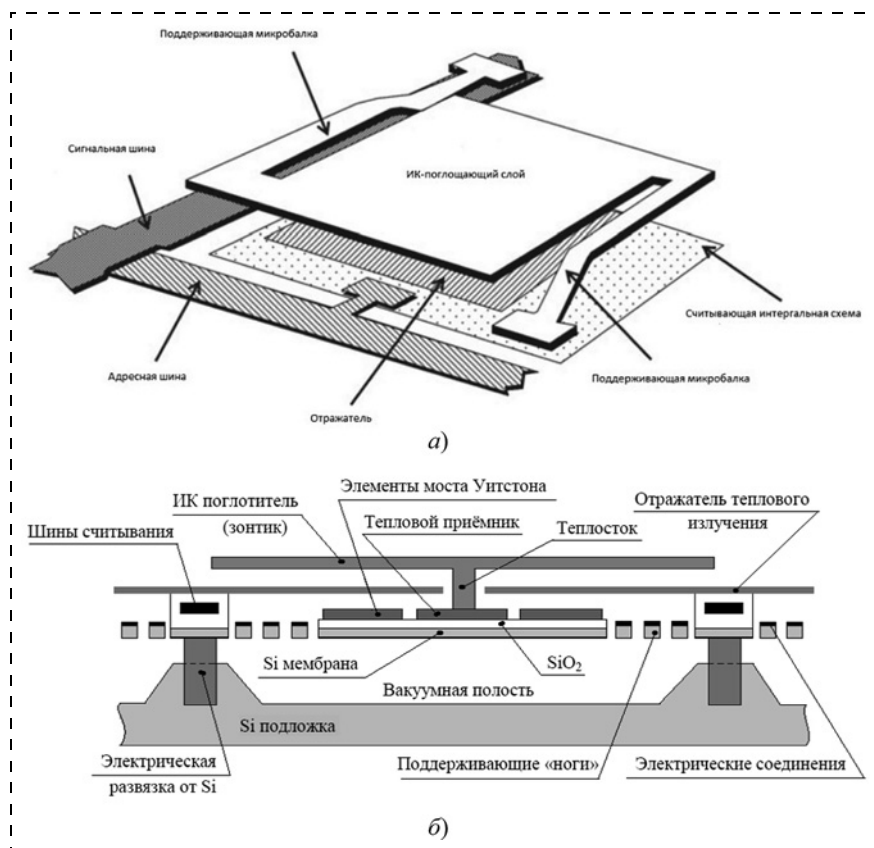


Рис. 10. Конструкции тепловых приемников:

а — чувствительный элемент в форме микромостика на двух консолях; *б* — чувствительный элемент в форме «зонтика» [8]

мых над подложкой на расстоянии ~ 2 мкм с помощью пары микробалок (поддерживающих консолей), размещается фоточувствительный элемент — тонкопленочная структура (рис. 10).

На рис. 11 приведена дорожная карта развития неохлаждаемых матриц тепловых ИК детекторов [4]. Видно, что при улучшении характеристик и увеличении плотности пикселей (уменьшении их размера), число применений может быть значительно расширено. При числе пикселей в матрице $2 \cdot 10^5$ и значении $NETD = 100$ мК (температурная чувствительность, равная минимальной эквивалентной шуму разности температур, *Noise Equivalent Temperature Difference*), использование в устройствах ночного вождения стало повседневным применением. При увеличении плотности пикселей с уменьшением шага до $10 \dots 17$ мкм, при числе пикселей $> 10^6$, стало возможным их широкое применение в наשלмных устройствах, стрелковых прицелах, датчиках наземных охранных устройств и др. Если цели такой программы будут реализованы ($NETD < 10$ мК), что пока встречает технические трудности, то области применения таких тепловых неохлаждаемых матриц могут быть еще расширены.

В настоящее время наиболее широко для создания тепловых формирователей изображения используют оксид ванадия и легированный α -Si:H. Оксид ванадия VO_x имеет высокие значения температурного коэффициента сопротивления (ТКС = 2...3 %), на основе этого материала созданы матрицы форматом 2048×1536 с размером пикселя 17 мкм [4—6]. Однако оксид ванадия — нестандартный материал для КМОП-технологии, изготовление оксида ванадия в виде тонких пленок является сложным для управления процессом ввиду узкого диапазона технологических параметров, обеспечивающих стабильность и оптимальность характеристик оксида. Кроме того, наличие гистерезиса приводит к проблемам при построении тепловых изображений горячих объектов, а теплопроводность таких пленок на порядок больше, чем значения этого параметра для полупроводников (обычно $0,05$ Вт/(см · К)). Болометры на основе α -Si:H имеют высокое сопротивление, но этот материал нестабилен при тепло-

вых обработках и действии ультрафиолетового облучения. Этот материал имеет две фазы: стабильную и метастабильную, которые разделены потенциальными барьерами, что препятствует формированию равновесного состояния.

В настоящее время внимание разработчиков сконцентрировано в области технологических проблем совместимости процесса изготовления болометрических матриц с КМОП-технологией, а также в области оптимизации сопротивления материала, ТКС, тепловой проводимости и других

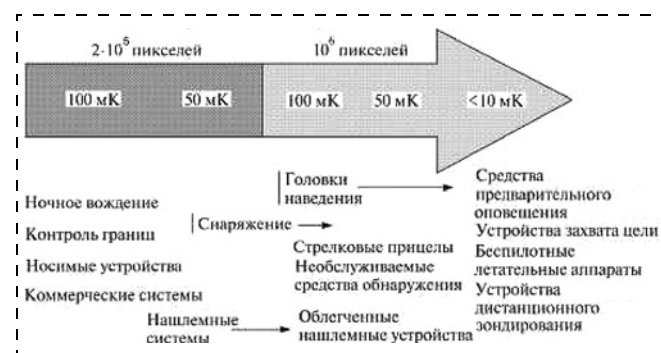


Рис. 11. Дорожная карта развития тепловизионных систем на основе микроболометрических матриц [4]

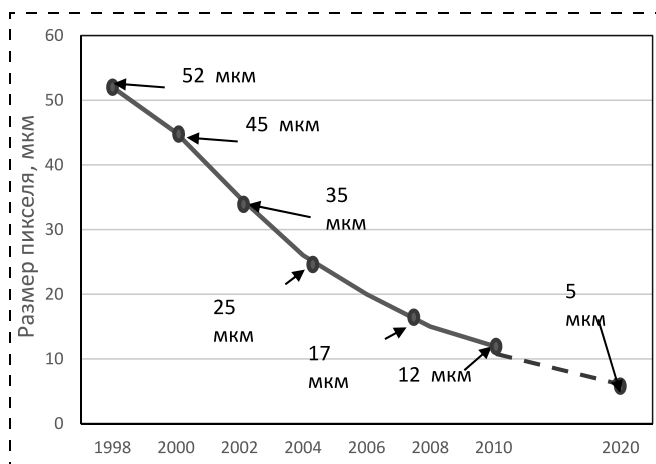


Рис. 12. Динамика снижения размера пикселя для неохлаждаемых микроболометров

характеристик прибора. Болометры на основе карбида кремния SiC имеют высокие значения ТКС (4...6 %), но для стабилизации свойств материала требуется отжиг при температурах около 1000 °С, что несовместимо с КМОП-технологией [6, 7].

Другим направлением развития также как и для охлаждаемых МФПУ, стало создание матричных массивов фоточувствительных элементов с уменьшенным вплоть до 5 мкм шагом элементов (рис. 12).

Еще одной тенденцией развития является создание микроболометров для применения в камерах высокоскоростного формирования изображений. Когда от детектора требуется быстрый отклик, то лимитирующим фактором является значение тепловой постоянной времени отклика τ_{th} , составляющее сегодня 12 мс для типовых болометров с шагом 17 мкм. Путем оптимизации конструкции болометра τ_{th} сегодня может быть уменьшена до значения ниже 3 мс. Уменьшение тепловой постоянной времени может обеспечить улучшение качества изображения (рис. 13).

Рынок микроболометров

По данным аналитического агентства *Yole Development*, основное производство микроболометров сегодня сосредоточено в США и Франции. Также производители имеются в Израиле, Китае, Японии и других странах Юго-Восточной Азии (рис. 14, см. четвертую сторону обложки).

Сравнительные характеристики неохлаждаемых ФПУ различных производителей

Неохлаждаемые ФПУ, представленные в сравнительной табл. 4, выпускают серийно мировые производители и они широко представлены на мировом рынке [6, 8—10].

Ситуация в СССР и России

Разработкой фотоприемных устройств различного назначения в России занимаются ряд предприятий, сосредоточенных в АО "Швабе" и АО "Росэлектроника", в Российской академии наук, а также частные предприятия. Основными поставщиками являются АО "НПО "Орион" и АО "МЗ Сапфир", входящие в АО "Швабе", а также частное предприятие АО "ОКБ "Астрон". АО "НПО "Орион" разрабатывает и ведет производство охлаждаемых и неохлаждаемых фотоприемников. АО "МЗ "Сапфир" производит охлаждаемые и неохлаждаемые МФПУ на основе Si, Ge, InSb, CdHgTe. АО "НИИ "Полус" развивает неохлаждаемые МФПУ на основе InGaAs и производство фоточувствительных полупроводниковых структур.

Предприятия АО "Росэлектроника" специализируются на разработке и производстве матриц видимого диапазона на основе кремния; охлаждаемых МФПУ на основе квантовых ям; барьера Шоттки из силицида платины и охлаждаемых ФПУ на основе примесного кремния (АО "НПП



Рис. 13. Скриншот снимка велосипедов, сделанный с помощью камеры, оснащенной стандартным микроболометром QVGA ULIS с шагом пикселей 17 мкм (слева) и высокоскоростным микроболометром (справа)

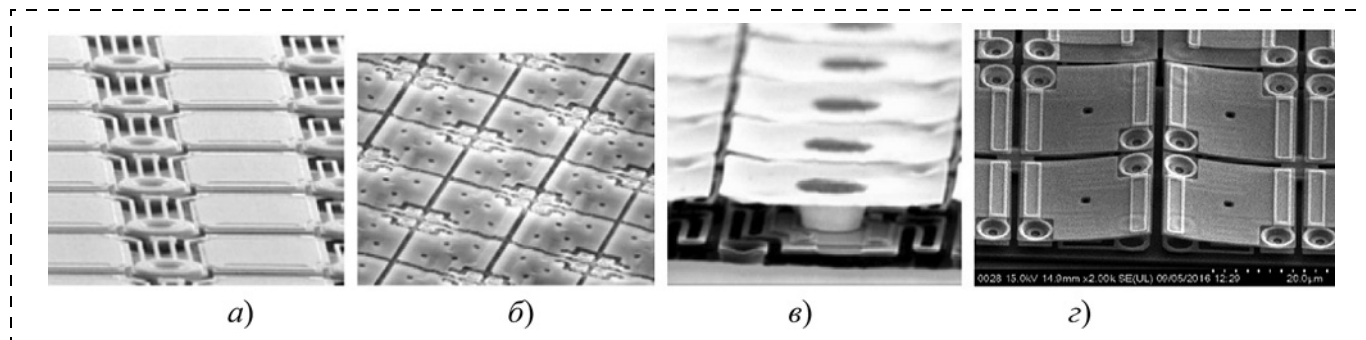


Рис. 16. Топология микроболومترических детекторов разных производителей:
 а — BAE на VO_x ; б — Lynred на a-Si; в — DRS на VO_x ; г — ОКБ Астрон на VO_x

"Пульсар", АО "ЦНИИ "Электрон", АО "ЦНИИ "Циклон" АО "НПП "Восток").

Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН развивает полупроводниковое материаловедение и МФПУ на основе CdHgTe , InAs , микроболметров и квантовых ям.

Таблица 4

Компания	Материал болометра	Формат матрицы	Размер пикселя, мкм	Значение $NEDT$ (мК)
L-3 (США)	a-Si	160×120 , 640×480	30	50
	a-Si/ a-SiGe	320×240 , 1024×768	17	30...50
BAE (США)	VO_x	640×480	12	< 50
	VO_x	1024×768	17	< 50
DRS (США)	VO_x	320×240	25, 17	< 40
	VO_x	640×480 , 1024×768 , 1280×1024	17, 12, 10	< 40
Raytheon (США)	VO_x	320×240 , 640×480	25	30...40
	VO_x	320×240 , 640×480	17	50
	VO_x	1024×480 , 2048×1536	17	50
Lynred (Франция)	a-Si	80×80	34	< 100
	a-Si	160×120	25	< 60
	a-Si	320×240	12	< 60
	a-Si	384×240	17	< 55
	a-Si	640×480 , 1024×768	17	< 50
SCD (Израиль)	VO_x	384×288	25	< 20
	VO_x	384×288	25	< 35
	VO_x	640×480	17	< 35
	VO_x	1024×768	17	< 35
FLIR Systems (США)	VO_x	640×512	17	< 60
	VO_x	336×256	17	< 50
"ОКБ "Астрон" (Россия)	VO_x	320×240	17	< 50
	VO_x	384×288	17	< 50
NEC (Япония)	VO_x	320×240	23,5	< 75
	VO_x	640×480	23,5	< 75
	VO_x	640×480	12	60
	VO_x	320×240	23,5	60

АО "ОКБ "Астрон" (г. Лыткарино) разрабатывает и производит тепловизионные приборы гражданского назначения на основе неохлаждаемых МФПУ собственного производства, а также охлаждаемых МФПУ на основе CdHgTe совместно с ИФП СО РАН. АО "НПО "Орион" приступило к серийному выпуску МФПУ средневолнового диапазона. АО "ОКБ "Астрон" приступило к серийному выпуску матричного фотоприемного модуля в длинноволновом диапазоне на основе охлаждаемой матрицы KPT/Si (производства ИФП СО РАН) и собственной микрохолодильной системы Астрон-МКС500. Астрон-МКС500 работает по замкнутому обратному термогазодинамическому регенеративному циклу Стирлинга с внутренней регенерацией теплоты, в качестве рабочего тела используется сверхчистый газообразный гелий. Достигнутые результаты близки по своим показателям мировому уровню.

Первые попытки создания микроболومترических матриц были начаты в 1994—1995 гг. в НПО "Орион" (Москва) [1—3]. В начале 2000-х гг. предприятие приступило к разработкам приборов формата 320×240 на оксиде ванадия на подложке из нитрида кремния. Однако развивающийся рынок гражданских и охранных применений требовал большого числа микроболметров. До недавних пор обеспечение отечественной техники тепловизионными системами выполнялось в формате закупки, либо совместного производства с иностранными соисполнителями. Необходимость разработки и серийного производства отечественных неохлаждаемых МФПУ стала особенно актуальной после запрета их поставок из-за рубежа.

С 2016 г. на предприятии АО "ОКБ Астрон" освоено производство МФПУ с чувствительностью до 40 мК "Астрон-38425-1" и "Астрон-64025-1" с размером чувствительных элементов матрицы 25 и 17 мкм. МФПУ изготовлено на основе матрицы микроболметров с электронной подсистемой считывания, упакованной в керамический корпус. МФПУ имеет массив микроболметров в виде дву-

мерной матрицы элементарных детекторов, расположенный в фокальной плоскости, состоящей из 384×288 элементов (ФПУ АСТРОН-38417-1), и 640×480 элементов (ФПУ АСТРОН-64017-1). Микроболометры выполнены из оксида ванадия по мостиковой схеме. МФПУ выдает необработанное изображение в аналоговом формате со скоростью до 60 кадров в секунду. Управление электронной подсистемы выполняется по последовательной шине данных. Размер пикселя составляет 17×17 мкм. МФПУ выполнено в корпусе LCC (*Leadless chip Carrier*) из вакуум-плотной керамики (рис. 15, см. четвертую сторону обложки). Топология микроболометрических детекторов разных производителей приведена на рис. 16 [6].

Работы по созданию микроболометрических матриц на основе оксидов ванадия ведут также в ИФП СО РАН, г. Новосибирск [4, 6, 7].

Основные тенденции развития

В последнее десятилетие в фотоэлектронике инфракрасного диапазона наметился ряд новых направлений и тенденций, связанных с повышением разрешающей способности систем, усовершенствованием методов регистрации сверхслабых оптических сигналов, созданием быстродействующих и многоспектральных систем, формированием инфракрасных 3D-изображений и др. [11]:

- переход на полный мегапиксельный формат 1024×1280 элементов с одновременным уменьшением шага элементов, создание сверхкрупноформатных матриц;
- повышение функциональных возможностей МФПУ (3D, лавинное усиление и т. д.);
- создание двух- и многоспектральных МФПУ;
- расширение применений МФПУ коротковолнового ИК диапазона;
- введение цифровой предобработки в БИС считывания;
- создание сверхдлинноволновых МФПУ с граничной длиной волны более 14 мкм;
- поиск новых принципов детектирования ИК излучения и новых фоточувствительных материалов (графен, другие 2D-структуры и т. п.).

Заключение

Последствия происходящего сейчас в мире и их влияние на рынок ИК МФПУ будут краткосрочные и долгосрочные. К краткосрочным можно отнести все, что напрямую связано с медицинской термографией. В первую очередь, это относится к неохлаждаемым тепловым детекторам. Низкое время отклика в случае недорогих "смотрящих" тепловизионных систем практически несущественно, особенно для медицинских приме-

нений при измерении тепловых полей неподвижных объектов или объектов, перемещающихся с малыми угловыми скоростями. В целом, вся индустрия будет испытывать подъем (особенно заметный на фоне возможного замедления мировой экономики в целом), и этот тренд может перейти из краткосрочной в долгосрочную фазу.

Что касается долгосрочных тенденций, то весьма вероятно, что эпидемиологическая угроза займет в общественном сознании такое же место, какое после терактов в Нью-Йорке 2001 г. заняла террористическая угроза. Нельзя исключать появления в аэропортах биометрического контроля в дополнение к существующим протоколам авиационной безопасности, новых протоколов прохождения пунктов перехода границы и пр. Все это потребует резкого увеличения объемов производства и снижения себестоимости изготовления. Будут востребованы технологии еще более крупносерийного формирования в едином техпроцессе многопиксельных матриц с низкой дефектностью, а также их гибридизацию со считывающими схемами. Из достаточно экзотического и дорогого прибора тепловизор в среднесрочной перспективе превратится в почти бытовой прибор. Начинают реализовываться идеи использования в фотоэлектронике метаматериалов, графена и других 2D-структур, что вместе с "традиционным" тепловидением необычайно широко раздвигает границы и возможности. Это значительно расширяет перспективы совершенствования и создания новых инфракрасных оптико-электронных систем.

Список литературы

1. Пономаренко В. П., Филачев А. М. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений. М.: Физматкнига, 2016. 417 с.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной электроники. М.: Физматкнига, 2010. 128 с.
3. Пономаренко В. П. Теллурид кадмия — ртути и новое поколение приборов инфракрасной фотоэлектроники // УФН. 2003. Т. 173, № 6. С. 649—665.
4. Сизов Ф. Ф. ИК-фотоэлектроника: фотонные или тепловые детекторы? Перспективы // Sensor Electronics and Microelectronics Technologies. 2015. Vol. 12, N 1. P. 26—53.
5. Rogalski A. Next decade in infrared detectors // Proc. SPIE 10433. Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV, 104330L (9—10 October 2017); doi: 10.1117/12.2300779
6. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Неохлаждаемые микроболометры инфракрасного диапазона — современное состояние и тенденции развития // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 10. С. 613—624.
7. Самвелов А. В., Ясев С. Г., Москаленко А. С., Старцев В. В., Пахомов О. В. Интегральные микрокриогенные системы Стирлинга в составе криостатируемых фотоприемных модулей на основе матриц длинноволновой ИК области // Фотоника. Россия. 2019. Т. 13, № 1. С. 58—64.

8. **Иванов С. Д., Косцов Э. Г.** Приемники теплового излучения неохлаждаемых мегапиксельных тепловизионных матриц (обзор) // *Успехи прикладной физики*. 2017. Т. 5, № 2. С. 136—154.

9. **Wallace J.** LWIR cameras are the powerhouse behind thermal imaging // *Laser Focus World*. 2020, Jul 14th.

10. **Фомин Ф. В.** Современное состояние и перспективы развития зарубежных ИК систем. Под ред. Н. Н. Вилковой. М.: ЗАО "МНИТИ", 2018. 35 с.

11. **Rogalski A.** Graphene-based materials in the infrared and terahertz detector families: a tutorial // *Advances in Optics and Photonics*. 2019. Vol. 11, N 2. P. 314—379.

N. A. Kulchitsky^{1,2}, Dc. Sc., Professor, **A. V. Naumov**³, Senior Researcher,

V. V. Startsev³, Chief Designer

¹ State Scientific Center of the Russian Federation, NPO ORION JSC, Moscow, Russia

² Moscow Technological University (Moscow Institute of Radio, Electronics and Automatics, MIREA), Moscow, Russian Federation,

³ Astron Design Bureau JSC, Lytkarino, Moscow Region, Russian Federation

Corresponding author:

Kulchitsky Nicolay A., D. Sc., Professor, Moscow Technological University (Moscow Institute of Radio, Electronics and Automatics, MIREA), Moscow, Russian Federation,

E-mail: n.kulchitsky@gmail.com

Development Trends of Infrared Focal Plane Array Detectors

*Received on August 07, 2020
Accepted on September 15, 2020*

Since its inception, the market for infrared (IR) thermal imaging equipment has grown, primarily, due to its military applications. Today, the military sector still provides some growth for the market, but its development paradigm has changed. Now the main growth in the market is provided by the sectors of civil and medical thermography, security and fire surveillance, personal night vision systems and local security niches (municipal, private, etc.). The devices using thermal imagers make it possible to detect in conditions of poor visibility, to detect people with high temperature in the crowd.

In the last decade, a number of new directions and trends have been outlined in infrared photoelectronics. They are associated with increasing the resolution of systems, improving methods for recording ultra-weak optical signals, creating high-speed and multispectral systems, forming infrared 3D images

According to forecast of Maxtech International (USA) and today's estimates of the authors, the market for infrared systems (civil and military) amounted to 10.5 billion dollars in 2017, and could reach 20 billion dollars by 2025. Due to the pandemic, we have restated the Maxtech International's forecasts upwardly for the medium term.

Keywords: thermal imagers, bolometers, photon detectors

For citation:

Kulchitsky N. A., Naumov A. V., Startsev V. V. Development Trends of Infrared Focal Plane Array Detectors, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 9, pp. 500—510.

DOI: 10.17587/nmst.22.500-510

References

1. **Ponomarenko V. P., Filachev A. M.** Инфракрасная техника и электронная оптика. Stanovlenie nauchnyh napravleniya. Moscow, Fizmatkniga, 2016, 417 p. (in Russian).

2. **Filachev A. M., Taubkin I. I., Trishenkov M. A.** Sovremennoe sostoyanie i magistral'nye napravleniya razvitiya tverdotel'noj elektroniki. Moscow, Fizmatkniga, 2010, 128 p. (in Russian).

3. **Ponomarenko V. P.** Tellurid kadmiya — rtuti i novoe pokolenie priborov infrakrasnoj fotoelektroniki, *UFN*, 2003, vol. 173 (6), pp. 649—665 (in Russian).

4. **Sizov F. F.** ИК-фотоэлектроника: фотонные или тепловые детекторы? Perspektivy, *Sensor Electronics and Microelectronics Technologies*, 2015, vol. 12 (1), pp. 26—53.

5. **Rogalski A.** Next decade in infrared detectors. *Proc. SPIE10433. ElectroOptical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV* (9—10 October 2017). 2017; 10433: 104330L1—104330L25. Doi: 10.1117/12.2300779.

6. **Kulchitsky N. A., Naumov A. V., Starcev V. V.** Neohlazhdaemye mikrobolometry infrakrasnogo diapazona-sovremennoe

sostoyanie i tendencii razvitiya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 10, pp. 613—624 (in Russian).

7. **Samvelov A. V., Yasev S. G., Moskalenko A. S., Starcev V. V., Pahomov O. V.** Integral Microcryogenic Stirling Systems as a Part of Cryostatting Photoreceiving Modules Based on Long IR Region Matrix, *Photonics Russia*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 58—64. Doi: 10.22184 / FROS.2019.13.1.58.64.

8. **Ivanov S. D., Koscov E. G.** Priemniki teplovogo izlucheniya neohlazhdaemyh megapiksel'nyh teplovizionnyh matric (obzor), *Uspekhi Prikladnoj fiziki*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 136—154 (in Russian).

9. **Wallace J.** LWIR cameras are the powerhouse behind thermal imaging, *Laser Focus World*, 2020, Jul 14th.

10. **Fomin F. V.** Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya zarubezhnyh IK-sistem. Ed. N. N. Vilkova, Moscow, ЗАО "МНИТИ", 2018, 35 p. (in Russian).

11. **Rogalski A.** Graphene-based materials in the infrared and terahertz detector families: a tutorial, *Advances in Optics and Photonics*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 314—379.

В. Н. Зинченко, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., elpa@elpapiezo.ru, **Н. А. Каширин**, гл. конструктор НПК-3, kashirin_na@elpapiezo.ru, **В. М. Нечаев**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., elpa@elpapiezo.ru, **А. В. Дайнеко**, канд. физ.-мат. наук, зам. генерального директора по науке и инновациям, ddd@elpapiezo.ru, **А. М. Храмцов**, канд. физ.-мат. наук, директор НПК-3, npr_3@elpapiezo.ru, **О. Ш. Мамин**, директор по качеству, dk@elpapiezo.ru, **А. А. Голубский**, зам. директора НПК-3 по научной работе, elpa@elpapiezo.ru, АО "НИИ "Элпа", Москва, Зеленоград

ИЗГИБНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ДАТЧИКОВ УДАРА — АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Поступила в редакцию 07.09.2020

Рассмотрен поиск технических решений и выбор базовой конструкции чувствительного элемента на основе расчетных соотношений, полученных из исследовательских работ и измерений экспериментальных образцов. Расчеты подтверждены на конструкции изгибных чувствительных элементов, изготовленных на основе пленочной технологии, для датчиков удара малогабаритных на предприятии АО "НИИ "Элпа".

Ключевые слова: изгибный чувствительный элемент, датчик удара, биморф

При разработке пьезокерамических чувствительных элементов для акселерометров и датчиков удара как их разновидности используют различные варианты конструкции. Наиболее широкое применение на практике нашли два варианта конструкции: осевые (компрессионные) и изгибные чувствительные элементы [1, 2], работающие на прямом пьезоэффекте.

Компрессионные чувствительные элементы представляют собой пьезоэлементы, работающие на растяжении-сжатии, они отличаются максимально высокой ударопрочностью, но при этом имеют невысокую чувствительность. Кроме того, они не свободны от паразитного влияния пирозффекта.

Изгибные чувствительные элементы представляют собой, как правило, пьезоэлементы — биморфы, закрепленные в виде консоли, что обеспечивает высокую чувствительность и меньшее паразитное влияние пирозффекта на основные параметры. По сравнению с компрессионными, изгибные пьезоэлементы имеют крайне низкую ударопрочность.

Развитие пленочной технологии изготовления в настоящее время позволяет повысить чувствительность компрессионных элементов [1, 2]. Так, использование в качестве пьезоэлемента многослойной заготовки для актюаторов размерами $6 \times 6 \times 2,5$ мм [3], состоящей из 50 слоев пьезокерамики ЦТС-46, позволило приблизить чувствительность по заряду элементов компрессионного типа к чувствительности по заряду изгибных элементов, сохранив при этом достаточно высокий уровень ударопрочности, заметно уступая при этом в чувствительности по напряжению, сложности в изготовлении при повышенной дороговизне, размерах и др.

Следует заметить, что под сложившимся на практике понятием термина "чувствительность", помимо способности выделять полезный сигнал из паразитных сигналов, например шума, зачастую понимают коэффициент преобразования [2], что не всегда является корректным. Ввиду распространенности такого "объединяющего" понятия этого термина, в рамках данной работы можно принять такое "широкое" его понимание, поскольку оно не противоречит основным задачам и целям.

В то же время пленочная технология позволяет существенно уменьшить размеры изгибного пьезоэлемента — биморфа, прежде всего за счет уменьшения его толщины, достигаемой на порядок меньшего значения, чем при обычной технологии. При этом появляется возможность, помимо уменьшения размеров биморфа, получить необходимый уровень ударопрочности при сохранении сравнительно высокой чувствительности как по заряду, так и по напряжению, и весьма слабого паразитного влияния пирозффекта на параметры чувствительных элементов. Остановившись на этом подробнее, рассмотрим чувствительные элементы, выполненные в виде прямоугольной балки (консоли) — биморфа, закрепленного жесткой заделкой в области одного из концов, называемого нерабочей зоной [4]. Незаделанная часть биморфа называется рабочей зоной. В общих чертах конструкция такого чувствительного элемента приведена на рис. 1. При этом предполагается, что на поверхности рабочей и нерабочей зон нанесены электроды.

Рассмотрим консоль, прогибающуюся под силой собственной тяжести, включая влияние на нее ускорения. На рис. 2 она приведена в общих чертах, аналогично [5, 6].

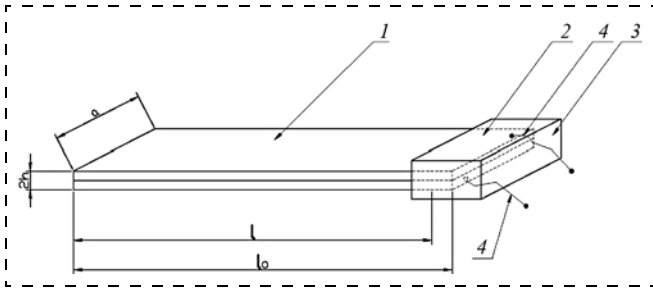


Рис. 1. Чувствительный элемент:

1 — рабочая зона чувствительного элемента; 2 — нерабочая зона чувствительного элемента; 3 — заделка биморфа под консоль; 4 — выводы; l — длина рабочей зоны; l_0 — общая длина биморфа

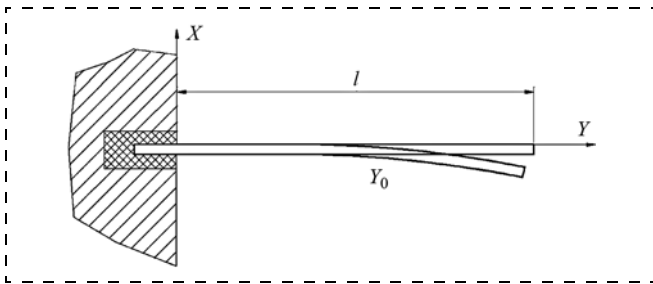


Рис. 2. Изгиб консоли под действием силы собственной тяжести

В этом случае момент силы M , создаваемый массой рабочей зоны биморфа на границе рабочей и нерабочей зон (в сечении $y = 0$), будет определяться совокупностью элементарных моментов M_{y0} , создаваемых элементарными участками dy_0 рабочей зоны в сечении $y = 0$:

$$dM_{y0} = \rho a y_0 dy_0, \quad (1)$$

где $\rho = \rho_0 \frac{(g + \omega)}{g} = \rho_0 n$; ρ_0 — плотность пьезокерамики в отсутствии ускорения ω (в том числе и ударного); g — ускорение земного тяготения; y_0 — координата элементарного участка (она же длина плеча силы относительно границы зон).

Тогда результирующий момент силы M вычисляется по следующей формуле:

$$M_1 = \int_0^l \rho h a y_0 dy_0 = \rho h a l^2. \quad (2)$$

В то же время величина M может быть получена следующим образом.

Рассмотрим фрагмент консоли, как это показано в работе [6] (рис. 3).

Пусть при $x = h$ механическое напряжение равно σ_0 , тогда при $x \neq h$ получим

$$\sigma_x = \sigma_0 \frac{x}{h}. \quad (3)$$

Усилие $dF(x)$, создаваемое слоем x в сечении $y = 0$, будет равно

$$dF(x) = \sigma_x a dx = \frac{\sigma_0 a}{h} x dx. \quad (4)$$

Если условно разделить фрагмент консоли на рис. 3 на верхнюю и нижнюю половины, то можно видеть, что в нижней половине создается такое же усилие, создаваемое слоем x , но с обратным знаком. Такая пара усилий создает элементарный момент $dM(x)$, суммарное значение которых по всему сечению $y = 0$ составит момент сил M_2 , равный

$$M_2 = \int_{-h}^h \frac{\sigma_0 a}{h} x^2 dx = \frac{2}{3} \sigma_0 a h^2. \quad (5)$$

Согласно [6] в сечении $y = 0$ действуют два момента сил — M_1 и M_2 , которые обязаны быть равны, но противоположны по знаку, поскольку M_1 — момент, образуемый силой тяжести рабочей зоны консоли в этом сечении, а M_2 — уравнивающий его момент, образуемый парой сил деформации в этом же сечении.

$$\text{Но тогда } M_2 = M_1 \text{ или } \frac{2}{3} \sigma_0 a h^2 = \rho h a l^2.$$

Откуда

$$\sigma_0 = \frac{3}{2} \frac{l^2}{h} \rho. \quad (6)$$

Следует заметить, что полученные соотношения, в частности (6), носят "идеализированный" характер, поскольку при их выводе не учитывались многие факторы. Например, не существует идеально жесткой заделки биморфа в его нерабочей зоне, что увеличивает радиус кривизны консоли на границе заделки со всеми вытекающими последствиями [5]. Деформация пьезоэлементов в ходе их металлизации и поляризации может привести к созданию паразитных ребер жесткости, которые увеличивают жесткость всей конструкции чувствительного элемента. Наличие электродов и технологии их нанесения на пьезоэлемент также способны повлиять на результат вычислений. Расчет такого

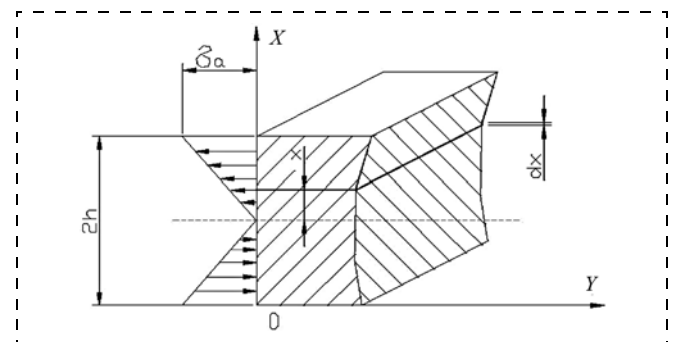


Рис. 3. Фрагмент консоли

влияния упомянутых и других факторов весьма сложен, и в рамках статьи эти вопросы упрощенно обойдены следующим экспериментально-расчетным путем.

Для хорошо изученных конструкций чувствительного элемента (ЧЭ) определим экспериментально коэффициент A в видоизмененной формуле (6):

$$\sigma_0 = A \frac{l^2}{h} \rho. \quad (7)$$

Для этого можно использовать, например, результаты испытаний ЧЭ на ударную прочность. В этом случае, согласно (1), величина ρ определяется следующим соотношением:

$$\rho = \rho_0 \frac{\omega + g}{g} \approx \frac{\omega_{\max}}{g} = \rho_0 n, \quad (8)$$

где $\omega_{\max} \gg g$ — ударное ускорение, при котором ЧЭ ломается и, в этом случае $\sigma_0 = \sigma_{\max}$.

Величина $\sigma_{\max}$ — максимальное механическое напряжение, характеризующее прочность пьезо-керамики на растяжение, даваемое в документации на нее, например в [7]. Подстановкой этих найденных величин в (8) и (7) получим

$$A = \frac{\sigma_{\max} h g}{l^2 \rho_0 \omega_{\max}}. \quad (9)$$

Приняв в качестве такого чувствительного элемента его конструкцию, реализованную в сейсмодатчике СД-1Э, и используя результаты испытаний на нескольких конкретных реализациях ЧЭ на ударную прочность, получим следующую уточненную формулу для σ_0 :

$$\sigma_0 = 0,38 \frac{l^2}{h} \rho. \quad (10)$$

Значение коэффициента $A = 0,38$ носит достаточно условный характер, поскольку, как упоминалось выше, оно зависит от множества случайных факторов, часть из которых даже допускается в документации на пьезоэлементы (ПЭ).

В то же время разброс значений A будет тем меньше или тем стабильнее, чем ближе технологии изготовления различных ЧЭ, их конструкции и материалы.

Так, в частности, как показала практика, при выборе конструкции ЧЭ для малогабаритного датчика удара, описываемого далее, формула (10) позволила довольно точно предсказать его прочностные свойства и существенно сузить круг поиска конструкции.

Определим чувствительность K чувствительного элемента, воспользовавшись результатами, приведенными в работе [2] для невесомой консоли, нагруженной силой F , приложенной к ее свободному

концу. Заметим, что согласно [2], чувствительность ЧЭ изгибного типа по напряжению (K_H) определяется соотношением (для последовательного соединения ПЭ в биморф)

$$K_H = \frac{3}{2} \frac{q_{31} F l}{a h g},$$

где q_{31} — пьезоэлектрический коэффициент по напряжению.

Следует заметить, что нерабочая зона биморфа с электродами вносит вклад в его емкость, уменьшающий K_H . Это можно учесть с помощью поправочного коэффициента

$$K_{\text{попр}} = \frac{l}{l_0}.$$

Заметим, что согласно (2), для консоли, деформируемой силой собственной тяжести, вместо F можно записать ее аналог:

$$F = \rho_0 h a l.$$

Учитывая эти поправки и замечания, а также используя расчетно-экспериментальный метод, описанный выше, и введя коэффициент A_1 , получим

$$K_H = A_1 \frac{q_{31} \rho_0 l^3}{g l_0}. \quad (11)$$

Воспользовавшись результатами измерений K для ЧЭ сейсмодатчика СД-1Э и принимая во внимание приведенное выше, получим следующие выражения K .

Для случая использования параллельного включения пьезоэлементов, составляющих биморф, выражение для чувствительности пьезоэлемента по напряжению в виде коэффициента преобразования K_{H1} выглядит так:

$$K_{H1} = 1,8 \cdot 10^{-4} q_{31} \rho_0 \frac{l^3}{l_0} \frac{1}{g}. \quad (12)$$

Для случая последовательного включения пьезоэлемента получим, соответственно:

$$K_{H2} = 3,6 \cdot 10^{-4} q_{31} \rho_0 \frac{l^3}{l_0} \frac{1}{g}. \quad (13)$$

Аналогично, для чувствительности по заряду K_3 умножением (12) и (13) на емкость, определенную, например в [8], получим, соответственно:

$$K_{31} = 3,6 \cdot 10^{-4} d_{31} \rho_0 l^3 \frac{a}{h} \frac{1}{g}; \quad (14)$$

$$K_{32} = 1,8 \cdot 10^{-4} d_{31} \rho_0 l^3 \frac{a}{h} \frac{1}{g}, \quad (15)$$

где d_{31} — пьезоэлектрический модуль.

Значения коэффициентов 1,8 и 3,6 в формулах (12–15), как и полученное ранее значение $A = 0,38$,

носят условный характер, с теми же замечаниями. В то же время полученные расчетные соотношения позволяют существенно сузить круг поиска технических решений при разработке чувствительных элементов консольного типа, оценивая при этом с достаточной точностью их параметры. Анализ этих соотношений позволяет сделать ряд практических выводов. Так, например, выражение (2) позволяет связать различные виды деформации консоли, что и было сделано при выводе коэффициентов преобразования K_n и K_3 .

Из расчетных соотношений (12) и (13) видно, что K_{n1} и K_{n2} не зависят от a и h , в то время как K_{31} и K_{32} от этих величин зависят, что следует из выражений (14) и (15).

Была рассмотрена возможность создания изгибного датчика удара — акселерометра малогабаритного (ДУМ), со следующими основными техническими требованиями:

- ДУМ размещается в металлокерамическом корпусе ($7 \times 5 \times 2$ мм SAW PKG фирмы "KYOCERA");

- значение K_{n2} не менее 1 В/г;

- ударная прочность не ниже 10^4 г ($n > 10^4$);

- в основе чувствительного элемента используется биморф последовательного типа, с размерами $5 \times 2 \times 0,2$ мм (ориентировочно), выполненный из материала ЦТС-46 и заделанный внутри корпуса в виде консоли с $l_0 = 5$ мм, $l = 3$ мм.

При этом, как упоминалось, в качестве ближайшего аналога, в целях уточнения расчетных соотношений и сравнения была выбрана конструкция чувствительного элемента для сейсмодатчика СД-1Э [9], в котором пьезоэлемент был выполнен из материала ЦТС-19, близкого к ЦТС-46.

Применяя приведенные выше и уточненные с учетом известных параметров чувствительного элемента-аналога расчетные соотношения, при использовании таких биморфов были получены следующие прогнозируемые значения для n и K_{n1} :

$$n = 1,4 \cdot 10^4; \quad K_{n1} = 1,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{В}}{\text{г}}.$$

Была изготовлена экспериментальная партия ДУМ, реальные значения n и K_{n2} в которой составили:

$$n > 1,5 \cdot 10^4; \quad K_{n2} = 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{В}}{\text{г}},$$

при этом значение K_{32} равно

$$K_{32} > 1,1 \cdot 10^{-9} \frac{\text{К}}{\text{Н}}.$$

Полученные результаты подтверждают перспективы использования изгибных чувствительных элементов консольного исполнения с использованием пьезоэлементов, изготовленных по пле-

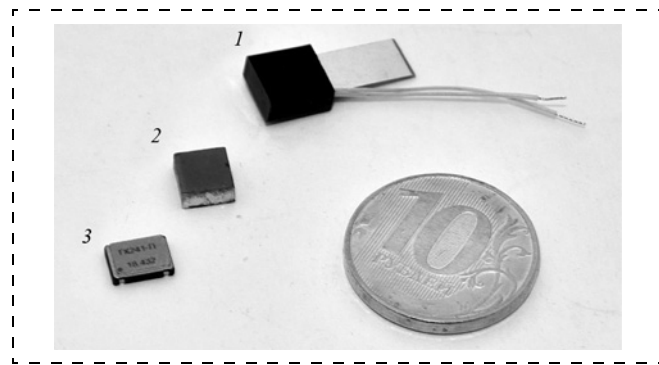


Рис. 4. Конструкция чувствительного элемента для СД-1Э (1); заготовка многослойного чувствительного элемента (2) и датчик (3) (ДУМ)

ночной технологии для малогабаритных датчиков удара — акселерометров с повышенной ударной прочностью, удовлетворяющих современным требованиям. На рис. 4 приведены для сравнения габаритных размеров чувствительные элементы для сейсмодатчика СД-1Э, упоминаемый многослойный пьезоэлемент — заготовка для актюаторов и датчик ДУМ (готовая конструкция).

Описанная конструкция ДУМ и методы расчетов приняты на предприятии как базовые и вошли в этом качестве в ряд разработок. Дальнейшее развитие конструкции в части крепления биморфа в корпусе, например с использованием более мягких компаундов в разных его зонах, отказ от дополнительной шлифовки биморфа позволят существенно увеличить ударную прочность ДУМ без особых потерь в чувствительности, а при использовании параллельного соединения пьезоэлементов, составляющих биморф, увеличить K_3 и уменьшить выходной импеданс.

Следует также заметить, что все расчетные соотношения имеют смысл в дорезонансной области, где соблюдается принцип Релея [10].

Найденные расчетные соотношения позволяют:

1. При поиске технических решений и выборе базовой конструкции чувствительного элемента, даже не прибегая к изготовлению и экспериментальному исследованию дорогостоящих и трудоемких в производстве их лабораторных образцов, с помощью этих соотношений можно оценить, и тем самым прогнозировать, их параметры. Так была создана конструкция малогабаритных изгибных чувствительных элементов типа ДУМ на предприятии на основе пленочной технологии.

2. При серийном выпуске изделий с изгибными чувствительными элементами можно, не прибегая к созданию рабочих мест с дорогостоящими вибростендами и ударными установками (например, более 10^4 г), оценивать предварительно выходные параметры изгибных элементов расчетным методом.

Список литературы

1. **Янчич В. В.** Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2010. 304 с.
2. **Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение.** APC International Ltd. Минск, ООО "ФУАинформ", 2003. С. 33–112.
3. **Патент 2540440**, Российская Федерация, МПК H01L 41/273. Способ изготовления монокристаллических многослойных пьезокерамических элементов-столбиков / Васильева Е. В., Головин В. А., Груша А. Е., Дайнеко А. В., Добрынин Д. А., Нерсесов С. С., Храмов А. М., Чистякова Н. А.; патентообладатель Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт "Элпа" с опытным производством". — № 2013136032/28; заявл. 01.08.2013, опубл. 10.02.2015, бюл. № 4. — 8 с.
4. **Патент 104779**, Российская Федерация. Пьезоэлектрический биморф для чувствительного элемента изгибного

- типа / Зинченко В. Н., Каширин Н. А., Молодкин М. М., Не-чаев В. М., Соловьев М. А., Шелехов В. Н., Широков Ю. В.; патентообладатель Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт "Элпа" с опытным производством". — № 2010150703/28U; заявл. 13.12.2010, опубл. 20.05.2011, бюл. № 14.
5. **Фейнмановские лекции по физике.** Том 7. Физика сплошных сред. М.: Мир, 1977. 288 с.
 6. **Стрелков С. П.** Механика. М.: Наука, 1965. 528 с.
 7. **ОСТ 11 0444—87.** Материалы пьезокерамические. Технические условия.
 8. **Глоzman И. А.** Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972. 288 с.
 9. **Зинченко В. Н., Каширин Н. А., Шелехов В. Н., Дайнеко А. В., Мыльников А.** Акселерометр — сейсмодатчик СД-1Э и его особенности // Электроника. 2018. № 2. С. 138–141.
 10. **Аронов Б. С.** Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоиздат, 1990. 272 с.

V. N. Zinchenko, Ph. D., Leading Researcher, elpa@elpapiezor.ru, **N. A. Kashirin**, kashirin_na@elpapiezor.ru, constructor, kashirin_na@elpapiezor.ru, **V. M. Nechaev**, Ph. D., Leading Researcher, elpa@elpapiezor.ru, **A. V. Dayneko**, Ph. D., Deputy CEO of Science and Innovation, ddd@elpapiezor.ru, **A. M. Khramtsov**, Ph. D., director NPK-3 npk_3@elpapiezor.ru, **O. Sh. Mamin**, Quality Director dk@elpapiezor.ru, **A. A. Golubskiy**, Deputy Director, Elpa Research Institute and Pilot Line, JSC, Moscow, Zelenograd, 124460, Russian Federation

Corresponding author:

Dayneko A. V., Ph. D., Deputy CEO of Science and Innovation, ddd@elpapiezor.ru Elpa Research Institute and Pilot Line, JSC, Moscow, Zelenograd, 124460, Russian Federation

Bending Sensing Elements for Small-Sized Shock Sensors — Accelerometers

Received on September 07, 2020

Accepted on September 28, 2020

The article considers the search for technical solutions and the choice of the basic design of the sensitive element, based on the calculated ratios obtained from research work and measurements of experimental samples. The calculations were confirmed on the design of bending sensitive elements made on the basis of film technology for small-sized impact sensors.

Keywords: bending sensor, shock sensor, bimorph

For citation:

Zinchenko V. N., Kashirin N. A., Nechaev V. M., Dayneko A. V., Khramtsov A. M., Mamin O. Sh., Golubskiy A. A. Bending Sensing Elements for Small-Sized Shock Sensors — Accelerometers, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 9, pp. 511–515.

DOI: 10.17587/nmst.22.511-515

References

1. **Yanchich V. V.** P'ezoelektricheskie vibrozmeritel'nye preobrazovateli (akselometry). Rostov-na-Donu, Izd-vo YuFU, 2010, 304 p.
2. **P'ezoelektricheskaya keramika: principy i primeneniye**, APS International Ltd. Minsk, ООО "ФУАинформ", 2003, pp. 33–112.
3. **Patent 2540440**, Rossijskaya Federaciya, MPK N01L 41/273. Sposob izgotovleniya monolitnyh mnogoslojnyh p'ezokeramicheskikh elementov-stolbikov / Vasil'eva E. V. (RU), Golovnin V. A. (RU), Grusha A. E. (RU), Dajneko A. V. (RU), Dobrynin D. A. (RU), Nersesov S. S. (RU), Hramcov A. M. (RU), Chistyakova N. A. (RU); patentoobladatel' Otkrytoe akcionernoe obshchestvo "Nauchno-issledovatel'skij institut "Elpa" s opytnym proizvodstvom" (RU). — № 2013136032/28; yayavl. 01.08.2013, opubl. 10.02.2015, byul. no. 4, 8 p.
4. **Patent 104779**, Rossijskaya Federaciya, P'ezoelektricheskij bimorf dlya chuvstvitel'nogo elementa izgibnogo tipa / Zin-

- chenko V. N. (RU), Kashirin N. A. (RU), Molodkin M. M. (RU), Nechaev V. M. (RU), Solov'ev M. A. (RU), Shelekhov V. N. (RU), Shirokov Yu. V.; patentoobladatel' Otkrytoe akcionernoe obshchestvo "Nauchno-issledovatel'skij institut "Elpa" s opytnym proizvodstvom" (RU). — № 2010150703/28U; yayavl. 13.12.2010, opubl. 20.05.2011, byul. no. 14.
5. **Fejnmanovskie lekciy po fizike.** Vol. 7. Fizika sploshnyh sred, Moscow, Mir, 1977, 288 p.
 6. **Strelkov S. P.** Mekhanika, Moscow, Nauka, 1965, 528 p.
 7. **OST 11 0444—87.** Materialy p'ezokeramicheskije. Tekhnicheskie usloviya.
 8. **Glozman I. A.** P'ezokeramika. Moscow, Energiya, 1972, 288 p.
 9. **Zinchenko V. N., Kashirin N. A., Shelekhov V. N., Dajneko A. V., Myl'nikov A.** Akselerometr — sejsmodatchik SD-1E i ego osobennosti, *Elektronika*, 2018, no. 2, pp. 138–141.
 10. **Aronov B. S.** Elektromekhanicheskie preobrazovateli iz p'ezoelektricheskoy keramiki, Leningrad, Energoizdat, 1990, 272 p.

Л. Ж. Шугунов, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., lion.shugunov@mail.ru,

ООО "Готовые решения", Чегем,

Т. Л. Шугунов, канд. физ.-мат. наук, tshugunov@yandex.ru,

ГБУ "Аналитический центр", Москва

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ КОРОНАВИРУСА НА ПЭМ И СЗМ

Поступила в редакцию 29.09.2020

В настоящей работе приведены результаты исследования и сравнения изображения коронавируса, полученного на ПЭМ, с результатами обработки с использованием сканирующего зондового микроскопа (СЗМ), в режиме АСМ. Известно, что в этом диапазоне размеров достаточно точные результаты можно получить на СЗМ, с последующей математической обработкой, что представляет научный и практический интерес, а также важно для медицины. Кроме того, исследование процессов различными независимыми методами позволяет получить более надежные результаты — в настоящей работе для получения более надежных результатов значений параметров изображения коронавируса. Приведены также результаты исследования тестовой задачи для иллюстрации работоспособности метода.

Ключевые слова: сечение, адекватная модель, коронавирус, изображение, сканирование, пиксель

Известно, что использование различных методов обработки экспериментальных данных позволяет получить более надежные результаты [1, 2]. В настоящей работе проведены исследования и сравнение изображения коронавируса, полученного на ПЭМ, с результатами обработки с использованием сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). СЗМ оснащены широким набором математических методов обработки изображений для удаления различных видов помех — шумов, возникающих при использовании измерительных приборов для исследования различных процессов и явлений. Возникающие при этом ошибки, естественно, мешают правильной интерпретации полученных результатов. Надо также отметить, что полученные результаты на СЗМ относятся к поверхности коронавируса. Рассмотрим некоторые, основные из этих методов, которые наиболее часто применяют при обработке результатов сканирования различных образцов.

Методы обработки СЗМ-изображений

Медианная фильтрация. При медианной фильтрации строят вариационный ряд для некоторой окрестности каждой точки, и значение в этой точке заменяют на значение элемента, занимающего центральное положение в этом ряду.

Количественный анализ СЗМ-изображений. Следующим методом анализа изображений является построение гистограммы значений в точках изображения.

Определение параметров шероховатости поверхности. Одной из характеристик СЗМ-изображений являются параметры шероховатости, определяемые по формуле

$$S_a = 1/MN \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} |z(x_k, y_i) - \mu|,$$

где S_a — средняя шероховатость; M, N — числа точек сканирования строк и столбцов соответственно; μ — средняя высота изображения:

$$\mu = 1/MN \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} z(x_k, y_i).$$

Построение Фурье-спектра изображения

Одним из важных инструментов количественного анализа является Фурье-спектр пространственных частот изображения [3]. Частотное представление изображения позволяет наблюдать его структурные особенности, связанные с периодичностью повторения элементов, наличием мелких деталей и др. Пространственные частоты имеют размерность, обратную единицам измерения расстояний на изображении.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) изображения, заданного в точках k, l , где $k = 0, M-1$; $l = 0, N-1$ определяется по формуле

$$F_{m,n} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} f_{k,i} \exp \left[-2i\pi \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N} \right) \right],$$

где m, n — номера гармоник; $f_{k,i}$ — коэффициенты разложения Фурье.

В преобразовании Фурье содержатся все гармоники, в том числе инициированные случайными факторами, поэтому возникает необходимость фильтрации от случайных помех и выбора основных периодов. В работах [4–7] разработан мате-

матико-статистический метод анализа различных случайных процессов, в том числе результатов сканирования на СЗМ. В работах [8, 9] приведены некоторые результаты реализации этого метода. В настоящей работе приведены результаты обработки изображения коронавируса, полученного на ПЭМ [12] с применением этого метода и использованием сканирующего зондового микроскопа в режиме АСМ.

Результаты обработки СЗМ-изображений

Одной из основных задач обработки изображения, как отмечено выше, является отделение шума от регулярной части. Решение этой задачи разумно провести с использованием различных критериев случайностей остатка исследуемого ряда, также необходимо применять критерии и регулярной части, чтобы не ограничиться случаем с малым уровнем шума — это и выполняется в предлагаемом методе. В качестве таких критериев в предлагаемом методе использованы широко распространенные классические методы анализа и обработки рядов. Такое комплексное использование критериев различного характера, как считают авторы [4–7], обеспечивает наиболее точное решение поставленной задачи. В работе в качестве критериев случайностей остатка ряда (в данном случае различные сечения изображения скана) использованы основные статистические критерии [10]: автокорреляционная функция (АКФ), критерий Дарбина—Уотсона, коэффициент корреляции Пирсона, число поворотных точек. В качестве критериев регулярной части

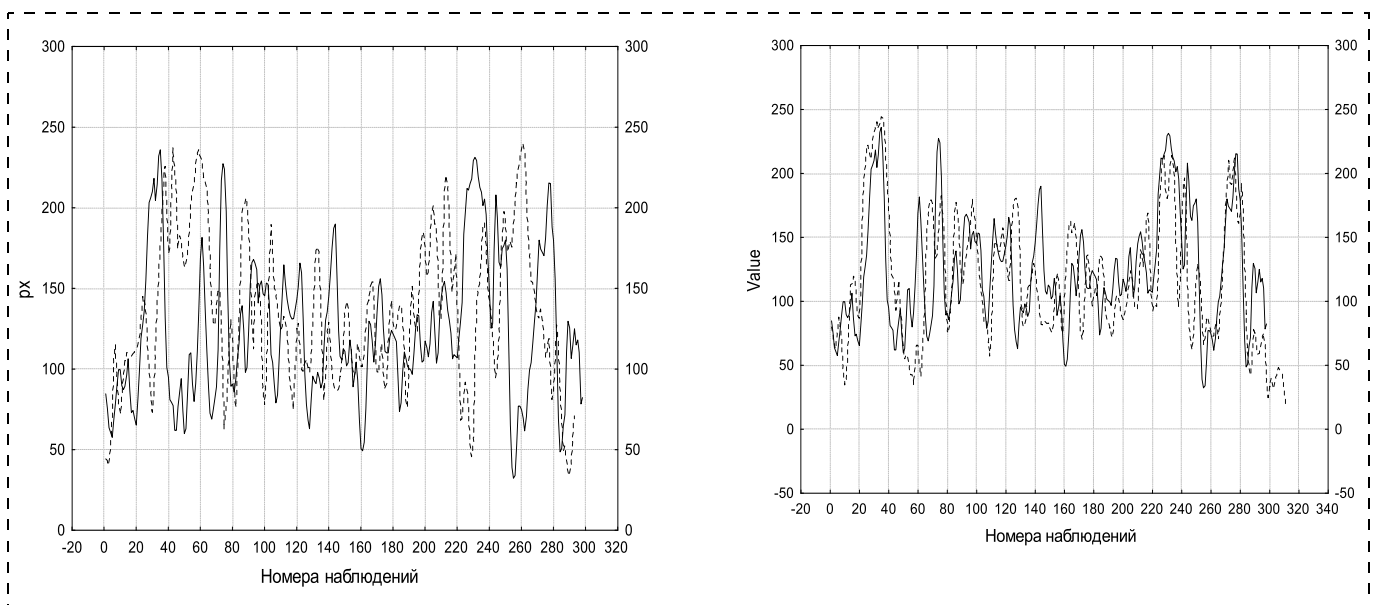


Рис. 1. Горизонтальные сечения в различных строках изображений коронавируса:

значения в 531 (сплошная) и в 525 (штриховая, слева) строках; в 531 (сплошная) и в 562 (штриховая, справа) строках, соответственно

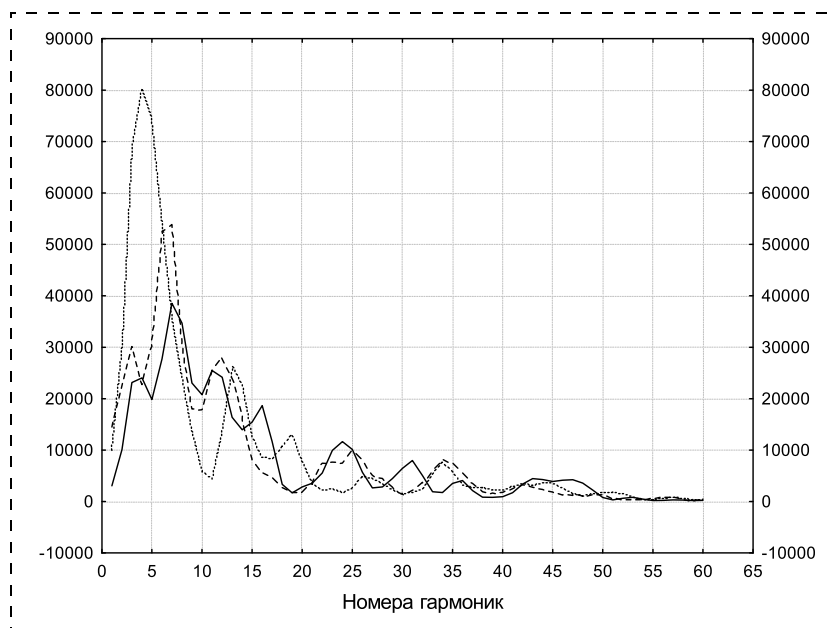


Рис. 2. Спектры сечений в различных строках сканирования:
сплошная в 562, штриховая в 531 и пунктирная в 525 строках соответственно

применяют методы классической декомпозиции, экспоненциального сглаживания и фильтра Ф4253 (4253Н); для оценки линейного тренда — критерии Крамера—Уэлча и Стьюдента. Для обеспечения адекватности модели как основного требования к любой модели используют также невязку. По результатам спектрального анализа вначале строят пробные модели, затем на основе разработанных программ [4—7] из числа пробных, используя приведенные выше основные критерии, выделяют адекватную модель.

На рис. 1 приведены в сравнении различные типы сечений.

На рис. 1, 3, 4 по оси У отложена интенсивность изображения коронавируса при сканировании на СЗМ в пикселях (px).

Строки 531, 525 и 562 — номера строк сканирования. Число строк в разных экспериментах может принимать разные значения — обычно они равны 256, 512, 1024. В данном случае число строк сканирования равно 1024, из которых выбраны указанные сечения в этих строках, поближе к центру, чтобы сечения были длиннее.

Из графиков, приведенных на рис. 1, наглядно видно, что сечения строк 531 (штриховая, справа) и 562 (сплошная, справа) менее коррелированы, чем сечения в строках 531 (штриховая, слева) и 525 (сплошная, слева). Поэтому для дальнейшей обработки выбраны два сечения в строках 531 и 562 как наиболее "разбросанные" (менее идентичные) и в дальнейшем их будем анализировать. Такой анализ позволит выбрать менее "связанные" сече-

ния, чтобы наиболее полно охватить особенности строения вируса.

Полученные сечения достаточно сложные и могут быть аппроксимированы полигармонической моделью вида:

$$Y(x) = m + kx + \sum_{i=0}^{N/2} a_i \cos(\omega_i x) + b_i \sin(\omega_i x) + \varepsilon(x), \quad (1)$$

где m , k , a_i , b_i — коэффициенты модели, подлежащие определению, $\varepsilon(x)$ — случайная часть с нулевым математическим ожиданием.

В результате спектрального анализа по программе Statistica [11] получим графики различных сечений коронавируса [12], изображенные на рис. 2.

Из приведенных на рис. 2 графиков видно, что спектры различных сечений практически совпадают, что

свидетельствует об относительной однородности структуры коронавируса. Поэтому достаточно их сгруппировать по степени идентичности и для полноты результатов выбрать типичные для их обработки.

После такого анализа и расчета всех критериев по приведенной методике все данные заносим в табл. 1 для выбора адекватной модели сечения с учетом их теоретических значений.

Из данных таблицы следует, что по комплексу параметров наиболее подходит вариант 8, так как большинство критериев более соответствует теоретическим значениям, кроме того, вариант 8 более адекватно моделирует ряд-сечение. Поэтому выбирается вариант 8, с периодами: 3, 4; 12; 18; 42.

При выборе адекватной модели также учтены значения АКФ. Тогда получим адекватную модель сечения строки 562 изображения коронавируса в следующем виде:

$$\begin{aligned} Y(x) = & 137,5 - 0,018x - \\ & - 19,38 \cos\left(3 \frac{2\pi}{293} x\right) - 6,93 \sin\left(3 \frac{2\pi}{293} x\right) + \\ & + 21,33 \cos\left(4 \frac{2\pi}{293} x\right) - 15,45 \sin\left(4 \frac{2\pi}{293} x\right) - \\ & - 16,71 \cos\left(12 \frac{2\pi}{293} x\right) + 6,63 \sin\left(12 \frac{2\pi}{293} x\right) + \\ & + 6,53 \sin\left(18 \frac{2\pi}{293} x\right) + 11,07 \cos\left(18 \frac{2\pi}{293} x\right) + \\ & + 0,18 \sin\left(42 \frac{2\pi}{293} x\right) + 5,44 \sin\left(42 \frac{2\pi}{293} x\right). \end{aligned}$$

Построенная модель позволяет восстановить сечение АСМ-изображения коронавируса в строке 562.

Аналогичные исследования проведены и для сечения в строке 531 изображения коронавируса.

После выбора скрытых периодов проверяется адекватность модели, т. е. насколько построенная модель сечения соответствует фактически измеренному сечению АСМ-изображения коронавируса, результаты приведены на рис. 3.

Из сравнения графиков следует, что построенные модели сечений изображения коронавируса достаточно хорошо согласуются с фактическими значениями, что свидетельствует об адекватности модели. Таким образом, практически по всем критериям построенные модели более вероятны и лучше соответствуют фактическим значениям сечений скана.

Значимость тенденции линейного тренда сечения по критерию Крамера—Уэлча ($\text{sig.} = 0,03934 < 1,96$) объясняется случайными факторами, а по критерию Стьюдента ($\text{sig.} = 0,03934 < 0,05$) значима на уровне $p = 0,05$ — уровень доверия или, другими

словами, значение тренда модели с вероятностью 95 %.

После выбора адекватной модели по сечениям изображений коронавируса необходимо определить, какую обработку следует выбрать из перечня

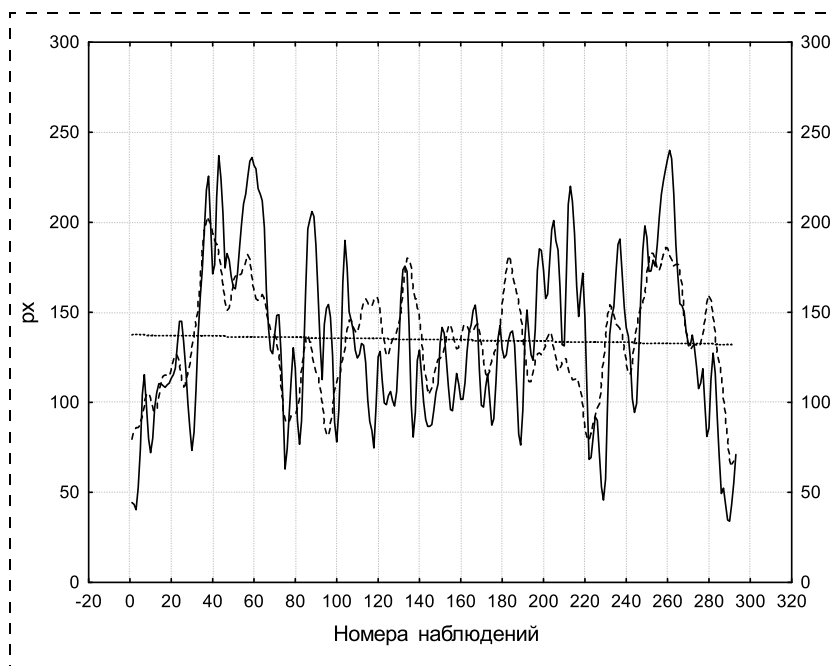


Рис. 3. Фактические (сплошная) и модельные (штриховая) значения, построенные по модели строки 562

Таблица 1

Значения критериев выбора адекватной модели

№ вар.	Гармоники	Критерий Дарбина—Уотсона		Число поворотных точек		Невязка	Коэф. корреляции Пирсона	
		Факт.	Теор.	Факт.	Теор.		Модель клас. декомпозиции	4253H-модель
0	3 4 12 18 25 33 40 42	0,20025	2	85	194	396 714	0,64273	0,61892
1	3 12 18 25 33	0,14667	2	84	194	482 096	0,64273	0,47713
2	4 12 18 25 33	0,15828	2	81	194	443 818	0,49345	0,545129
3	3 12 18 25 33 40	0,15418	2	80	194	489 249	0,49143	0,468502
4	4 12 18 33	0,16003	2	83	194	451 097	0,53766	0,535944
5	3 12 18 40	0,16031	2	73	194	501 942	0,49166	0,451018
6	12 18 25 33 42	0,13830	2	87	194	546 833	0,31743	0,342101
7	3 4 12 18 33	0,20158	2	86	194	403 713	0,64959	0,610806
8	3 4 12 18 42	0,1977	2	76	194	403 579	0,64890	0,613679

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции Пирсона

Комбинация фильтров	Строка	Коэф. корреляции Пирсона
Адекватная модель и Медианная 3 + фильтр Винера (5×11)	531	0,606767
	562	0,612982
Адекватная модель и фильтр Винера (5×5) + Медианная 5	531	0,601317
	562	0,553726

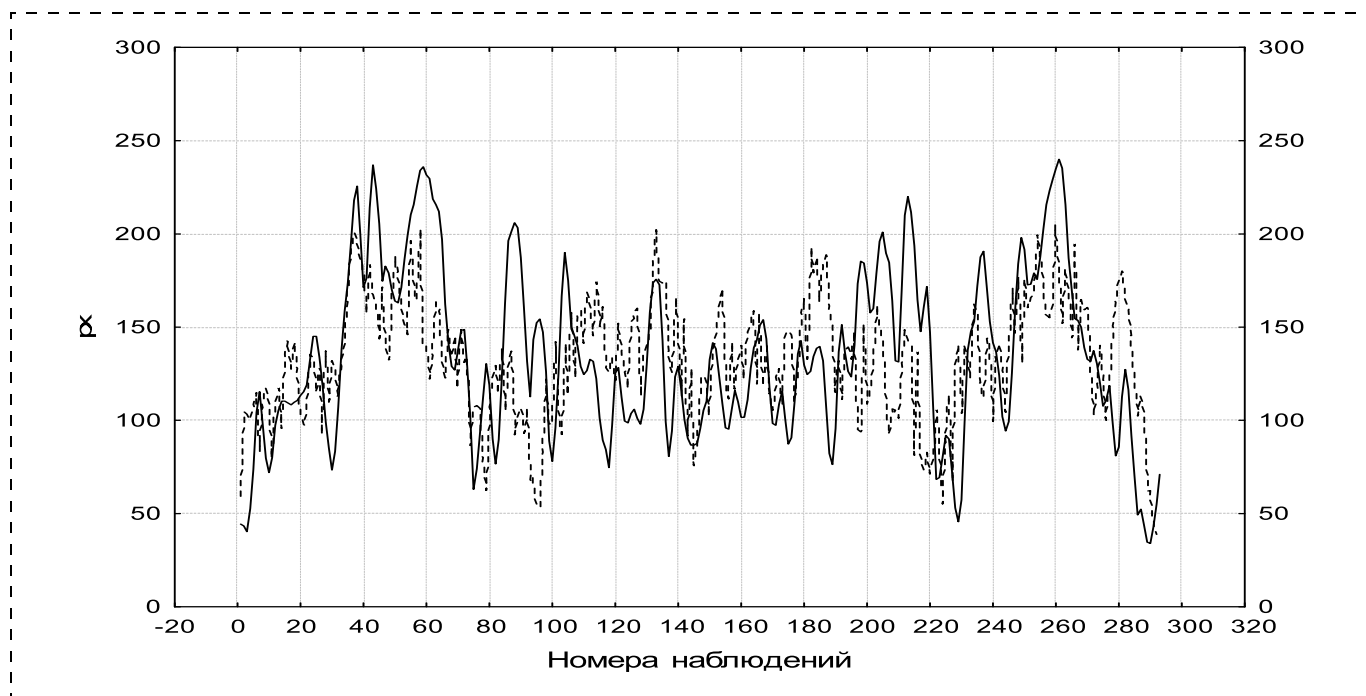


Рис. 4. Фактические значения сечения (сплошная) и значения адекватной модели с шумом (штриховая)

средств, приведенных в программном обеспечении (ПО) СЗМ. Оптимальный вариант фильтрации изображения выбирается по максимуму коэффициента корреляции Пирсона между адекватной моделью и комбинацией методов ПО микроскопа.

В табл. 2 приведены результаты расчетов коэффициентов корреляции Пирсона адекватной модели с различными данными при действии различных фильтров на фактические значения сечений двух исследованных различных строк.

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что коэффициенты корреляции Пирсона для строки 562 равны (для комбинации медианного и фильтра Винера — (0,612982), для комбинации фильтр Винера плюс медианный — (0,601317), а для строки 531 — (0,606767 и 0,553726) соответственно. Анализ коэффициентов корреляции Пирсона для этих строк показывает, что более оптимальным вариантом является использование комбинации фильтров: медианная фильтрация с маской 3 плюс фильтр Винера с маской (11 × 5).

Проведен также анализ работоспособности метода на решении тестовых задач. Тестовая задача выбрана максимально приближенная к фактическим значениям сечений изображения коронавируса. А именно к адекватной модели как к регулярной функции добавлен генератором случайных чисел случайный шум. Уровень шума подбирали так, чтобы остаток сечения был с ним одного порядка. Ниже приведены результаты такого анализа. Проведены количественные (оценки) расчеты, чтобы

определить, насколько близки модельные значения с шумом фактическим значениям сечения. Такие расчеты проведены для различных сечений и различных (близких) уровней шумов.

На рис. 4 приведены, в сравнении, фактические значения и зашумленная адекватная модель.

Из графиков рис. 4 следует, что зашумленная адекватная модель достаточно хорошо согласуется с фактическими значениями сечения изображения. Следует отметить, что точного совпадения значений практически невозможно достичь, так как для этого потребуется бесконечное число вариантов запуска генератора случайных чисел, даже с одним и тем же уровнем шума, и если даже такое совпадение произойдет, то оно будет случайным.

Результаты расчетов показывают, что фактические значения сечения коррелируют с "чистой" адекватной моделью лучше, чем модель с различными шумами, и на втором месте корреляция, когда к модели добавлен шум (с очень малым уровнем), причем при высоком "оптимальном" уровне для одного и того же уровня коэффициент меняется от запуска генератора к запуску, так как каждый раз получаем разные случайные функции.

Сравнение спектров фактических, модельных и зашумленных приведены на рис. 5 при различных уровнях шумов.

Из графиков, приведенных на рис. 5, видно, что спектры фактических и зашумленных значений близки друг другу, а спектр адекватной модели, как

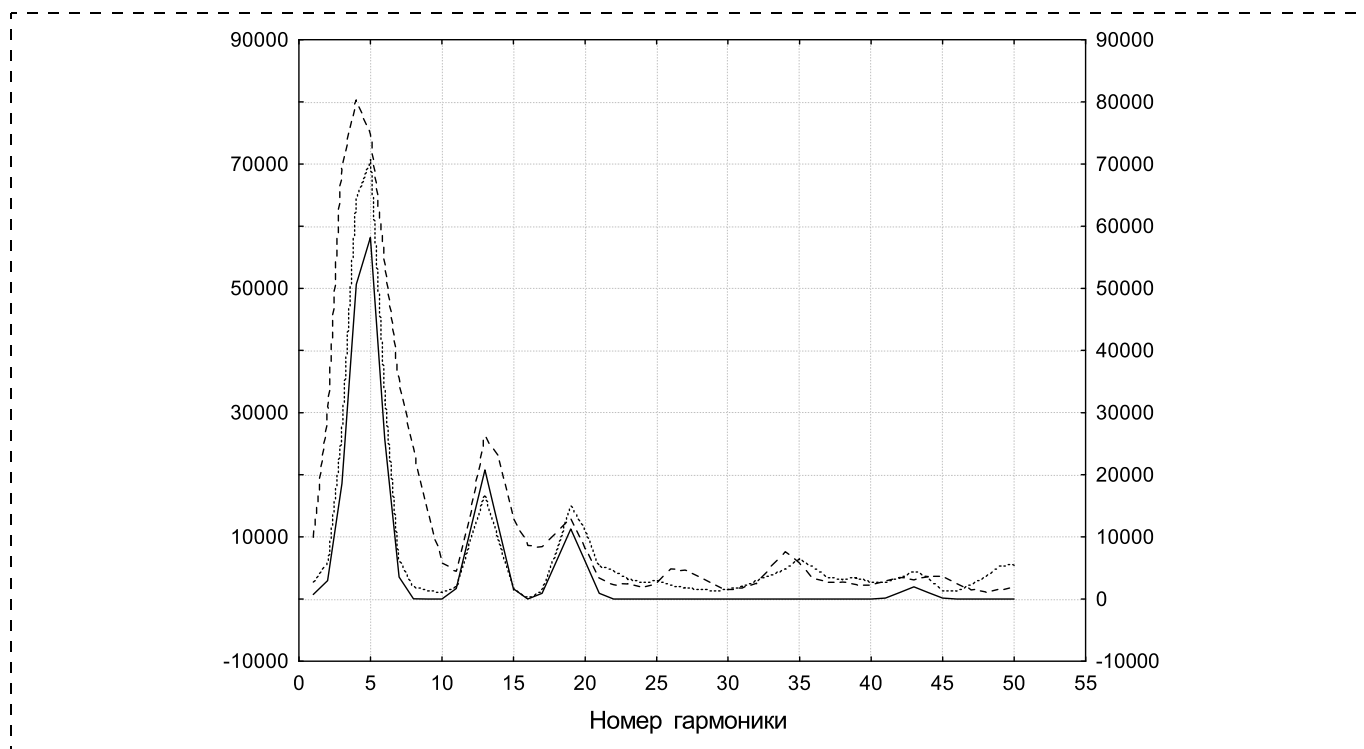


Рис. 5. Спектры фактических (сплошная), модельных (пунктирная) и зашумленных (штриховая) значений изображения

и должно быть, не содержит шумовой составляющей изображения коронавируса.

Выводы. Выполненные исследования показали, что полученное изображение коронавируса на ПЭМ может содержать шумы, проведено решение задачи их удаления с использованием СЗМ предлагаемым методом. А именно, проведено исследование различных сечений изображения коронавируса, найдены и удалены эти шумы, используя комбинацию медианной фильтрации с маской 3 и фильтра Винера с маской (11×5).

Следует отметить, что полученные результаты по применению именно этой комбинации фильтров относятся к данному изображению, в остальных случаях надо определить метод обработки (фильтр), используя предлагаемую методику, приведенную выше. Полученные результаты можно рассматривать как рекомендацию исследователям ПЭМ для удаления шумов из изображений, в частности коронавируса. Надо только отметить, что эти, полученные на СЗМ, результаты относятся к обработанной поверхности коронавируса.

Список литературы

1. Нагорнов Ю. С., Ясников И. С., Тюрков М. Н. Способы исследования поверхности методами атомно-силовой и электронной микроскопии. Учеб. пособие. Тольяти. 2012. 59 с.
2. Ларионов Ю. В. Сравнение размеров, полученных с помощью растрового и просвечивающего электронных мик-

роскопов, в диапазоне менее 50 нм: анализ результатов // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 2. С. 3—10.

3. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. Н. Новгород: ИФМ РАН. 2004. 110 с.

4. Шугунов Л. Ж. Модели анализа температуры воздуха и количества выпадающих осадков в различных зонах Ставропольского края // Естественные и технические науки. 2008. № 4 (36). С. 212—214.

5. Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л., Шугунова Л. Э. Методика аппроксимации временных рядов многолетних наблюдений природных процессов. // Естественные и технические науки. 2011. № 1 (51). С. 246—250.

6. Шугунов Т. Л., Шугунов Л. Ж., Хаушшева М. Х. Моделирование природных процессов и анализ наноструктур тонких пленок. Нальчик. Изд-во М. и В. Котляровых. 2017. 252 с.

7. Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л., Хаушшева М. Х. Статистические модели сезонных колебаний температуры в горной зоне Дагестана. // Успехи современного естествознания. 2017. № 1. С. 111—115.

8. Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л., Яминский И. В. Обработка результатов исследования поверхности сканирующим зондовым микроскопом ФемтоСкан Онлайн // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 2. С. 63—68.

9. Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л., Яминский И. В. Выбор метода обработки результатов исследования поверхности сканирующим зондовым микроскопом ФемтоСкан онлайн // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 4. С. 190—193.

10. Кендэл М. Временные ряды. М.: Финансы и статистика. 1981. 200 с.

11. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов 2-е изд. (+CD). СПб.: Питер, 2003. 688 с.

12. Интернет-ресурс: hypeave.ru.

L. Zh. Shugunov, D. Sc., Leading Researcher, lion.shugunov@mail.ru,
Ready solutions LLC, Chegem,
T. L. Shugunov, Ph. D., tshugunov@yandex.ru,
Analytical Center, Moscow

Corresponding author:

Shugunov Lion Zh., D. Sc., Leading Researcher, Ready solutions LLC, Chegem, Russian Federation
E-mail: lion.shugunov@mail.ru

Comparative Analysis of the Results of Coronavirus Imaging on PEM and SPM

Received on September 29, 2020

Accepted on October 12, 2020

This paper presents the results of research and comparison of the image of the coronavirus obtained on PEM with the results of processing using a scanning probe microscope in AFM mode. It is known that in this size range, fairly accurate results can be obtained on SPM devices, followed by mathematical processing, which is of scientific and practical interest, which is also important for medicine. In addition, the study of processes-objects using various independent methods allows you to get more reliable results, in this paper, to obtain more reliable results of the values of the characteristics-parameters of the coronavirus. The results of a test problem study are also given to illustrate the method's performance.

Keywords: cross-section, adequate model, coronavirus, image, scan, pixel

For citation:

Shugunov L. Zh., Shugunov T. L. Comparative Analysis of the Results of Coronavirus Imaging on PEM and SPM, *Nano- and microsystemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 9, pp. 516–522.

DOI: 10.17587/nmst.22.516-522

References

1. **Nagornov Yu. S., Yasnikov I. S., Shurikov M. N.** Methods of surface investigation by atomic force and electron microscopy. Tolyatti. Textbook. 2012. 59 p. (in Russian).
2. **Larionov Yu. V.** Comparison of sizes obtained using scanning and transmission electron microscopes in the range of less than 50 nm: analysis of results, *Nano- i microsystemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, pp. 3–10 (in Russian).
3. **Mironov V. L.** Fundamentals of scanning probe microscopy: textbook. Handbook for senior students of higher educational institutions. N. Novgorod: IFM RAS. 2004. 110 p. (in Russian).
4. **Shugunov L. Zh.** Models for analyzing air temperature and precipitation in various zones of the Stavropol territory // *Natural and technical Sciences*. 2008. no. 4 (36), pp. 212–214 (in Russian).
5. **Shugunov L. Zh., Shugunov T. L., Shugunova L. E.** Method of approximation of time series of long-term observations of natural processes, *Natural and technical Sciences*, 2011, no. 1 (51), pp. 246–250 (in Russian).
6. **Shugunov T. L., Shugunov L. Zh., Haupsheva M. H.** Modeling of natural processes and analysis of nanostructures of thin films. Nalchik. Publishing house of M. and V. Kotlyarov. 2017. 252 p. (in Russian).
7. **Chugunov L. Zh., Chugunov T. L., Housewa M. H.** Statistical model for seasonal variations of temperature in the mountain area of Dagestan, *Successes of modern natural science*, 2017, no. 1, pp. 111–115 (in Russian).
8. **Shugunov L. Zh., Shugunov T. L., Yaminsky I. V.** Processing of surface investigation results with a scanning probe microscope FemtoScan online. *Nano- i microsystemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 63–68 (in Russian).
9. **Shugunov L. Zh., Shugunov T. L., Yaminsky I. V.** Choice of method for processing the results of surface investigation with a scanning probe microscope FemtoScan online. *Nano- i microsystemnaya tekhnika*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 190–193 (in Russian).
10. **Kendal M.** Time series. Moscow, Finance i statistika, 1981, 200 p. (in Russian).
11. **Borovikov V.** STATISTICA. The art of data analysis on a computer: for professionals 2nd ed. (+CD). Saint Petersburg, Peter, 2003. 688 p. (in Russian).
12. **Internet** resource: hypeave.ru.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2020 г.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Булярский С. В., Лакалин А. В., Латипов Е. В. Термогравиметрический анализ углеродных нанотрубок № 4
- Булярский С. В., Лакалин А. В., Рязанов Р. М. Улучшение эмиссионных характеристик углеродных нанотрубок после обработки в плазме аммиака № 5
- Булярский С. В., Светухин В. В., Кицюк Е. П., Шаманов А. А., Рязанов Р. М. Эмиссия Шоттки в контактах золото — углеродные нанотрубки — титан № 2
- Деспотули А. Л., Андреева А. В. Наноионика — развивающаяся информационная система. Часть 1. Этапы становления и современное состояние наноионики в России № 8
- Деспотули А. Л., Андреева А. В. Наноионика — развивающаяся информационная система. Часть 2. От первых работ к современному состоянию наноионики за рубежом № 9
- Ларионов Ю. В. Изменение значения ширины выступа в результате его сканирования в РЭМ № 5
- Ларионов Ю. В. Изменение размеров выступа меры МШПС-2К при ее контроле в РЭМ № 4
- Ларионов Ю. В. Сравнение размеров, полученных с помощью растрового и просвечивающего электронных микроскопов, в диапазоне менее 50 нм: анализ результатов. № 1
- Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л., Яминский И. В. Выбор метода обработки результатов исследования поверхности сканирующим зондовым микроскопом ФемтоСкан Онлайн № 4
- Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л., Яминский И. В. Обработка результатов исследования поверхности сканирующим зондовым микроскопом ФемтоСкан Онлайн № 2
- Юров В. М., Маханов К. М. Оценка температуры плавления наноструктур твердых тел № 7

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Ануфриев Ю. В., Зенова Е. В., Воронков Э. Н., Файрушин А. Р. Передача информации энтропийной акустической волной в тонкой пленке стеклообразного полупроводника № 5
- Белов В. С. Электрофизические характеристики структур на основе оксида тантала № 8
- Булярский С. В., Белов В. С., Литвинова К. И., Першина Е. А., Коива Д. А., Шибалов М. В., Тимофеева Е. Р., Орлов А. П. Оксид гафния в туннельных структурах никель — диэлектрик — алюминий. № 3
- Булярский С. В., Светухин В. В. Растворимость примесей в нанокристаллах кремния № 7
- Волобуев А. Н. Взаимодействие электромагнитной волны и метаматериала с киральными включениями индуктивного типа № 3

- Егоренков В. М., Прудников Н. В. Исследование и оптимизация слоев изотопа ^{241}Am для создания источников тока на основе ядерной энергии. № 1
- Зенченко Н. В., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Крапухин Д. В., Мальцев П. П., Щеглова Т. А. Применение аддитивных технологий при исследованиях электромагнитных волн миллиметрового диапазона № 6
- Крупкин Е. И., Аверин И. А., Алимова Е. А., Карманов А. А., Пронин И. А., Якушова Н. Д. Исследование влияния времени отжига наноструктурированных пленок оксида цинка на их структуру и фотокаталитические свойства. № 5
- Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Нанопотоника — новый двигатель рынка арсенида галлия № 4
- Любимов А. В., Коровин Г. В., Иванов Е. А. Концепция изготовления двухсторонних коммутационных плат для силовой электроники на основе алюмонитридной керамики с переходными металлизированными отверстиями № 7
- Мустафаев М. Г., Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г. Материаловедческо-технологический подход при формировании межсоединений в микроэлектронных приборных структурах № 5
- Мустафаев М. Г., Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г. Технологические принципы формирования приборных структур с воспроизводимыми параметрами № 9
- Панас А. И., Чигарев С. Г., Вилков Е. А., Бышевский-Конопко О. А. Возникновение собственной намагниченности в антиферромагнитной пленке FeMn под действием спин-поляризованного тока № 8
- Пустовалов А. А., Цветков Л. А. Высокообогащенный никель-63 и тритий — безальтернативная основа крупносерийного производства бета-вольтаических атомных батарей. № 1
- Темнов А. М. Гибридно-монокристалльные интегральные схемы СВЧ на алмазе № 6
- Тихонов Р. Д. Электрохимическое осаждение сплава NiFe из концентрированного хлоридного электролита № 8
- Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А., Горелов Д. В., Казаков Ю. В. Магнитные свойства пленок Co—Ni—Fe, полученных электрохимическим осаждением по методу Тихонова. № 3
- Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А., Горелов Д. В., Казаков Ю. В. Электрохимическое осаждение пленок сплава NiFe из хлоридного электролита с низкой концентрацией основных солей № 1
- Юров В. М. Толщина поверхностного слоя фторидов щелочноземельных металлов и магния и фторидов природных минералов № 2
- ## МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ
- Борисенков И. Л., Крутов А. Ф., Козлов Н. П., Леонович Г. И., Никонов В. И., Захаров В. Н. Математическая модель отраженного оптического сигнала при неоднородной продольной деформации внутриволоконной брэгговской решетки № 7

- Булярский С. В., Светухин В. В.** Образование нанокристаллов кремния после ионного легирования оксида кремния. № 6
- Васильев Д. В., Амеличев В. В., Костюк Д. В., Казаков Ю. В., Низелко Е. Е., Крикунов А. И.** Основные конструктивно-технологические особенности MRAM № 7
- Гандилян С. В.** Некоторые вопросы моделирования динамических и энергетических характеристик совмещенных электромагнитоиндукционных микроэлектромеханических преобразователей энергии и их систем. № 5
- Дормидошина Д. А., Рубцов Ю. В., Савин М. Л.** Применение ИСМН в процессах сбора, обработки и анализа информации о надежности изделий микроэлектроники № 9
- Корляков А. В., Михайлова О. Н., Трушлякова В. В.** Мембранные окна из нитрида кремния для вывода мягкого рентгеновского излучения. № 2
- Мустафаева Д. Г.** Конструктивно-технологические подходы при создании пленочных преобразователей. № 3
- Редькин С. В.** Упрощенная модель расчета параметров плазменного технологического процесса формирования кубического карбида кремния на кремнии. . № 1
- Тимошенков В. П., Хлыбов А. И., Родионов Д. В., Пантелеев А. И.** Исследования влияния элементов конструкции мощных СВЧ GaN-транзисторов на их тепловой режим № 8

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Александров П. А., Жук В. И.** О влиянии на работу квадрированного транзистора коротких замыканий между затворами одиночных транзисторов, другими их выводами и источником питания. № 8
- Алешин А. Н., Рубан О. А.** Деградиационные процессы в программируемой металлизированной ячейке. Явление и причины его возникновения. № 6
- Алешин А. Н., Рубан О. А.** Роль диффузионных процессов в формировании токопроводящих каналов в ячейках с резистивной памятью. № 4
- Афанасьев П. В., Бохов О. С., Ильин С. Ю., Лучинин В. В.** Рекуперация энергии. Конформно-интегрируемые гибридные микросистемы № 4
- Барулина М. А.** Уравнения движения чувствительного элемента НЭМС-датчика как прямоугольной размерно-зависимой нанопластины № 3
- Гамкрелидзе С. А., Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Майтама М. В., Михалев А. О.** Каскодная монолитная интегральная схема малошумящего усилителя в диапазоне частот 8–12 ГГц на наногетероструктуре нитрида галлия № 2
- Гнатюк Д. Л., Крапухина С. Л., Лисицкий А. П., Мальцев П. П.** Обзор перспективных монолитных интегральных схем усилителей на нитриде галлия для диапазона частот 80...100 ГГц № 4

- Гуляева П. С., Сидорова С. В.** Резистивная память: особенности, принцип действия и модернизация технологии внедрением лабиринтных пленок. № 7
- Дайнеко А. В., Никифоров В. Г., Храпцов А. М., Шаховостов Д. Ю., Щеголева Т. В., Мамин О. Ш.** Актуаторы пьезоэлектрические многослойные для систем нанопозиционирования. № 5
- Зинченко В. Н., Каширин Н. А., Нечаев В. М., Дайнеко А. В., Храпцов А. М., Мамин О. Ш., Голубский А. А.** Изгибные чувствительные элементы для малогабаритных датчиков удара — акселерометров № 9
- Клочков А. Н.** InP НЕМТ транзисторы и монолитные интегральные схемы: обзор № 2
- Койгеров А. С., Андрейчев С. С.** Режекторный фильтр на поверхностных акустических волнах на основе однонаправленных преобразователей № 9
- Кулакова А. А., Лукьяненко Е. Б.** Оптимизированные триггерные схемы на логических КМОП-элементах. № 3
- Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В.** Тенденции развития матричных фотоприемных устройств ИК диапазона № 9
- Матюшкин И. В., Орлов О. М., Лебедев А. О., Мизгинов Д. С.** Феномен нелинейной динамики при циклировании мемристора № 3
- Никифоров В. Г., Дайнеко А. В., Гриценко А. Л.** Состояние и перспективы развития пьезоэлектрических генераторов № 2
- Просянюк В. В., Паршиков Б. Ю., Прудников Н. В., Суворов И. С.** К вопросу о миниатюрных источниках тока на основе энергетических конденсированных систем № 4
- Путинцев Б. Г.** Обзор преопередающих МИС диапазона 60 ГГц № 7
- Рубцов Ю. В., Дормидошина Д. А., Савин М. Л.** Исследования и результаты сбора, анализа и обобщения информации о выводных рамках, применяемых в изделиях микроэлектроники № 7
- Тиняев В. А., Эль-Хажж Х. М.** Анализ эффективности методов снижения энергопотребления цифровых СБИС № 1
- Черемисин А. Б., Мацегор С. А., Пузанов Д. М.** Прототип тонкопленочного полевого транзистора с InZnON каналом для разработки нового типа фотодетекторов с чувствительным слоем из коллоидных квантовых точек. № 8

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

- Абрамов И. И.** Перспективы и проблемы создания сверхразума. Часть I. № 1
- Абрамов И. И.** Перспективы и проблемы создания сверхразума. Часть II. № 2
- Шугунов Л. Ж., Шугунов Т. Л.** Сравнительный анализ результатов изображения коронавируса на ПЭМ и СЗМ № 9

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

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

Сдано в набор 21.10.2020. Подписано в печать 25.11.2020. Формат 60×88 1/8. Заказ МС920. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансд солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансд солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье Н. А. Кульчицкого, А. В. Наумова, В. В. Старцева
**«ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ
 ИК ДИАПАЗОНА»**

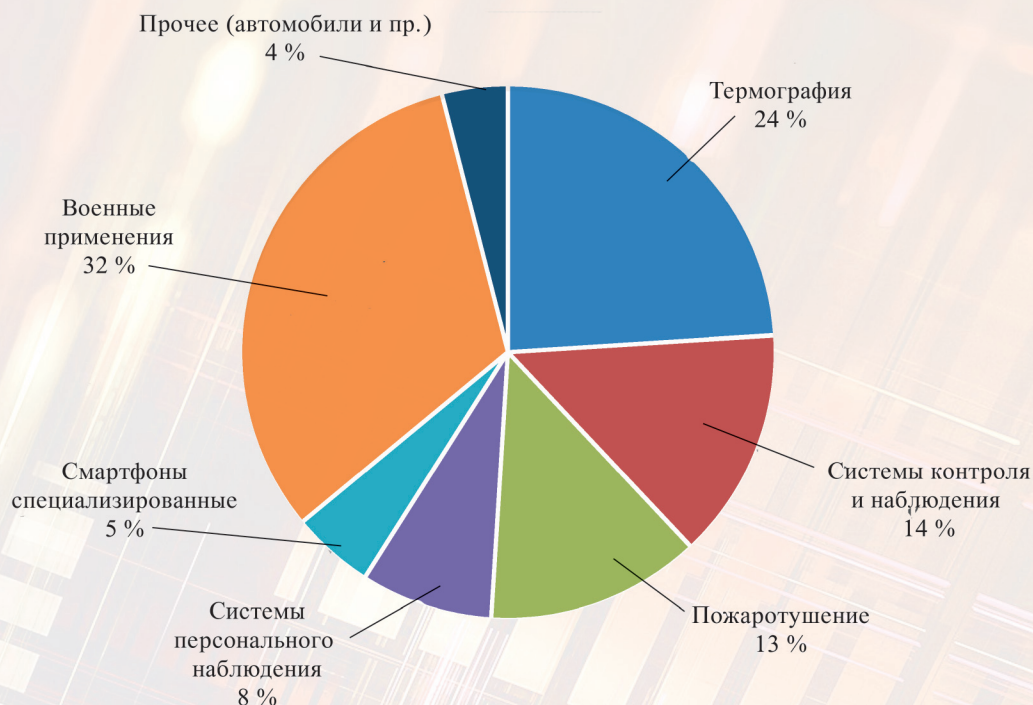


Рис. 1. Области использования тепловидения (источник – *Yole Development*)

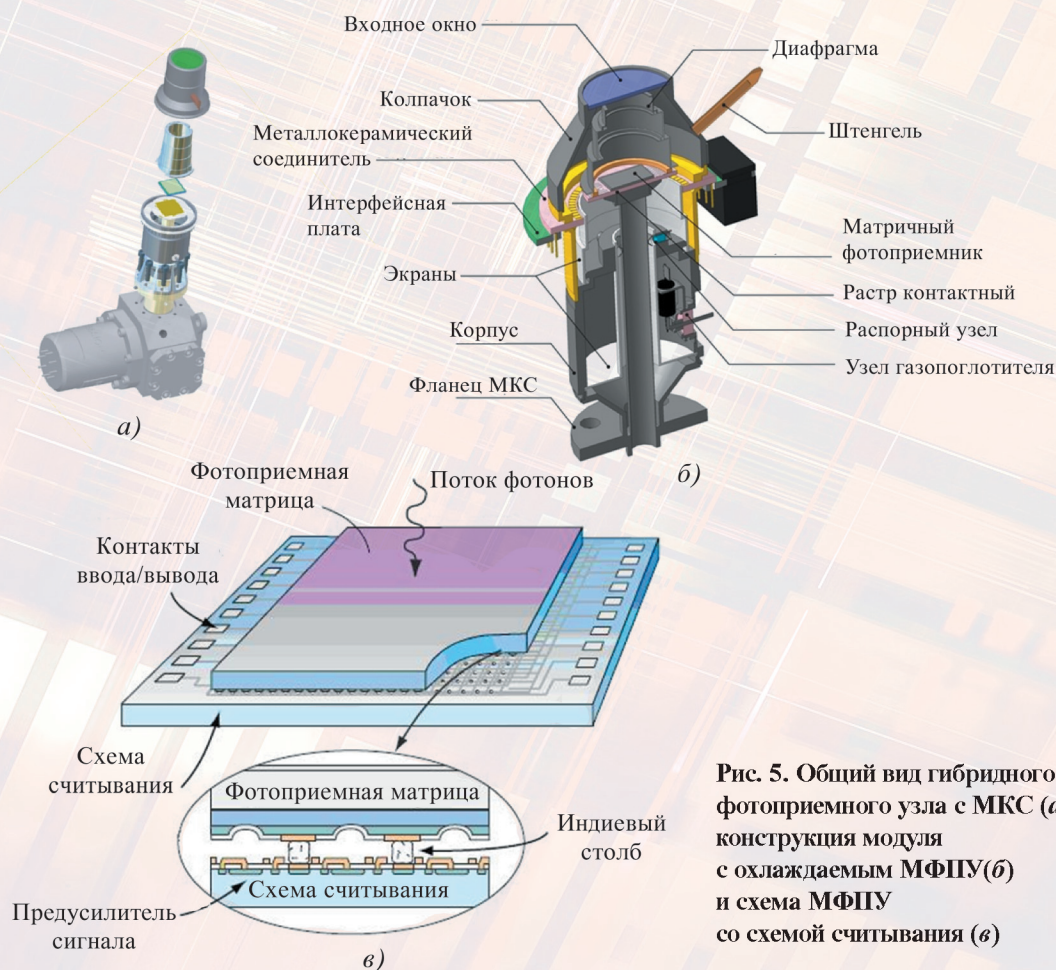


Рис. 5. Общий вид гибридного фотоприемного узла с МКС (а), конструкция модуля с охлаждаемым МФПУ (б) и схема МФПУ со схемой считывания (в)

Рисунки к статье Н. А. Кульчицкого, А. В. Наумова, В. В. Старцева
**«ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ
 ИК ДИАПАЗОНА»**

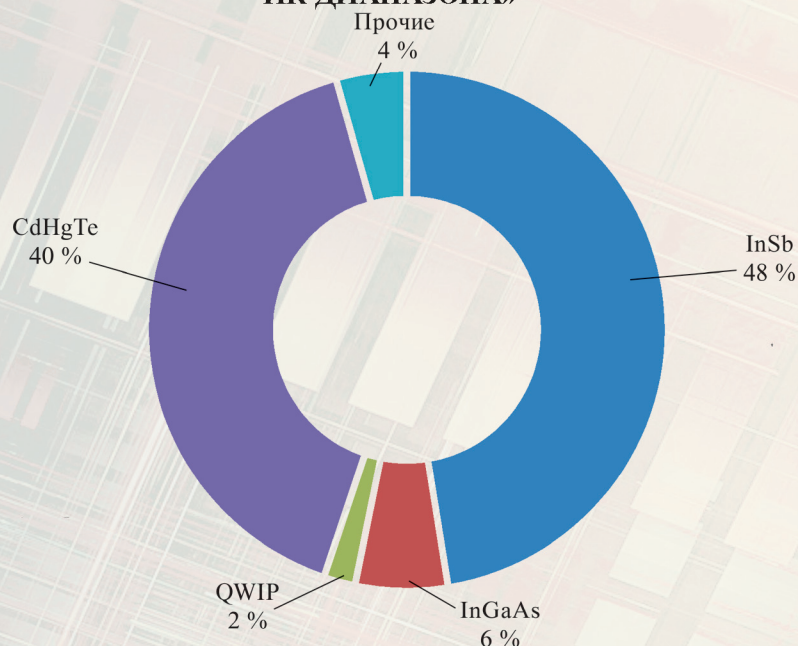


Рис. 7. Относительные доли продаж фотонных МФПУ на разных материалах, %
 (источник – *Maxtech International*)

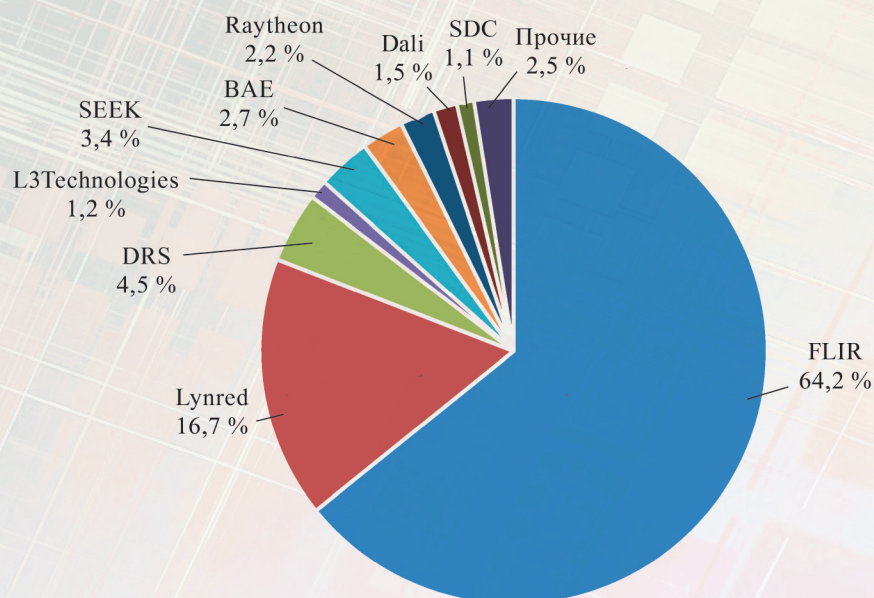


Рис. 14. Производители неохлаждаемых микроболометров (источник – *Yole Development*)

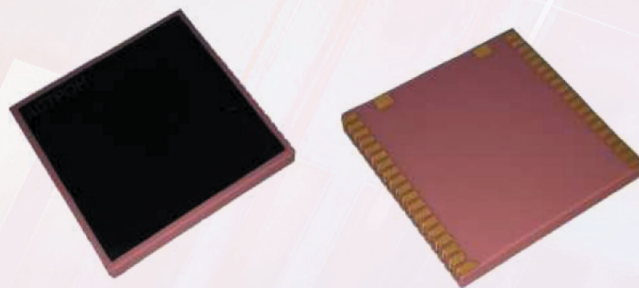


Рис. 15. Внешний вид МФПУ АСТРОН-38417-1 и АСТРОН-64017-1