



ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)
DOI: 10.24151/1561-5405

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 24

№ 6

ноябрь - декабрь

Vol. 24

No. 6

November - December

2019

3rd International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT '2020)



17 - 19 June 2020
Tenerife (Canary Islands), Spain

The conference is the 3rd of a series of annual International Conferences on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT) held in Barcelona (Spain), 2018 and in Amsterdam (The Netherlands), 2019 organized by IFSA. The MicDAT' 2020 conference is intended to create awareness of the huge potential of modern microelectronic technologies and to improve understanding on the recent challenges in a wide range of applications. A number of recognized experts from both: academy and industry in the field of microelectronic design will be invited to give their view in selected application areas. Featuring strong participation of industry and academia, the MicDAT' 2020 conference will provide an excellent opportunity to exchange ideas and present latest advancements in these areas.

The aim of MicDAT series of conference is to provide an annual world forum for the presentation and discussion of recent advances in microelectronics, and bring together leading international researchers, engineers and practitioners interested on any of the microelectronics related technologies.

Topics of interests:

- Analog, digital, mixed, and RF circuits and related design methodologies;
- Analog-to-Digital Converters (ADC);
- Voltage-to-Frequency Converts (VFC);
- Frequency-to-Digital Converters (FDC);
- Time-to-Digital Converters (TDC);
- Logic, architectural, and system level synthesis;
- Nonlinear circuits;
- Microprocessors, microcontrollers and DSPs;
- Testing, design for testability, built-in self-test;
- Area, power, and thermal analysis and design;
- Mixed-domain simulation and design;
- Embedded systems, low-power designs;
- VLSI systems circuit and design;
- Non-von Neumann computing and related technologies and circuits;
- Design and test of high complexity systems integration;
- SoC, MPSoC, NoC, SIP, and NIP design and test;
- Process technologies, CMOS, BJT, BiCMOS, GaAs;
- 3-D integration design and analysis;
- Emerging device technologies and circuits, such as FinFETs, SETs, spintronics, SFQ, MTJ, etc.;
- Design for Manufacturability/Technology;
- Microelectronics processing and materials;
- Semiconductor processing;
- Solid-state electronics;
- Quantum electronics;
- Thin solid films;
- Nanoprocessing, nanotechnology and nanofabrication;
- Flexible and stretchable electronics;
- MEMS and NEMS;
- CAD tools for microelectronics;
- Hardware/software co-design;
- Algorithms, methods and tools for modeling, simulation, synthesis and verification of ICs;
- Electronic materials science and technology;
- Organic electronic materials and devices;
- Microelectronics reliability and qualification; Assembly and Packaging.

Special Sessions: Participants are welcome to organize and manage special sessions during the conference. Each session will contain 4-6 papers in a related field as specified above.

Session organizers will get: Certificate of Appreciation; Free Registration for the Event; Special Publishing Theme within Conference Proceedings; Free article and book chapter post conference publications in appropriate open access journals and 'Advances in Microelectronics: Reviews', Book Series, Vol. 3.

Contribution Types: Keynote presentations; Invited talks; Regular sessions; Poster sessions; Special sessions; Industrial sessions; Panel Discussions and Round Tables; Exhibition.

Deadlines:

Submission (2-page extended abstracts):	15 March 2020
Notification of acceptance:	15 April 2020
Registration:	5 May 2020
Camera ready (4-6 pages full papers):	15 May 2020

Organising Committee:

Chairman: Prof., Dr. Sergey Y. Yurish (IFSA, Spain); **Advisory Chairman:** Prof., Dr. Edward Hrynkievycz (Silesian University of Technology, Poland), Prof. K.O. Petrosyants (Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Russia), Dr. Josef Huran (Slovak Academy of Science, Slovakia); **Industry Advisory Chairman:** Dr. Rozalia Beica (The Dow Chemical Company, USA); **Conference Manager:** Mrs. Tetyana Zakharchenko (IFSA Publishing, S.L., Spain).

<http://www.micdat-conference.com/>



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 24, № 6, 2019

ноябрь – декабрь

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

Учредитель и издатель: *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

Главный редактор: *Чаплыгин Юрий Александрович* – академик РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия)

Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия)

Быков Дмитрий Васильевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия)

Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия)

Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (Минск, Беларусь)

Горбачев Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия)

Грибов Борис Георгиевич – чл.-корр. РАН, д.хим.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)

Коноплев Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия)

Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)

Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)

Кубарев Юрий Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., ООО «Центр плазменных и вакуумных технологий» (Москва, Россия)

Лабунев Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Максимов Иван Александрович – PhD, проф., Университет города Лунд (Швеция)

Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синописис Армения» (Ереван, Армения)

Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

Неволин Владимир Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия)

Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия)

Петросянец Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия)

Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада)
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микро-электроники РАН (Москва, Россия)
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия)
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Институт электронной инженерии и нанотехнологий АНМ (Кишинев, Молдова)
Тауров Юрий Михайлович – д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия)
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия)
Тимошенко Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания)

Заведующая редакцией *С.Г. Зверева*
Редактор *А.В. Тихонова*
Научный редактор *С.Г. Зверева*
Корректор *И.В. Проскуракова*
Верстка *А.Ю. Рыжков, С.Ю. Рыжков*

Адрес редакции: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ
Тел.: 8-499-734-6205
E-mail: magazine@miee.ru
http://ivuz-e.ru

Адрес издателя: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ.

Адрес полиграфического предприятия: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ.

Подписано в печать 06.12.2019. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 11,6 усл.печ.л., 10,53 уч.-изд.л. Тираж 180 экз. Заказ № 20. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

Включен ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Включен в Российский индекс научного цитирования и в Рейтинг Science Index.

Включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Является членом Cross Ref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге Агентства «Роспечать» – 47570

СОДЕРЖАНИЕ

Технологические процессы и маршруты

<i>Тихонов Р.Д., Поломошнов С.А., Амеличев В.В., Костюк Д.В., Черемисинов А.А.</i> Анализ электрохимического процесса осаждения пленок пермаллоя	547
<i>Громов Д.Г., Дубков С.В., Ерицян Г.С., Савицкий А.И., Быков В.А., Бобров Ю.А.</i> Термическая стабилизация геометрических параметров массива наночастиц серебра, полученного вакуум-термическим испарением на ненагретую подложку	557
<i>Поголов А.И., Титов А.Ю., Тимошенков С.П.</i> Термомеханическая прочность соединений элементов в микроэлектронных модулях	565
<i>Каракеян В.И., Рябышенков А.С., Гундарцев М.А.</i> Эксергетический анализ системы воздухообмена в чистых помещениях	573

Элементы интегральной электроники

<i>Рязанцев Д.В., Кузнецов Е.В.</i> Локальный нагрев интегрального МОП-дозиметра для отжига накопленного заряда	581
<i>Кожевников В.С., Матюшкин И.В., Черняев Н.В., Жукова Т.Д.</i> Взаимосвязь физической и информационной энтропий в теории надежности для наноразмерных элементов	589

Схемотехника и проектирование

<i>Кулакова А.А., Лукьяненко Е.Б.</i> Блочный метод синтеза триггерных схем с использованием карт минтермов	601
<i>Кузьминов И.В., Лосев В.В., Новожилов И.С., Чаплыгин Ю.А.</i> Алгоритм компрессии и декомпрессии потока конфигурационных данных ПЛИС	610

Микро- и наносистемная техника

<i>Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенков Ан.С.</i> Исследование стойкости МЭМС-акселерометров емкостного типа к внешним механическим воздействиям	619
От Российской академии наук	627

Юбилей

Гаврилову Сергею Витальевичу – 60 лет	628
---	-----

Конференции

Об итогах 2-й Международной конференции «Микроэлектронные приборы и технологии» (MicDAT` 2019), 22–24 мая 2019 г., г. Амстердам, Голландия	629
3 rd International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT`2020), 17–19 June 2020, Tenerife (Canary Islands), Spain.....	2-я стр. обложки
Тематический указатель статей, опубликованных в 2019 году	631
К сведению авторов	635



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 24, No. 6, 2019
November – December

The scientific and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

Founder and Publisher: *National Research University of Electronic Technology*

Editor-in-Chief: *Yury A. Chaplygin* – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

Editorial Board:

Sergey A. Gavrilov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia)

Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia)

Dmitri V. Bykov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia)

Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian)

Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Minsk, Belarus)

Aleksandr A. Gorbatshevich – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia)

Boris G. Gribov – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Chem.), Prof., JSC «NIIME» (Moscow, Russia)

Boris G. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia)

Yury N. Korkishko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., SMS «Optolink» (Moscow, Russia)

Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC «NIIME» (Moscow, Russia)

Yuri V. Kubarev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., LLC «Center for Plasma and Vacuum Technologies» (Moscow, Russia)

Vladimir A. Labunov – Acad. NAS of Belarus, Foreign member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Ivan A. Maksimov - PhD, Prof., Lund University (Sweden)

Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJS Company «Sinopsis, Armenia» (Yerevan, Armenia)

Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

Vladimir N. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia)

Aleksey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia)

Konstantin O. Petrosyantz – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia)

Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia)

Andrey Y. Sazonov - PhD, Prof., University of Waterloo (Canada)

Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

© “Proceedings of Universities. Electronics”, 2019

© MIET, 2019

Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of the Electronic Engineering and Nanotechnologies ASM (Chisinau, Moldova)

Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia)

Yury M. Tairov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI) (St. Petersburg, Russia)

Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia)

Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain)

Head of editorial staff *Zvereva S.G.*

Chief editors *Tikhonova A.V., Proskuryakova I.V.*

Make-up *Ryzhkov S.Yu., Ryzhkov A.Yu.*

Editorial Board's address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET, editorial office of the Journal «Proceedings of Universities. Electronics»

Tel.: +7-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru

Publisher's address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET

Printery address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET

Signed to print 06.12.2019. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 11,6. Number of copies 180. Order no. 20. Free price.

The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

The journal is included into the List of reviewed scientific publications, in which the main scientific results of thesis for candidate of science and doctor degrees must be published.

The journal is included into the Russian index of scientific citing and into the Rating Science Index.

The journal is included into the Russian Science Citation Index on the Web of Science basis.

Is the member of Cross Ref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue of Agency Rospechat – 47570

CONTENTS

Technological processes and routes

<i>Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Amelichev V.V., Kostuk D.V., Cheremisinov A.A.</i> Analysis of Electrochemical Deposition Process of Permalloy Films	547
<i>Gromov D.G., Dubkov S.V., Eritsyan G.S., Savitsky A.I., Bykov V.A., Bobrov Yu.A.</i> Thermal Stabilization of Geometric Parameters of a Silver Nanoparticles Array Obtained by Vacuum-Thermal Evaporation on Unheated Substrate	557
<i>Pogalov A.I., Titov A.Yu., Timoshenkov S.P.</i> Thermomechanical Strength of Connections of Elements in Microelectronic Modules	565
<i>Karakeyan V.I., Ryabyshenkov A.S., Gundartsev M.A.</i> Exergetic Analysis of Air Exchange System of Clean Rooms	573

Integrated electronics elements

<i>Ryazantsev D.V., Kuznetsov E.V.</i> Local Heating of Integrated MOSFET Dosimeter for Annealing Charge	581
<i>Kozhevnikov V.S., Matyushkin I.V., Chernyaev N.V., Zhukova T.D.</i> Correlation of Physical and Information Entropies in Reliability Theory for Nanosize Elements	589

Circuit engineering and design

<i>Kulakova A.A., Lukyanenko E.B.</i> Block Method of Synthesis of Trigger Circuits Using Maps of Minterms	601
<i>Kuzminov I.V., Losev V.V., Novozhilov I.S., Chaplygin Yu.A.</i> Algorithm for Compression and Decompression of the FPGA Configuration Bit Stream	610

Micro- and nanosystem technology

<i>Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov An.S.</i> Study on Resistance of Samples of Capacitive Type Micromechanical Accelerometers to Mechanical Stress	619
From the Russian Academy of Sciences	627

Anniversaries

Gavrilov Sergey Vitalievich is 60 years old.....	628
--	-----

Conferences

Results of the 2 nd International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT`2019), 22–24 May 2019, Amsterdam, the Netherlands.....	629
3 rd International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT`2020), 17–19 June 2020, Tenerife (Canary Islands), Spain.....	2 cover page
Thematic index of articles published in 2019.....	631
Instructions for authors	635

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 621.3.049.77.002

DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-547-556

Анализ электрохимического процесса осаждения пленок пермаллоя

*Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, В.В. Амеличев,
Д.В. Костюк, А.А. Черемисинов*

НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

R. Tikhonov@teen.ru

Увеличение магнитной индукции в пермаллое позволяет в несколько раз повысить чувствительность магнитополупроводниковых микросистем к магнитному полю. При использовании пленок пермаллоя в качестве концентраторов магнитного поля для получения оптимальных магнитных свойств важно исключить аномальное соосаждение компонентов сплава и снизить разброс технологических параметров. В работе исследован хлоридный электролит с коррекцией pH соляной кислотой, который обеспечивает конгруэнтное электрохимическое осаждение пермаллоя при нагреве. Контроль точности приготовления электролита для электрохимического осаждения проведен с помощью спектрофотометрического исследования хлоридного электролита. Показано, что аномальность электроосаждения пермаллоя связана с переменной валентностью железа с двумя и тремя значениями заряда ионов при гидролизе солей железа. Установлено, что магнитные свойства пленок соответствуют объемным образцам пермаллоя и чувствительны к отклонению состава от молярного соотношения компонентов, равного 4,26.

Ключевые слова: пермаллой; концентраторы магнитного поля; хлоридный электролит; электрохимическое осаждение; спектрофотометрический контроль

Для цитирования: Анализ электрохимического процесса осаждения пленок пермаллоя / Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, В.В. Амеличев и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 547–556. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-547-556

Analysis of Electrochemical Deposition Process of Permalloy Films

R.D. Tikhonov, S.A. Polomoshnov, V.V. Amelichev,
D.V. Kostuk, A.A. Cheremisinov

SMC «Technological Center», Moscow, Russia

R. Tikhonov@teen.ru

Abstract: An amplification of magnetic induction in permalloy allows a several times increase of the sensitivity of magneto-semiconductor microsystems magnetic field. While using the permalloy films as the magnetic concentrators, it is important to exclude the anomalous codeposition of alloy components and to reduce the variability of technological parameters for optimum magnetic properties. In the work the chloride electrolyte with the pH correction by hydrochloric acid, which provides the congruent electrochemical permalloy deposition while heating has been proposed. The magnetic properties of the permalloy films, corresponding to bulk samples, have been determined. It has been shown that the magnetic properties of the permalloy films are sensitive to deviation of the composition from the ratio of 4.26 components. The control of accuracy of preparing an electrolyte for electrochemical deposition has been performed using the spectrophotometric investigation of chloride electrolyte. It has been established that the anomaly of the permalloy electrodeposition is associated with the main feature of iron ions—the existence of variable Valence iron with two or three values in the charge of ions during the hydrolysis of ions salts.

Keywords: permalloy; magnetic field concentrators; chloride electrolyte; electrochemical deposition; spectrophotometric monitoring

For citation: Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Amelichev V.V., Kostuk D.V., Cheremisinov A.A. Analysis of electrochemical deposition process of permalloy films. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 547–556. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-547–556.

Введение. Для получения пленок пермаллоя необходимого состава ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) и с требуемыми магнитными параметрами необходимо исследовать процессы электрохимического осаждения из сульфатно-хлоридного и хлоридного электролитов [1, 2]. При использовании выдержки сульфатно-хлоридного электролита в работе [1] получены следующие магнитные свойства пленок пермаллоя: магнитный поток намагничивания 81 нВб, коэрцитивная сила менее 1 Э. Экспериментально установлено, что со временем электролит изменяет свои свойства.

Концентраторы магнитного поля могут формироваться путем электрохимического осаждения пермаллоя в локальные области магнитополупроводниковых микросистем, ограниченные фоторезистивной маской [2, 3]. Под маской формируются металлические площадки из комбинации слоев NiCr и Ni. В работе [4] показано, что в состав современных магнитополупроводниковых микросистем входят пассивные элементы усиления магнитного поля – концентраторы, значительно повышающие индукцию магнитного поля в локальной области магниточувствительного элемента. Это позволяет в

несколько раз повысить чувствительность магнитополупроводниковых микросистем к магнитному полю.

Зависимость состава пленок пермаллоя от температуры электролита. Исследования параметров пленок пермаллоя проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр». Толщину пленок концентраторов измеряли с помощью анализатора микросистем MSA-500. Исследование коэрцитивной силы и намагниченности проводилось в составе пластин с использованием установки контроля магнитных параметров. Состав пленочных концентраторов магнитного поля исследовался с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора PhilipsXL 40.

Порция электролита перед заливкой в электрохимическую ячейку нагревалась до температуры 50, 60, 70 или 80 °С [2]. Основной параметр процесса – электрический ток через электроды – поддерживался постоянным. Нагрев электролита улучшает адгезию, уменьшает напряжения в слое и выравнивает толщину концентраторов. Как показано на рис.1, при достижении температуры 60 °С происходит стабилизация зависимости состава от температуры. Изменение скорости осаждения при температуре электролита 65 °С дает гораздо меньшую зависимость от плотности электрического тока. Это позволяет регулировать состав в достаточно узком диапазоне изменения электрического тока для получения пленок, близких по составу к пермаллою $N_{81}Fe_{19}$. При использовании нагретого электролита увеличивается намагниченность и уменьшается коэрцитивная сила [3] за счет изменения состава пленки (рис.2).

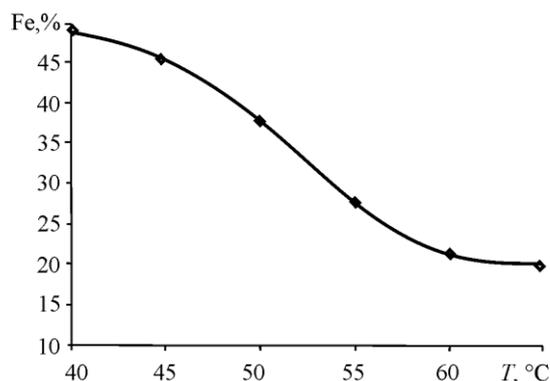


Рис.1. Зависимость содержания Fe в пленках NiFe от температуры электролита
Fig.1. Dependence of Fe content in NiFe films on the temperature of the electrolyte

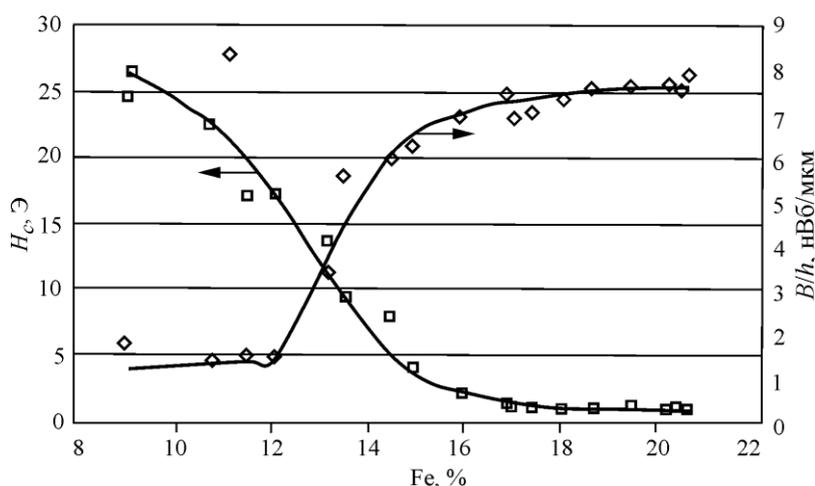


Рис.2. Зависимости удельной намагниченности пленок B/h и коэрцитивной силы H_c от содержания железа Fe в пленке пермаллоя
Fig.2. Dependence specific magnetization films B/h and coercive force H_c from the iron content of Fe in permalloy film

Оптимизация процесса осаждения пленок пермаллоя проведена в работах [5, 6] с точки зрения как улучшения оборудования и технологической оснастки, так и выбора состава электролита и режима осаждения. Электрохимическая установка с гальванической ванной объемом 3 л позволяет автоматически поддерживать температуру и перемешивать электролит в течение всего времени процесса осаждения. Электроды установки располагаются вертикально. Анод изготовлен из никелевой фольги, катод содержит никелевый кольцевой электрод, контактирующий с металлизированной площадкой кремниевой пластины.

Зависимость скорости осаждения пермаллоя от плотности электрического тока и концентрации электролита. Скорость осаждения и состав пленки пермаллоя зависят от плотности электрического тока, протекающего через области катода, ограниченные фоторезистивной маской. Для увеличения скорости роста пленок исследован процесс осаждения пермаллоя из хлоридного электролита с разной концентрацией железа и никеля в нем, но с одинаковым соотношением атомов в растворе, соответствующим сплаву $Ni_{81}Fe_{19}$.

Согласно первому закону Фарадея $m = cIt$, где m – масса металла, выделившегося на электродах, г; c – электрохимический эквивалент, г/(А·ч); I – сила электрического тока; t – время электролиза, ч. Электрический ток и время задаются при проведении каждого процесса, а электрохимический эквивалент зависит от природы металла и растворителя, температуры электролита, активности ионов металла. Фактическое количество выделяющегося на катоде металла определяется катодным выходом металла по электрическому току. В хлоридном электролите, соответствующем по содержанию железа и никеля сплаву $Ni_{81}Fe_{19}$, катодный выход повышается за счет добавок основных солей. В результате повышается концентрация атомов никеля и железа без изменения их соотношения вплоть до предела растворимости хлоридов в воде.

На рис.3 представлены зависимости скорости электрохимического осаждения пленок пермаллоя от плотности электрического тока в диапазоне 6–26 мА/см² при температуре хлоридного электролита 70 °С для трех электролитов с соотношением содержания атомов никеля и железа, равным 4,26, и молярным содержанием железа 29, 58, 87 ммоль/л. Из рисунка видно, что при увеличении концентрации никеля и железа в электролите при $C_{Fe}/C_{Ni} = 19/81$ и $C_{Fe} = 87$ ммоль/л скорость роста пленки повышается и не выходит в насыщение при приближении состава пленки к конгруэнтному составу электролита. Скорость роста пленки приближается к пределу, соответствующему закону Фарадея, т.е. катодный выход приближается к единице. При сохранении молярного соотношения железа и никеля 4,26 увеличение содержания этих компонентов в электролите позволяет повысить скорость роста осаждаемых пленок и получить толстые пленки без нарушения адгезии и магнитных свойств.

Полученная из хлоридного электролита пленка $Ni_{81}Fe_{19}$ толщиной 24 мкм имеет следующие магнитные параметры: индукция насыщения 1,35 Тл; относительная проницаемость $\mu = 3303$; коэрцитивная сила $H_c = 0,5$ Э.

В результате проведенных исследований отработан технологический процесс локального электрохимического осаждения из хлоридного электролита и получены пленки пермаллоя $Ni_{81}Fe_{19}$ с магнитными свойствами, аналогичными объемным образцам, равномерные по толщине, с малыми напряжениями и без высокотемпературного отжига. При сохранении соотношения в электролите $C_{Fe}/C_{Ni} = 19/81$, соответствующего составу сплава $Ni_{81}Fe_{19}$, происходит конгруэнтное осаждение и увеличение скорости роста пленок пермаллоя с 0,17 до 0,68 мкм/мин.

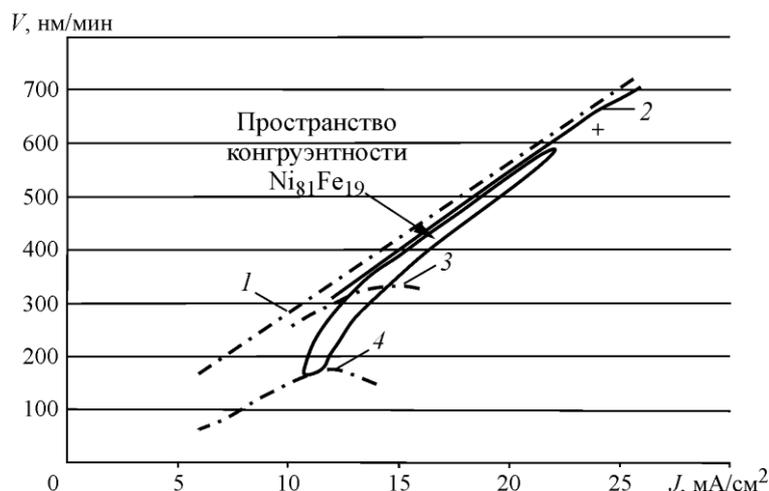
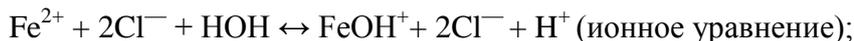
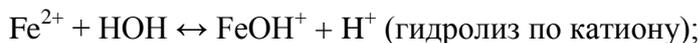
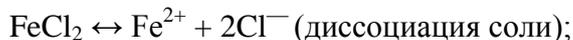


Рис.3. Зависимость скорости электрохимического осаждения пленок пермаллоя от плотности электрического тока в хлоридном электролите: 1 – закон Фарадея для сплава $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$; 2 – $C_{\text{Fe}} = 87$ ммоль/л; 3 – $C_{\text{Fe}} = 58$ ммоль/л; 4 – $C_{\text{Fe}} = 29$ ммоль/л; + – точка конгруэнтного осаждения сплава $\text{Ni}_{42}\text{Fe}_{58}$ ($C_{\text{Fe}} = 286$ ммоль/л)

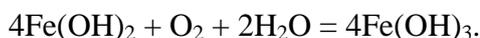
Fig.3. Dependence of the speed of permalloy films by electrochemical deposition at density of electric current in the chloride electrolyte: 1 – Faraday's law for the alloy $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$; 2 – $C_{\text{Fe}} = 87$ mmol/l; 3 – $C_{\text{Fe}} = 58$ mmol/l; 4 – $C_{\text{Fe}} = 29$ mmol/l; + – congruent deposition point of alloy $\text{Ni}_{42}\text{Fe}_{58}$ ($C_{\text{Fe}} = 286$ mmol/l)

Химические процессы в электролите. Эмпирический выбор параметров электрохимического осаждения пленок пермаллоя теоретически обоснован в работах [7, 8] при исследовании с помощью спектрального анализа электролита. В результате диссоциации соли в воде происходит взаимодействие ионов с водой и образование слабого электролита [8, 9]. При гидролизе ионы соли связываются с ионами воды водорода H^+ или гидроксила OH^- . По принципу Ле-Шателье уменьшение концентрации ионов должно приводить к дальнейшему распаду молекул воды на ионы. Если один из ионов участвует в образовании электролита, то другой ион накапливается в растворе и изменяет pH среды. Для усиления гидролиза соли электролит следует разбавить и нагреть. Согласно закону действующих масс при введении в раствор одного из продуктов гидролиза уменьшается гидролиз соли. При удалении продукта гидролиза усиливается гидролиз соли.

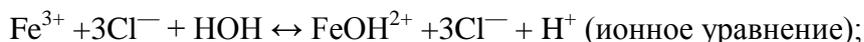
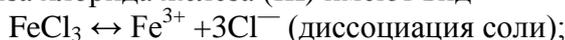
Особенностью железа является существование валентностей (II) и (III). Уравнения гидролиза хлорида железа (II) имеют следующий вид:



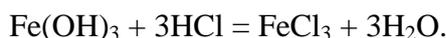
Гидроксид железа (II) в воде не растворяется, быстро темнеет вследствие окисления, имеет восстановительные свойства и при наличии O_2 и H_2O с течением времени на воздухе медленно окисляется растворенным кислородом до гидроксида железа (III):



Уравнения гидролиза хлорида железа (III) имеют вид



Гидроксид железа (III) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ имеет красновато-коричневый цвет и не растворяется в воде. Взаимодействие бурого осадка гидроксида железа (III) с раствором соляной кислоты приводит к растворению осадка и образованию желтого раствора хлорида железа (III):



Хлорид никеля гидролизуеться полностью и образует двухзарядные ионы никеля.

При фильтрации электролита происходит очистка от гидроксида трехвалентного железа. Аномальное соосаждение определяется наличием у железа двух валентностей и изменением валентности с 2 до 3 в электролите. Заряд трехвалентного иона железа Fe^{3+} создает его преимущественное осаждение по сравнению с никелем. Удаление гидроксидов железа из хлоридного электролита позволяет решить проблему аномального соосаждения. Подавление образования ионов трехвалентного железа Fe^{3+} соляной кислотой обеспечивает стабильность электролита и воспроизводимое осаждение пленок пермаллоя – конгруэнтное электрохимическое осаждение. Состав хлоридного электролита с соотношением концентраций $C_{\text{Ni}}/C_{\text{Fe}}=4,26$ обеспечивает получение пленок пермаллоя $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ при электрохимическом осаждении.

Электрохимические эквиваленты для металлов с двойной валентностью дают закономерное изменение соотношения скорости осаждения, соответствующего соотношению их валентности. Прохождение электрического тока при электрохимическом осаждении определяется зарядом ионов, поэтому трехвалентное железо, никель и кобальт осаждаются в 1,5 раза медленнее двухвалентных. При нагреве электролита происходит усиление ионизации, и потому количество однократно заряженных ионов $(\text{Fe}^{2+}\text{Cl})^+$ становится меньше количества ионов Fe^{2+} . При температуре 70 °С происходит полная ионизация хлорида двухвалентного железа в электролите [7]. В хлоридных электролитах для осаждения сплава NiFe с соотношением $C_{\text{Ni}}/C_{\text{Fe}} = 4,26$ при комнатной температуре и малой концентрации примесей подтверждается принцип влияния заряда ионов железа на состав пленок пермаллоя [7]. Концепция аномальности осаждения изменяется из подавления осаждения никеля гидроксидом железа на концепцию удвоенной скорости осаждения железа из однозарядных ионов $(\text{FeCl})^+$ по сравнению с двухзарядными Fe^{2+} .

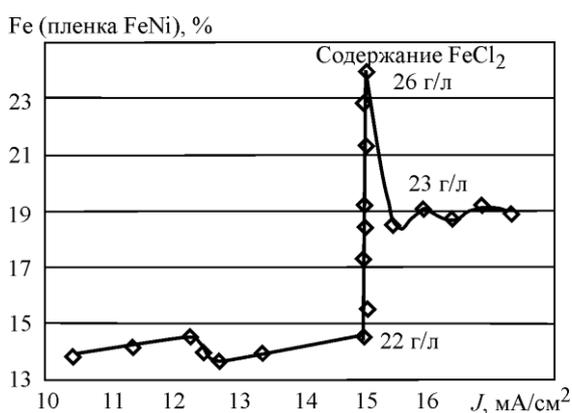


Рис.4. Зависимость состава пленки Fe от плотности электрического тока хлоридного электролита с разным содержанием FeCl_2

Fig.4. Dependence of the film composition Fe at density of electric current in the chloride electrolyte with different FeCl_2 content

Изменение состава пленок в зависимости от плотности электрического тока в диапазоне 10–17 mA/cm^2 представлено на рис.4. Электрохимическое осаждение

хлоридного электролита проводилось при концентрациях гидрата хлорида железа 22–26 г/л и при температуре электролита 70 °С. Изменение электрического тока процесса не приводит к изменению состава пленки. При выбранном значении электрического тока изменение содержания FeCl_2 в электролите приводит к изменению содержания железа в пленке. Содержание никеля в пленке NiFe выше, чем в электролите. Следовательно, никель осаждается лучше, чем железо, и аномального соосаждения не наблюдается. Повышение концентрации гидрата хлорида железа на 4,5 % позволяет компенсировать ускоренное осаждение никеля и получить состав пленки пермаллоя, соответствующий сплаву $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$.

Результаты и их обсуждение. Экспериментальные результаты получения пленок пермаллоя заданного состава находят научное обоснование: осаждение на катоде из хлоридного электролита однозарядных ионов происходит в виде двух- и трехвалентного железа. При выбранной плотности электрического тока вероятность разряда ионов зависит от их концентрации, а вклад в ток – от их заряда. Разряд ионов на катоде определяет электрический ток катода. Содержание в электролите разной концентрации ионов, отличающихся зарядом, задает состав пленки. Однозарядные ионы дают большую скорость осаждения, чем двухзарядные. Варьирование электрического тока меняет соотношение ионов в осадке. Это определяет зависимость состава осадка от электрического тока.

При одинаковых зарядах ионов никеля и железа происходит конгруэнтное осаждение пермаллоя и состав пленки не зависит от электрического тока. Условно механизм разряда ионов никеля и железа на катоде представлен на рис.5.

При проведении электроосаждения сплава NiFe исследователи [10] получали доминирующее осаждение железа по отношению к никелю при всех составах электролита. Применяемые электролиты [11–21] характеризуются широким диапазоном мольного отношения никеля и железа. Связь аномальности электроосаждения с переменной валентностью железа, одного и двух значений заряда ионов при гидролизе солей железа, ранее в источниках не рассматривалась.

Заключение. Выбор хлоридного электролита, разработка технологии его приго-

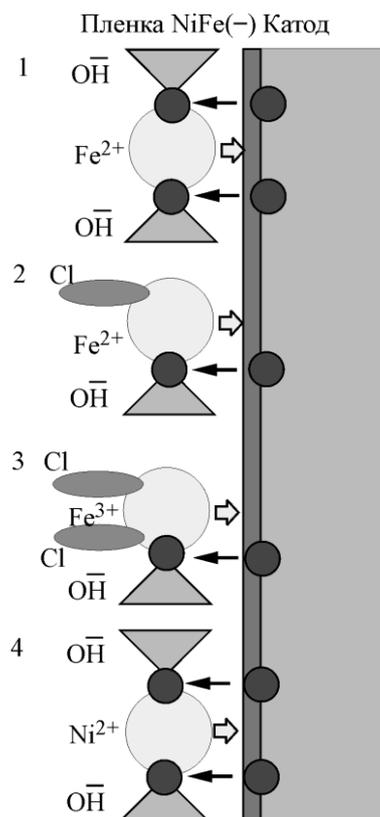


Рис.5. Механизм разряда ионов железа и никеля на катоде при электрохимическом осаждении $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ из хлоридного электролита: 1 – с нагревом или низкой концентрацией солей; 2 – без нагрева или с высокой концентрацией солей; 3 – с содержанием трехвалентного железа Fe^{3+} ; 4 – с содержанием двухзарядного иона никеля Ni^{2+} и полной электролитической диссоциацией при гидролизе хлористого никеля

Fig.5. Level iron and nickel ions on the cathode in electrochemical $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ of chloride electrolyte with heat, cleaning or with low salt concentrations of ferric chloride: 1 – with heating or with low salt concentration – two charging iron ion Fe^{2+} ; 2 – without heating or with a high concentration of salts – two charging iron ion Fe^{2+} ; 3 – containing one charging ions three valence iron Fe^{3+} ; 4 – two nickel charging ions Ni^{2+} with full electrolytic dissociation in hydrolysis of nickel chloride

товления и определение оптимальной температуры электролита позволили установить механизм аномального осаждения из-за неполной ионизации атомов железа. В результате экспериментов получены пленки с содержанием атомов никеля и железа в соотношении 4,26 при комнатной температуре без механических напряжений, с равномерной структурой и с высокими магнитными параметрами без высокой температуры отжига. Установленное конгруэнтное осаждение при учете заряда ионов в электролите позволяет получать воспроизводимое электрохимическое осаждение пермаллоя с преимущественным осаждением никеля.

Литература

1. Локальное электрохимическое осаждение пермаллоя на кремниевые пластины с магниторезистивными наноструктурами / **С.В. Шаманаев, Р.Д. Тихонов, А.А. Черемисинов и др.** // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 3. – С. 313–316.
2. Получение концентраторов магнитного поля с помощью электрохимического осаждения пермаллоя / **Р.Д. Тихонов, А.А. Черемисинов, С.С. Генералов и др.** // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 3. – С. 51–57.
3. Варьирование магнитных свойств пленок пермаллоя / **Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, Д.В. Горелов и др.** // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – № 9. – С. 563–568.
4. Развитие технологий магнитополупроводниковых микросистем / **В.В. Амеличев, И.Е. Абанин, В.В. Аравин и др.** // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – № 5. – С. 505–510.
5. Electrochemical deposition process for permalloy films on magneto-semiconductor microsystems / **V.V. Amelichev, S.A. Polomoshnov, N.N. Nikolaeva et al.** // Semiconductors. – 2017. – Vol. 51. – Iss. 13. – P. 1707–1708.
6. Электрохимическое осаждение пермаллоя со спектрофотометрическим контролем хлоридного электролита / **Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, В.В. Амеличев и др.** // 6-я Международная науч.-техн. конф. «Технологии микро- и нанoeлектроники в микро- и наносистемной технике» (Москва, 20–22 февр. 2019 г.). – М.: ИНМСТ РАН, 2019. – С. 16–19.
7. **Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, Д.В. Костюк** Спектрофотометрический контроль хлоридного электролита для электрохимического осаждения пермаллоя // Изв. вузов. Электроника. 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 129–136.
8. **Коровин Н.В.** Общая химия. – М.: Высшая школа, 1998. – 559 с.
9. **Коровин Н.В.** Катодные процессы при электроосаждении сплава никеля и железа // Журнал неорганической химии. – 1957. – № 2. – С. 2259–2263.
10. **Li Zh., Sun X., Zheng Y., Zhang H.** Microstructure and magnetic properties of micro NiFe alloy arrays for MEMS application // J. Micromech. Microeng. – 2013. – No. 23(8). – P. 1–6.
11. **Moniruzzaman M., Shorowordi K.M., Ashraful A., Taufique V.F.N.** Fe-Ni alloy electrodeposition from simple and complex type sulfate electrolytes containing Ni/Fe ratio of 1 and 12// J. of Mechanical Engineering. – 2014. – No. 44(1). – P. 50–56.
12. **Cao Y., Wei G.Y., Ge H.L., Meng X.F.** Study on preparation of NiFe films by galvanostatic electrodeposition // Surface Engineering. – 2014. – No. 30(2). – P. 97–101.
13. **Tabakovic I., Gong J., Riemer S., Kautzky M.** Influence of surface roughness and current efficiency on n gradients of thin NiFe films obtained by electrodeposition// J. Electrochem. Soc. – 2015. – No. 162(3). – P. 102–108.
14. Anomalous codeposition of *fcc* NiFe nanowires with 5–55% Fe and their morphology, crystal structure and magnetic properties / **O. Dragos, H. Chiriac, N. Lupu et al.** // J. Electrochem. Soc. – 2016. – No. 163(3). – P. 83–94.
15. Integration of electrodeposited Ni-Fe in MEMS with low-temperature deposition and etch processes / **G. Schiavone, J. Murray, R. Perry et al.** // Materials (Basel). – 2017. – No. 10(3). – P. 323–331.
16. **Wang F., Li L., Qiu Sh., Wang H.** Ferronickel preparation using Ni-Fe co-deposition process// Journal of Central South University. – 2016. – Vol. 23. – No. 12. – P. 3072–3077.
17. Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings. A review / **V. Torabinejad, M. Aliofkhaezrai, S. Assareh et al.** // J. of Alloys and Compounds. – 2017. – No. 691 (1). – P. 841–859.
18. **Bialostocka A., Klekotka U., Kalska-Szostko B.** Modulation of iron – nickel layers composition by an external magnetic field // Chemical Engineering Communications. – 2018. – Vol. 3. – No. 10. –P. 804–814.

19. Effects of electrolyte composition and additives on the formation of invar Fe-Ni alloys with low thermal expansion electrodeposited from sulfate bath / *Yu. Kashiwa, N. Nagano, T. Takasu* // The Iron and Steel Institute of Japan. J-STAGE home Tetsu-to-Hagane. – 2018. – No. 104 (10). – P. 585–593.
20. Control of growth mechanism of electrodeposited nanocrystalline nife films / *T.I. Zubar, V.M. Fedosyuk, A.V. Trukhanov et al.* // J. Electrochem. Soc. – 2019. – No. 166(6). – P. 173–180.
21. *Tikhonov R.* Congruent electrochemical deposition of NiFe alloy. – Lambert Academic Publishing, 2019. – 193 p.

Поступила в редакцию 08.04.2019 г.; после доработки 08.04.2019 г.; принята к публикации 24.09.2019 г.

Тихонов Роберт Дмитриевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), R.Tikhonov@tcen.ru

Поломошнов Сергей Александрович – кандидат технических наук, начальник лаборатории НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), PSA@tcen.ru

Амеличев Владимир Викторович – кандидат технических наук, начальник отдела НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), AVV@tcen.ru

Костюк Дмитрий Валентинович – начальник лаборатории НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), D.kostyuk@tcen.ru

Черемисинов Андрей Андреевич – начальник лаборатории НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), CheremisinovAA@gmail.com

References

1. Shamaev S.V., Tikhonov R.D., Cheremisinov A.A., Generalov S.S., Gorelov D.V., Polomoshnov S.A., Kazakov Ju.V., Amelichev V.V. Local electrochemical deposition of permalloy films on silicon wafers with magnetoresistance nanostructures. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no. 3, pp. 313–316. (In Russian).
2. Tikhonov R.D., Cheremisinov A.A., Generalov S.S., Gorelov D.V., Polomoshnov S.A., Kazakov Ju.V. Obtaining of Magnetic Field Concentrators with the Use of Electrochemical Deposition of Permalloy. *Nano- i microsistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2015, no. 3, pp. 51–57. (In Russian).
3. Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Gorelov D.V., Kazakov Ju.V., and Cheremisinov A.A. Var'irovanie magnitnih svoystv plenok permalloy. *Nano- i microsistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2016, no. 9, pp. 563–568. (In Russian).
4. Amelichev V.V., Abanin I.E., Aravin V.V., Kostyuk D.V., Kasatkin S.I., Reznev A.A., Saurov A.N. Development of Magneto-Semiconductor Microsystems Technology *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no 5, pp. 505–510. (In Russian).
5. Amelichev V.V., Polomoshnov S.A., Nikolaeva N.N., Tikhonov R.D., Kupriyanova M.A. Electrochemical Deposition Process for Permalloy Films on Magneto-Semiconductor Microsystems. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 13, pp. 1707–1708.
6. Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Amelichev V.V., Kostuk D.V., Cheremisinov A.A. Spectrofotograficheskiy kontrol klorid elektolit dly electrokhimicheskogo osajdeniy permalloy. *6th International Scientific and Technical Conference «Tehnologii micro- i nanoelektroniki»*, Moscow, 2019, pp. 16–19. (In Russian).
7. Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Kostuk D.V. Spectrofotograficheskiy kontrol klorid elektolit dly electrokhimicheskogo osajdeniy permalloy *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, no. 2, pp. 129–136. (In Russian).
8. Korovin N.V. *General chemistry*. Moscow, Vysshay shkola Publ., 1998. 559 p. (In Russian).
9. Korovin N.V. Cathodic processes in the electrodeposition of Nickel and iron alloy. *Journal neorganic chimii = Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1957, vol. 2, no. 9, pp. 2259–2263. (In Russian).

10. Li Zh., Sun X., Zheng Y., Zhang H. Microstructure and magnetic properties of micro NiFe alloy arrays for MEMS application. *J. Micromech. Microeng.*, 2013, no. 23(8), pp. 1–6.
11. Moniruzzaman M., Shorowordi K.M., Ashraf A., and Taufique M.F.N, Fe-Ni alloy electrodeposition from simple and complex type sulfate electrolytes containing Ni/Fe ratio of 1 and 12. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, no. 44(1), pp. 50–56.
12. Cao Y., Wei G.Y., Ge H.L. & Meng X.F. Study on preparation of NiFe films by galvanostatic electrodeposition. *Surface Engineering*, 2014, no. 30(2), pp. 97–101.
13. Tabakovic I., Gong J., Riemer S., and Kautzky M. Influence of surface roughness and current efficiency on n gradients of thin NiFe films obtained by electrodeposition. *J. Electrochem. Soc.*, 2015, no. 162(3), pp. 102–108.
14. Dragos O., Chiriac H., Lupu N., Grigoras M., Tabacovic I. Anomalous codeposition of *fcc* NiFe nanowires with 5–55% Fe and their morphology, crystal structure and magnetic properties. *J. Electrochem. Soc.*, 2016, no. 63(3), pp. 83–94.
15. Schiavone G., Murray J., Perry R., Mount A.R., Marc, Desmulliez P.Y., and Walton A.J. Integration of Electrodeposited Ni-Fe in MEMS with Low-Temperature Deposition and Etch Processes. *Materials (Basel)*, 2017, no. 10(3), pp. 323–331.
16. Wang F., Li L., Qiu Sh., and Wang H. Ferronickel preparation using Ni-Fe co-deposition process. *Journal of Central South University*, 2016, vol. 23, no. 12, pp. 3072–3077.
17. Torabinejad V., Aliofkhaei M., Assareh S., Allahyarzadeh M.H., Rouhaghdam S. Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings. A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, no. 691 (1), pp. 841–859.
18. Bialostocka A., Klekotka U., Kalska-Szostko B. Modulation of iron–nickel layers composition by an external magnetic field. *Chemical Engineering Communications*, 2018, vol. 3, no. 10, pp. 804–814.
19. Kashiwa Yu., Nagano N., Takasu T., Kobayashi Sh., Fukuda K., Nakano Hi. Effects of electrolyte composition and additives on the formation of invar Fe-Ni alloys with low thermal expansion electrodeposited from sulfate bath. *The Iron and Steel Institute of Japan, J-STAGE home Tetsu-to-Hagane*, 2018, no. 104 (10), pp. 585–593.
20. Zubar T.I., Fedosyuk V.M., Trukhanov A.V., Kovaleva N.N., Astapovich K.A., Vinnik D.A., Trukhanova E.L., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V., Solobai A.A., Tishkevich D.I., and Trukhanov S.V. Control of growth mechanism of electrodeposited nanocrystalline NiFe films *J. Electrochem. Soc.*, 2019, no. 166(6), pp. 173–180.
21. Tikhonov R. *Congruent electrochemical deposition of NiFe alloy*. Lambert Academic Publishing, 2019. 193 p.

Received 08.04.2019; Revised 08.04.2019; Accepted 24.09.2019.

Information about the authors:

Robert D. Tikhonov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), R.Tikhonov@tcen.ru

Sergey A. Polomoshnov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), PSA@tcen.ru

Vladimir V. Amelichev – Cand. Sci. (Eng.), Head of Division, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), AVV@tcen.ru

Dmitriy V. Kostuk – Head of Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), D.kostyuk@tcen.ru

Andrey A. Cheremisinov – Head of Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), CheremisinovAA@gmail.com

Термическая стабилизация геометрических параметров массива наночастиц серебра, полученного вакуум-термическим испарением на ненагретую подложку

Д.Г. Громов¹, С.В. Дубков¹, Г.С. Ерицян^{1,2},
А.И. Савицкий^{1,2}, В.А. Быков^{3,4}, Ю.А. Бобров³

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

²НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

³НТ-МДТ, г. Москва, Россия

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

gosha22_07@mail.ru

Наноразмерное состояние для многих веществ существенным образом отличается от массивного состояния. При формировании массивов наночастиц серебра путем конденсации на холодную подложку исходный конденсат нестабилен. Для формирования стабильных массивов с формой, близкой к сферической, требуется последующая слабая термообработка. В работе показано поведение массива наночастиц серебра при низкотемпературном отжиге. С помощью атомно-силовой микроскопии исследована эволюция массива наночастиц серебра, сформированного на поверхности SiO₂ методом вакуум-термического испарения на ненагретую подложку в процессе in-situ нагрева до температуры 200 °С. Получена качественная оценка влияния температуры на геометрию массивов наночастиц. Экспериментально показано, что резкое укрупнение наночастиц серебра и уменьшение их количества на поверхности имеют место в узком интервале температур 75–100 °С, а в интервале температур 100–200 °С заметных изменений в массиве наночастиц серебра не происходит. После проведения статистической обработки полученных данных определены средние размеры формируемых частиц и их плотность на единицу площади на каждом из этапов эксперимента. Получены соответствующие зависимости.

Ключевые слова: наночастицы; серебро; вакуум-термическое испарение; отжиг; сканирующая зондовая микроскопия

Для цитирования: Термическая стабилизация геометрических параметров массива наночастиц серебра, полученного вакуум-термическим испарением на ненагретую подложку / Д.Г. Громов, С.В. Дубков, Г.С. Ерицян и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 557–564. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-557-564

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-19-00595).

Thermal Stabilization of Geometric Parameters of a Silver Nanoparticles Array Obtained by Vacuum-Thermal Evaporation on Unheated Substrate

D.G. Gromov¹, S.V. Dubkov¹, G.S. Eritsyayn^{1,2},
A.I. Savitsky^{1,2}, V.A. Bykov^{3,4}, Yu.A. Bobrov³

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²NPK Technological Center, Moscow, Russia

³LLC «NT-MDT», Moscow, Russia

⁴Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

gosha22_07@mail.ru

Abstract: During formation of silver nanoparticles arrays by condensation to the cold substrate the initial condensate is non-stable. For the formation of non-stable arrays with the form, close to a spherical one, subsequent weak thermal treatment is required. The nanosize state for many substances significantly differs from the mass state. In the work the behavior of the silver nanoparticle array during low-temperature annealing has been shown. Using the atomic-force microscopy the evolution of the silver nanoparticles array, formed on the SiO₂ by the vacuum-thermal evaporation the unheated substrate during in-situ heating up to 200 °C, has been investigated. The qualitative estimate of the temperature influence on the geometry of the nanoparticles arrays has been obtained. It has been experimentally shown that a sharp enlargement of silver nanoparticles and decreasing of their quantity on the surface occurs in a small temperature of (75–100 °C). After statistical processing of the obtained data the average sizes of the formed particles and their density per unit area at each stage of the experiment have been determined and the corresponding dependences have been obtained.

Keywords: nanoparticles; silver; vacuum-thermal evaporation; annealing; scanning probe microscopy

For citation: Gromov D.G., Dubkov S.V., Eritsyayn G.S., Savitsky A.I., Bykov V.A., Bobrov Yu.A. Thermal stabilization of geometric parameters of a silver nanoparticles array obtained by vacuum-thermal evaporation on unheated substrate. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 557–564. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-557-564

Funding: the study has been supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00595).

Введение. Приемы управляемого формирования массивов наночастиц металлов на твердотельной поверхности находят все большее применение в связи с выявленными особенностями такого рода структур. Массивы наночастиц применяются в качестве вспомогательного материала для технологического процесса. Например, массивы металлических наночастиц нужны для каталитического роста массивов углеродных нанотрубок [1–3] и нитевидных кристаллов [4, 5] в процессе химического осаждения из паровой фазы. Также существует прямое использование особенностей подобных массивов, например их антибактериальных свойств [6]. В настоящее время активно разви-

вается плазмоника [7], с которой связаны такие направления, как гигантское комбинационное рассеяние света [8, 9] и фотокатализ [10].

Физическое осаждение из паровой фазы на поверхности твердой подложки – один из методов формирования наночастиц [11]. Традиционно метод вакуум-термического испарения и последующей конденсации используется для формирования тонких пленок. Выращивание тонкой пленки этим методом хорошо изучено и подробно описано. Концепции зарождения и роста тонких пленок разработаны в ряде публикаций [12–16] и в настоящее время являются классическими. Тем не менее существуют явления, требующие изучения. В частности, при формировании массивов серебряных наночастиц путем конденсации на холодную подложку исходный конденсат нестабилен, и требуется последующая слабая термообработка (до 230 °С), чтобы сформировать более стабильный массив наночастиц с формой, близкой к сферической [17,18].

Цель настоящей работы – исследование эволюции формы наночастиц серебра в массиве, сконденсированном на холодной поверхности, при последующем нагреве, а также процесса быстрых и масштабных изменений структур при низкой температуре после конденсации наночастиц в вакууме.

Эксперимент. В серии экспериментов в качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния с кристаллографической ориентацией (100), покрытые термически выращенным диоксидом кремния. Перед проведением осаждения подложки прошли стандартную химическую обработку в растворе Каро и ПАР для удаления органических и неорганических загрязнений с последующей отмывкой в воде и сушкой в атмосфере азота.

Формирование массивов наночастиц серебра осуществлялось посредством вакуум-термического испарения навески из серебра массой 4,9 мг при остаточном давлении в камере не хуже $1 \cdot 10^{-5}$ торр. Расстояние от испарителя до подложки составляло 20 см. Масса навески выбрана на основе данных калибровочных зависимостей, полученных в процессе исследований [19], для получения ожидаемого латерального размера наночастиц порядка 40 нм после проведения последующего отжига при температуре 230 °С.

АСМ-изображения рельефа пленки серебра на поверхности кремниевой подложки получали с помощью комплекса NT-MDT NTEGRA Prima, являющегося модульной лабораторией для реализации основных методик атомно-силовой и сканирующей туннельной микроскопии. Прибор находился в шумоизолирующем шкафу на антивибрационном столе. Образец устанавливался на столик с подогревом. В процессе измерений образцы нагревались, что позволяло получать данные об эволюции исходно осажденных массивов наночастиц. Сканирование проводилось в атмосфере воздуха в области размером $1,0 \times 1,0$ мкм. Температура столика изменялась от 28 до 200 °С. После каждого изменения температуры сканирование образца начиналось после релаксации дрейфа изображения, вызванного изменением температуры.

Результаты и их обсуждение. Проведенное исследование позволило проследить эволюцию массива наночастиц серебра от исходного состояния после нанесения до состояния, которое возникает при нагреве до 200 °С. Выяснено, что статистически меняются геометрия частиц серебра (высота и ширина) и количество частиц на единице площади поверхности.

На рис.1,*a* представлено АСМ-изображение исходного массива наночастиц серебра, который образовался в результате конденсации в вакууме на подложку при комнатной температуре. Измерение проводилось при температуре 28 °С. Сформированные пленки представляют собой массивы плотноупакованных частиц серебра. Статистичес-

кая обработка этого изображения показала, что средний латеральный размер частиц ($16,9 \pm 5,1$) нм, средняя высота ($2,4 \pm 0,6$) нм. Плотность частиц $2\,200\text{ мкм}^{-2}$, и они имеют однородное распределение как по диаметру, так и по высоте и не содержат частиц размером больше 30 нм. Среднестатистическая частица в массиве по форме похожа на диск или блин.

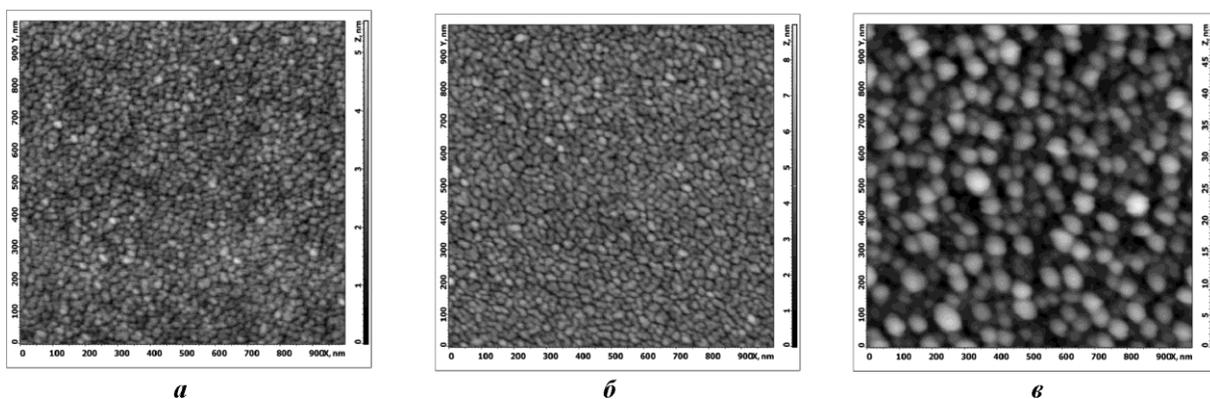


Рис.1. АСМ-изображения массивов наночастиц при температуре 28 °С (а); 50 °С (б) и 125 °С (в)
 Fig.1. AFM-image of nanoparticles array at temperature 28 °С (a); 50 °С (b) and 125 °С (c)

При нагреве изменения в массиве начинаются сразу. На рис.1,б приведено АСМ-изображение морфологии поверхности образца при температуре 50 °С. Видно, что изображение незначительно изменилось относительно изображения на рис.1,а. Однако его статистическая обработка показывает, что средний латеральный размер частиц увеличился до ($22,6 \pm 9,2$) нм, средняя высота увеличилась до ($4,2 \pm 0,9$) нм, а плотность частиц снизилась до $1\,300\text{ мкм}^{-2}$. Средний объема частиц, согласно расчету, вырос примерно в три раза. Таким образом, уже при температуре 50 °С имеет место процесс коалесценции частиц серебра.

На рис.1,в показаны результаты исследования поверхности при температуре 125 °С. Плотность частиц на поверхности резко снизилась и составила порядка 350 мкм^{-2} . При этом частицы стали заметно крупнее: латеральный размер частиц вырос до ($44,0 \pm 15,6$) нм, а средняя высота увеличилась до ($19,0 \pm 8,6$) нм. Их форма стала ближе к сферической, но приплюснутой.

Общий вид зависимостей изменения параметров массива наночастиц серебра от температуры нагрева в диапазоне 28–200 °С представлен на рис.2. Видно, что эволюция массива за счет коалесценции, приводящей к укрупнению частиц и уменьшению их количества на единице площади поверхности, начинается сразу после нагрева. Однако ключевые изменения массив претерпевает в интервале температур 75–100 °С. Именно в этом узком диапазоне температур латеральный размер почти удваивается, высота частиц увеличивается практически в четыре раза, а количество частиц на поверхности сокращается более чем в три раза. Отметим, что дальнейшее повышение температуры до 200 °С не приводит к заметным изменениям в параметрах массива наночастиц. Практически не меняются ни латеральный размер, ни высота частиц, ни их количество на единице площади поверхности. Это указывает на то, что система пришла в метастабильное состояние.

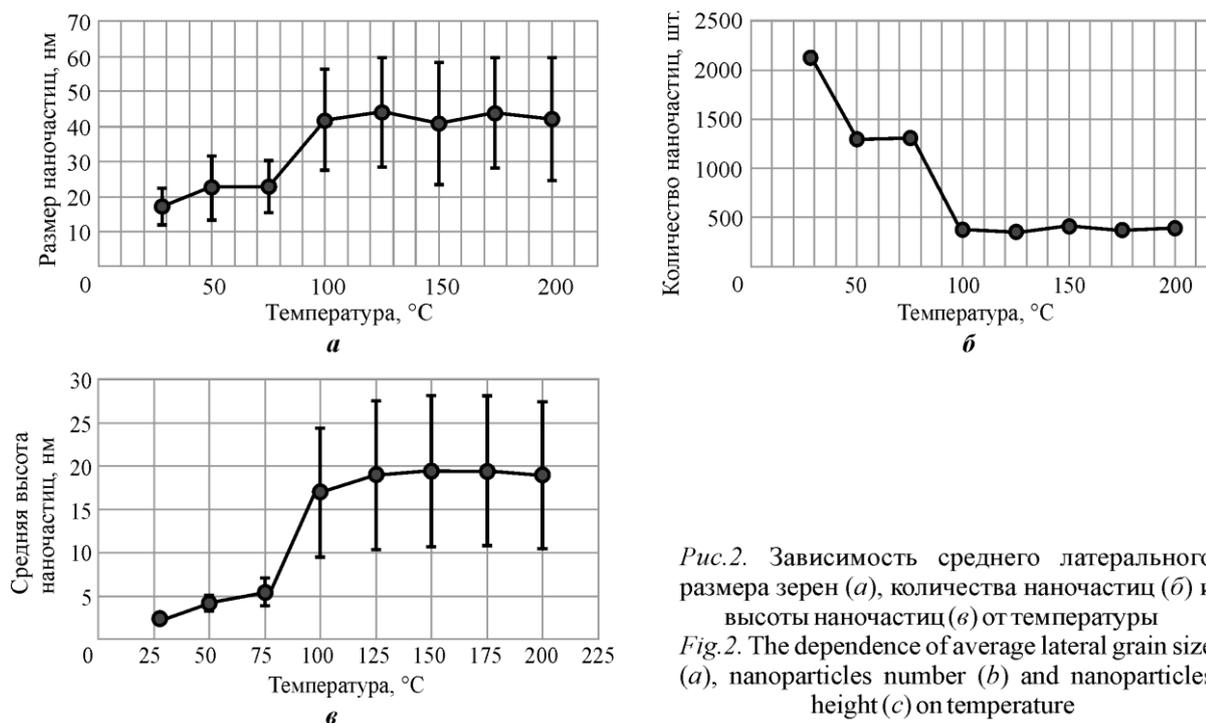


Рис.2. Зависимость среднего латерального размера зерен (а), количества наночастиц (б) и высоты наночастиц (в) от температуры
 Fig.2. The dependence of average lateral grain size (a), nanoparticles number (b) and nanoparticles height (c) on temperature

Однозначного объяснения наблюдаемого феномена нет. Можно отметить некоторые моменты и сделать предположения. Очевидно, что только с позиции явления коалесценции этот феномен объяснить невозможно. Коалесценция, как известно, активируется температурой: чем выше температура, тем активнее происходит этот процесс [20]. Соответственно, с этой позиции процессы укрупнения частиц серебра и уменьшения их количества на поверхности должны продолжаться при повышении температуры нагрева. Однако коалесценция заканчивается при температуре 100 °C. Можно сделать вывод, что после завершения процесса вакуум-термического осаждения на ненагретую подложку конденсат серебра не находится в равновесии с поверхностью подложки. Причина этого может заключаться в адсорбированной на поверхности воде, которая десорбируется с поверхности в интервале температур 75–100 °C. В этом случае массив наночастиц серебра приходит в квазиравновесное состояние с поверхностью.

Заключение. Исследования показали, что исходный массив наночастиц серебра, свежесажженный на ненагретую подложку методом вакуум-термического испарения, нестабилен. Быстрые изменения в массиве имеют место при невысокой температуре 75–100 °C. В результате этих изменений массив приходит в метастабильное состояние, которое сохраняется по меньшей мере до 200 °C. Данное обстоятельство необходимо учитывать при формировании массивов наночастиц серебра, в частности, для обеспечения заданного среднего размера частиц.

Литература

1. Growth of carbon nanotube arrays on various CtxMey alloy films by chemical vapour deposition method / P. Mierczynski, S.V. Dubkov, S.V. Bulyarskii et al. // Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – Vol. 34. – No. 3. – P. 472–480. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.01.030
2. Use of thin film of a $\text{Co}_{15}\text{Ti}_{40}\text{N}_{35}$ alloy for CVD catalytic growth of carbon nanotubes / D.G. Gromov, S.V. Dubkov, A.A. Pavlov et al. // Russian Microelectronics. – 2016. – Vol. 45. – No. 2. – P. 98–104.

3. Carbon nanotubes: properties, synthesis, and application / *T. Maniecki, O. Shtyka, P. Mierczynski et al.* // *Fibre Chemistry*. – 2018. – Vol. 50. – No. 4. – P. 297–300. DOI: 10.1007/s10692-019-09979-2; DOI:10.1007/s10527-015-9476-z
4. Effect of electrolyte temperature on the cathodic deposition of Ge nanowires on in and Sn particles in aqueous solutions / *I.M. Gavrilin, D.G. Gromov, A. Dronov et al.* // *Semiconductors*. – 2017. – Vol. 51. – P. 1067–1071. DOI: 10.1134/S1063782617080115
5. *Malakooti M.H., Patterson B.A., Hwang H.S.* Sodano, HZnO nanowire interfaces for high strength multifunctional composites with embedded energy harvesting // *Energy & Environmental Science*. – 2016. – Vol. 9. – No 2. – P. 634–643. DOI: 10.1039/c5ee03181h
6. BN/Ag hybrid nanomaterials with petal-like surfaces as catalysts and antibacterial agents / *K.L. Firestein, D.V. Leybo, A.E. Steinman et al.* // *Beilstein journal of nanotechnology*. – 2018. – Vol. 9. – No 1. – P. 250–261. DOI: 10.3762/bjnano.9.27
7. *Grishina Y., Kukushkin V., Solovyev V., Kukushkin I.* Slow plasmon-polaritons in a bilayer metallic structure revealed by the lower-energy resonances of surface-enhanced Raman scattering // *Optics Express*. – 2018 – Vol. 26. – Iss. 17. – P. 22519–22527. DOI:10.1364/OE.26.022519
8. Optimization of nanostructures based on Au, Ag, AuAg nanoparticles formed by thermal evaporation in vacuum for SERS applications / *D. Gromov, S. Dubkov, A. Savitskiy et al.* // *Applied Surface Science*. – 2019. – No. 489. – P. 701–707. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.05.286
9. Highly sensitive detection of influenza virus with SERS aptasensor / *V. Kukushkin, N. Ivanov, A. Novoseltseva et al.* // *PLoS ONE*. – 2019. – Vol. 14. – No. 4. – P. e0216247. – DOI: 10.1371/journal.pone.0216247
10. Plasmonic control of solar-driven CO₂ conversion at the metal/ZnO interfaces / *J. Zhao, B. Liu, L. Meng et al.* // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2019. – No. 256. – P. 117823. DOI: 10.1016/j.apcatb.2019.117823
11. *Kozhemyakin G.N., Kiiko S.A., Bryl O.E.* Formation of indium nanoparticles by thermal evaporation // *Crystallography Reports*. – 2019. – Vol. 64. – Iss. 3. – P. 457–460. DOI: 10.1134/S1063774519030167
12. *Goldby I.M., Kuipers L., von Issendorff B., Palmer R.E.* Diffusion and aggregation of size-selected silver clusters on a graphite surface // *Appl. Phys. Lett.* – 1996. – Vol. 69. – No. 19. – P. 2819–2821. DOI: 10.1063/1.116854
13. *Sigsbee R., Pound G.* Heterogeneous nucleation from the vapor. *Advances in Colloid and Interface Science*. – 1967. – Vol. 1. – Iss. 3. – P. 335. DOI: 10.1016/0001-8686(67)80007-1
14. *Walton D.* The orientation of vapour deposits // *Philosophical Magazine*. – 1962. – Vol. 7. – Iss. 82. – P. 1671–1679. DOI: 10.1080/14786436208213702
15. *Oxtoby D.W., Evans R.* Nonclassical nucleation theory for the gas-liquid transition // *The Journal of Chemical Physics*. – 1988. – No. 89. – P. 7521. DOI: 10.1063/1.455285
16. *Громов Д.Г., Гаврилов С.А.* Проявление гетерогенного механизма при плавлении малоразмерных систем // *Физика твердого тела*. – 2009. – Т. 51. – Вып. 10. – С. 2012–2021.
17. Study of silver cluster formation from thin films on inert surface / *A.N. Belov, S.V. Bulyarsky, D.G. Gromov et al.* // *Calphad*. – 2014. – Vol. 44. – P. 138–141. DOI: 10.1016/j.calphad.2013.07.017
18. Investigation of condensation of small portions of Ag at thermal evaporation in vacuum / *D. Gromov, E. Lebedev, A. Savitskiy et al.* // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – No 643(1). – P. 6. DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012014
19. *Gromov D.G., Pavlova L.M., Savitsky A.I., Trifonov A.Yu.* Nucleation and growth of Ag nanoparticles on amorphous carbon surface from vapor phase formed by vacuum evaporation // *Appl. Phys. A*. – 2015. – Vol. 118. – P. 1297–1303.
20. *Комник Ю.Ф.* Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты. – М.: Атомиздат, 1979. – 264 с.

Поступила в редакцию 13.08.2019 г.; после доработки 13.08.2019 г.; принята к публикации 24.09.2019 г.

Громов Дмитрий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gromadima@gmail.com

Дубков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского

ского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sv.dubkov@gmail.com

Ерицян Георгий Спартакович – младший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gosha22_07@mail.ru

Савицкий Андрей Иванович – кандидат технических наук, инженер НПЦ «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), andr.savitskiy@gmail.com

Быков Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) (Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9), научный руководитель ООО «НТ-МДТ» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 4922-й проезд, 4/3), vbykov@ntmdt-si.com

Бобров Юрий Александрович – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер ООО «НТ-МДТ» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 4922-й проезд, 4/3), yubobrov@ntmdt-si.com

References

1. Mierczynski P., Dubkov S.V., Bulyarskii S.V., Pavlov A.A., Skorik S.N., Trifonov A.Yu., Mierczynska A., Kitsyuk E.P., Gavrilov S.A., Maniecki T.P., Gromov D.G. Growth of carbon nanotube arrays on various CtxMey alloy films by chemical vapour deposition method. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, vol. 34, no 3, pp. 472–480. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.01.030
2. Gromov D.G., Dubkov S.V., Pavlov A.A., Skorik S.N., Trifonov A.Y., Shulyatev A.S., Rygalin B.N. Use of thin film of a $\text{Co}_{15}\text{Ti}_{40}\text{N}_{35}$ alloy for CVD catalytic growth of carbon nanotubes. *Russian Microelectronics*, 2016, vol. 45, no. 2, pp. 98–104.
3. Maniecki T., Shtyka O., Mierczynski P., Ciesielski R., Czyrkowska A., Leyko J., Mitukiewicz G., Dubkov S., Gromov, D. Carbon Nanotubes: Properties, Synthesis, and Application. *Fibre Chemistry*, 2018, vol. 50, no. 4, pp. 297–300. DOI: 10.1007/s10692-019-09979-2. DOI:10.1007/s10527-015-9476-z
4. Gavrilin I.M., Gromov D.G., Dronov A., Dubkov S.V., Volkov R.L., Trifonov A.Y., Borgardt N.I., Solnyshkin A.V. Effect of electrolyte temperature on the cathodic deposition of Ge nanowires on in and Sn particles in aqueous solutions. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, pp. 1067–1071. DOI: 10.1134/S1063782617080115
5. Malakooti M.H., Patterson B.A., Hwang H.S., Sodano H. ZnO nanowire interfaces for high strength multifunctional composites with embedded energy harvesting. *Energy & Environmental Science*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 634–643. DOI: 10.1039/c5ee03181h
6. Firestein K.L., Leybo D.V., Steinman A.E., Kovalskii A.M., Matveev A.T., Manakhov A.M., Sukhorukova I.V., Slukin P.V., Fursova N.K., Ignatov S.G., Golberg D.V., Shtansky D.V. BN/Ag hybrid nanomaterials with petal-like surfaces as catalysts and antibacterial agents. *Beilstein journal of nanotechnology*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 250–261. DOI: 10.3762/bjnano.9.27
7. Grishina Y., Kukushkin V., Solovyev V., Kukushkin I. Slow plasmon-polaritons in a bilayer metallic structure revealed by the lower-energy resonances of surface-enhanced Raman scattering. *Optics Express*, 2018, vol. 26, iss.17, pp. 22519–22527. DOI:10.1364/OE.26.022519
8. Gromov D., Dubkov S., Savitskiy A., Shaman Y., Polokhin A., Belogorokhov I., Trifonov A. Optimization of nanostructures based on Au, Ag, AuAg nanoparticles formed by thermal evaporation in vacuum for SERS applications. *Applied Surface Science*, 2019, no. 489, pp. 701–707. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.05.286
9. Kukushkin V., Ivanov N., Novoseltseva A., Gambaryan A., Yaminsky I., Kopylov A., Zavyalova E. Highly sensitive detection of influenza virus with SERS aptasensor. *PLoS ONE*, 2019, vol. 14, no. 4, p. e0216247. DOI: 10.1371/journal.pone.0216247
10. Zhao J., Liu B., Meng L., He S., Yuan R., Hou Y., Ding Z., Lin H., Zhang Z., Wang X., Long J. Plasmonic control of solar-driven CO_2 conversion at the metal/ZnO interfaces. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, no. 256, p. 117823. DOI: 10.1016/j.apcatb.2019.117823

11. Kozhemyakin G.N., Kiiiko S A., Bryl O.E. Formation of Indium Nanoparticles by Thermal Evaporation. *Crystallography Reports*, 2019, vol. 64, iss. 3, pp. 457–460. DOI: 10.1134/S1063774519030167
12. Goldby I. M., Kuipers, L., von Issendorff B., Palmer R. E. Diffusion and aggregation of size-selected silver clusters on a graphite surface. *Applied Physics Letters*, 1996, vol. 69, no. 19, pp. 2819–2821. DOI: 10.1063/1.116854
13. Sigsbee R., Pound G. Heterogeneous nucleation from the vapor. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1967, vol. 1, iss. 3, p. 335. DOI: 10.1016/0001-8686(67)80007-1
14. Walton D. The orientation of vapour deposits. *Philosophical Magazine*, 1962, vol. 7, iss. 82, pp. 1671–1679. DOI: 10.1080/14786436208213702
15. Oxtoby D.W., Evans R. Nonclassical nucleation theory for the gas-liquid transition. *The Journal of Chemical Physics*, 1988, no. 89, p. 7521. DOI: 10.1063/1.455285
16. Gromov D.G., Gavrilov S.A. Demonstration of a heterogeneous mechanism during the melting of small-sized systems. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, 2009, vol. 51, iss. 10, pp. 2012–2021. (in Russian).
17. Belov A.N., Bulyarsky S.V., Gromov D.G., Pavlova L.M., Pyatilova O.V. Study of silver cluster formation from thin films on inert surface. *Calphad*, 2014, vol. 44, pp. 138–141. DOI: 10.1016/j.calphad.2013.07.017
18. Gromov D., Lebedev E., Savitskiy A., Trifonov A., Rubcov V., Borgardt N., Grishina Y. Investigation of condensation of small portions of Ag at thermal evaporation in vacuum. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, no. 643(1), p. 6. DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012014
19. Gromov D.G., Pavlova L.M., Savitskiy A.I., Trifonov A.Yu. Nucleation and growth of Ag nanoparticles on amorphous carbon surface from vapor phase formed by vacuum evaporation. *Appl. Phys. A*, 2015, vol. 118, pp. 1297–1303.
20. Komnik Yu.F. *Physics of metal films. Dimensional and structural effects*. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 264 p. (in Russian).

Received 13.08.2019; Revised 13.08.2019; Accepted 24.09.2019.

Information about the authors:

Dmitriy G. Gromov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gromadima@gmail.com

Sergey V. Dubkov – Cand. Sci. (Eng.), Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sv.dubkov@gmail.com

Georgiy S. Eritsyayn – Junior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gosha22_07@mail.ru

Andrey I. Savitskiy – Cand. Sci. (Eng.), Engineer, SPC «Technological Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), andr.savitskiy@gmail.com

Viktor A. Bykov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Moscow Institute of Physics and Technology (Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutskiy ln., 9), Academic Advisor, LLC «NT-MDT» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Proezd 4922, 4/3), vbykov@ntmdt-si.com

Yuri A. Bobrov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Engineer, LLC «NT-MDT» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Proezd 4922, 4/3), yubobrov@ntmdt-si.com

Термомеханическая прочность соединений элементов в микроэлектронных модулях

А.И. Погалов, А.Ю. Титов, С.П. Тимошенко

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

dtm@miee.ru

Важными факторами надежности и прочности микроэлектронных модулей являются конструкция и технология паяного и клеевого соединений, упругие прочностные и пластические свойства материалов кристалла кремния, припоя и клеевого шва. Многослойные конструкции соединений элементов в микроэлектронных модулях должны обеспечивать снижение массогабаритных характеристик и эффективный теплоотвод. В работе проведено моделирование напряженно-деформированного состояния соединений элементов в микроэлектронных модулях. Показано, что в олововисмутовом припое напряжения в материалах сборки распределяются более равномерно и их значения ниже, чем при использовании припоев ПОС61 и ПОЦ: в кремнии на 5–30 %, в медном проводнике на 20–90 %. Выяснено, что в условиях эксплуатации и испытаний при повышенных температурах напряжение в припое ПОВи ниже, чем в припоях ПОС61 и ПОЦ, в 1,5 и 2,2 раза соответственно. Установлено, что эпоксидный клей холодного отверждения имеет хорошую адгезию к различным конструктивным материалам и долговечность, а технологический процесс характеризуется низкой трудоемкостью. Определена оптимальная толщина клеевого шва (50–200 мкм) и медного проводника (20 мкм). Даны рекомендации по проектированию микросоединений микроэлектронных модулей.

Ключевые слова: микроэлектронный модуль; материалы микросоединения; термомеханическая прочность; напряженно-деформированное состояние; моделирование; метод конечного элемента; конструктивно-технологические рекомендации

Для цитирования: Погалов А.И., Титов А.Ю., Тимошенко С.П. Термомеханическая прочность соединений элементов в микроэлектронных модулях // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 565–572. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-565-572

Thermomechanical Strength of Connections of Elements in Microelectronic Modules

A.I. Pogalov, A.Yu. Titov, S.P. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

dtm@miee.ru

Abstract: The most significant factors of reliability and durability of a microelectronic module are the design and technology of brazed and adhesive bonding, the elastic strength and plastic properties of the materials of silicon crystal, solder and glue joint. The construction to be created is designed to reduce the weight and size characteristics, to increase the reliability and to ensure the efficient heat dissipation. In the work, when simulating the stress-strain state of the microconnections of microelectronic modules, it has been determined that in tin-bismuth solder the stresses in the assembly materials are distributed more evenly and their value is significantly lower than when using SnPb and SnZn solder: in silicon by 5–30%, in copper conductor by 20–90%. It has been determined that under operating conditions and tests at the elevated temperatures, the voltage in the SnBi solder is 1.5 and 2.2 times lower than in the SnPb and SnZn solder, respectively. It has been shown that the epoxy glue cold curing has good adhesion to various structural materials, low labor intensity of the process and high durability. The rational thickness of glue seam 50–200 microns and a copper conductor of 20 microns has been determined. The recommendations on the design of microconnections of microelectronic modules have been given.

Keywords: microelectronic module; microconnection materials; thermomechanical strength; stress-strain state; modeling; finite element method; engineering and technological recommendations

For citation: Pogalov A.I., Titov A.Yu., Timoshenkov S.P. Thermomechanical strength of connections of elements in microelectronic modules. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 565–572. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-565-572

Введение. Для современной электронной аппаратуры существует потребность в снижении массогабаритных показателей, чем и обусловлен интерес к методам монтажа бескорпусных кристаллов непосредственно на плату для создания микроэлектронных модулей [1]. Также важной задачей при проектировании микроэлектронного модуля является создание высокоэффективных теплоотводящих оснований для широкого спектра создаваемых изделий на их основе [1, 2]. Для обеспечения надежности, повышения функциональной сложности и снижения массогабаритных характеристик микроэлектронных модулей необходимы инженерные расчеты прочности и жесткости материалов и соединений, обоснование выбора материалов, параметров конструкции и технологического процесса. Для решения этой задачи используются экспериментальные и аналитические способы моделирования с применением метода конечного элемента [1–3].

Конструкция микросоединения и используемые материалы. С целью разработки конструктивно-технологических рекомендаций для проектирования многослойных конструкций микроэлектронных модулей и обоснованного выбора материалов проведены моделирование и расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) изделия после сборки с помощью пайки и теплового нагрева до 80 °С. Для этого разработаны варианты моделей трехмерного модуля с конечно-элементной дискретизацией. Модели отличаются видами и марками используемых материалов, припоя и клея, толщиной клеевого шва и медного проводника, а также размерами паяного соединения.

Основание базового модуля БМ1 состоит из алюминиево-магниевого (АМг) сплава толщиной 10 мм, его размеры в плане 800 × 800 мкм. На основании БМ1 с помощью клеевого шва с использованием эпоксидного клея холодного отверждения ВК-9 на гибком ленточном носителе размещен бескорпусной кристалл кремния модификации 2. Толщина кремния и клеевого шва соответственно 460 и 200 мкм. Толщина контактной площадки (КП) на кремнии 5 мкм, ее размеры в плане 100 × 100 мкм. Медный проводник толщиной 20 мкм и шириной 100 мкм на полиимидном гибком носителе толщиной 30 мкм припаян к КП с подслоем меди припоем ПОС61. Припой имеет форму таблетки высотой 40 мкм и диаметром 80 мкм.

На рис.1 показана типовая расчетная схема соединения элементов в микроэлектронном модуле. Надежность и прочность конструкции зависят от многих конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Наиболее значимыми из них являются конструкция паяного шва и клеевого соединения, прочностные, упругие и пластические свойства материалов кремния, припоя и клеевого шва.

Для исследования влияния конструктивно-технологических факторов на термомеханическую прочность материалов использовались легкоплавкие припои марки ПОС61 (олово 61 %, свинец 39 %), ПОВи (олово 42 %, висмут 58 %) и ПОЦ (олово 91 %, цинк 9 %). Площадь паяного соединения варьировалась от 50 до 80 мкм². Также применялись эпоксидный жесткий клей марки ВК9 ($E = 5000$ МПа) и кремнийорганический эластичный клей «Эластосил» ($E = 100$ МПа). Высота клеевого шва составляла 50–500 мкм. Эквивалентные напряжения σ в конечных элементах модели определялись с помощью гипотезы энергии изменения формы [2]. Физико-механические характеристики используемых материалов модуля приведены в табл.1 [1–10].



Рис.1. Расчетная схема соединения микроэлектронного модуля

Fig.1. Design scheme of microconnection of microelectronic module

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов модуля

Table 1

Physical and mechanical properties of the module materials

Материал	Модуль упругости $E \cdot 10^5$, МПа	Коэффициент Пуассона μ	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	Допустимое напряжение σ , МПа	Относительное удлинение при разрыве δ , %
Сплав АМг	0,70	0,33	24	200	5
Кремний	1,30	0,30	4,2	200	–
Клей ВК9	0,05	0,30	72	35	1–5
Медь	1,00	0,35	16,5	250	15
Полиимид	0,03	0,30	20	175	70
Алюминий	0,70	0,33	22	150	18
Припой ПОС-61	0,40	0,34	23	60	46
Припой ПОВи	0,46	0,36	15	35	16
Припой ПОЦ	0,56	0,36	25	50	2

Моделирование напряженно-деформированного состояния материалов микросоединения модуля. С целью исследования влияния припоя на НДС материалов модуля разработаны следующие конечно-элементные модели: базовая модель БП1 с эвтектическим припоем ПОС61 для оценки остаточных напряжений после пайки при $T = 183\text{ }^{\circ}\text{C}$; модели П2 с эвтектическим припоем ПОВ для оценки остаточных напряжений после пайки при $T = 138\text{ }^{\circ}\text{C}$; П3 с эвтектическим припоем ПОЦ для оценки остаточных напряжений после пайки при $T = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$; базовые модели ТП1 с эвтектическим припоем ПОС61, ТП2 с эвтектическим припоем ПОВи, ТП3 с эвтектическим припоем ПОЦ при тепловом нагреве от 20 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с перепадом температур $\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты моделирования НДС в припоях микросоединений показаны в табл.2.

Таблица 2

Значения максимальных эквивалентных напряжений и коэффициентов концентрации напряжений в припоях микросоединения для разных моделей

Table 2

Maximum equivalent stresses σ and stress concentration factors K in solders of a microconnection for different models

Материал	σ , МПа						K		
	П1	П2	П3	ТП1	ТП2	ТП3	П1	П2	П3
Медь (вывод)	57	36	118	29	24,5	49,6	6,2	7	3,6
Полиимид (пленка)	12	9	14	6	6,1	5,9	7,8	8	6,1
Припой	142	70	246	70	47,4	103,3	2,3	2	2,2
Медь (КП)	253	202	260	127	136	109	2	1,9	2,5
Кремний	92	68	144	46,3	44	60,5	6,3	6,2	4,7
Клей	74	53	86	37	36	36,1	2,8	2,6	2,7
Сплав АМг (основание)	40	30	50	20	20,4	21	1,8	1,4	2

Для оценки влияния конструктивно-технологических параметров на НДС материалов модуля разработаны следующие модели: М1 и М2 с толщиной клеевого шва 50 и $500\text{ }\mu\text{m}$ соответственно; М3 и М4 с толщиной медного проводника 10 и $30\text{ }\mu\text{m}$ соответственно; М5 с использованием эластичного клея «Эластосил»; М6 с увеличенной площадью паяного соединения от 50 до $80\text{ }\mu\text{m}^2$.

Результаты исследования влияния конструктивно-технологических параметров соединения на прочность модуля показаны в табл.3.

Проведенные исследования НДС материалов показали, что распределение напряжений в многослойных композиционных конструкциях неравномерно в плоскости и по высоте слоев и имеет вид параболы с максимумом на краях и в углах материала. Типовая эпюра распределения напряжений на оси симметрии микросоединения показана на рис.2. По высоте основания эпюра близка к линейной, причем основную нагрузку несут слои, близкие к клеевому шву. Интенсивность нагрузки в КП высока (сборочные напряжения для всех припоев порядка $250\text{--}260\text{ МПа}$), и эпюра по высоте близка к постоянной. Напряжения по высоте слоя в остальных материалах распределяются по двухмодовой параболе с минимумом в среднем слое и максимумом на границах слоев. В кристалле кремния минимальное значение напряжения близко к нулю. На границах слоев наблюдается скачок напряжений. При значениях напряжений выше предела упругости в пластичных материалах модуля возникают пластические деформации, а в хрупких материалах образуются микротрещины, что может привести к нарушению целостности конструкции.

Таблица 3

Значения максимальных эквивалентных напряжений и коэффициенты концентрации напряжений в материалах модуля для моделей М1–М6

Table 3

Maximum equivalent stresses and concentration factors K for stresses in module materials for the models M1–M6

Материал	σ , МПа						K					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Медь (вывод)	57	57	58	58	57	47	6,5	6,3	5,1	5,5	6,3	6,9
Полиимид (пленка)	11	12	12	12	11,5	13	8,4	7,8	7,3	7,2	8,2	7,5
Припой	142	146,3	143	143	137	145	2,3	2,3	2,3	2,3	2,26	2,3
Медь (КП)	251	261	253	253	236	248	2,16	2,15	2,2	2,2	2,2	2,3
Кремний	90	107	93	93	108	94	4,3	6,8	6,2	6,2	2,8	6,15
Клей	76	85	74	74	1,6	74	2,5	4,6	2,6	2,64	3,1	2,65
Сплав АМг (основание)	35	60	40	40	0,8	40	1,4	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6

Для обеспечения прочности соединений при действии переменных циклических термомеханических воздействий необходимо, чтобы напряжения по всей площади соединений распределялись равномерно и коэффициент концентрации напряжений был как можно меньше [2, 5–7, 9, 10].

Концентрация краевых напряжений в паяном и клеевом (клей ВК-9) соединениях с использованием припоя ПОВи на 10–15 % ниже, чем с использованием припоев ПОС61 и ПОЦ (модели П1–П3). Сборочные напряжения в припое в модели П2 ниже, чем в базовой модели П1, в 2 раза, и ниже, чем в модели П3, в 3,5 раза. В условиях эксплуатации при повышенных температурах напряжения в припое ПОВи в модели ТП2 ниже в 1,5 и 2,2 раза, чем в моделях ТП1, ТП3 соответственно (см. табл. 2). При использовании олово-висмутového припоя напряжения в материалах и соединениях распределяются более равномерно. В кремнии напряжения ниже на 5–30 %, в медном проводнике – на 20–90 %, чем при использовании припоев ПОС61 и ПОЦ (см. табл.2).

Исследование влияния конструктивно-технологических параметров показало, что оптимальная толщина клеевого шва находится в диапазоне 50–200 мкм. При толщине клея 500 мкм напряжения в кремнии повысились на 20 %, их концентрация увеличилась на 10 % (модели М1, М2 и П1 (см. табл. 2, 3). Толщина медного проводника, равная 20 мкм, снижает напряжения в

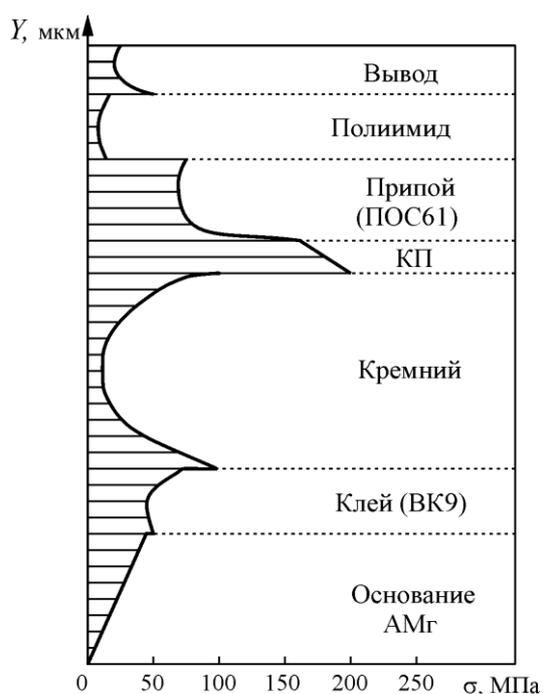


Рис.2. Эпюра распределения эквивалентных напряжений в материалах модуля на оси симметрии микросоединения

Fig.2. Plot of distribution of equivalent stresses in the materials of the module, located on the axis of symmetry of the microconnection

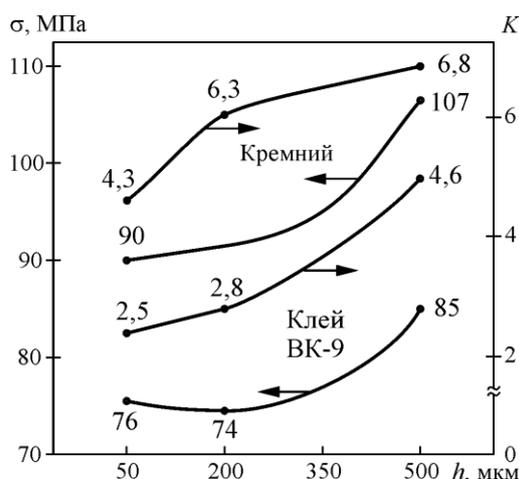


Рис.3. Зависимости напряжения σ и коэффициента концентрации K в кремнии и клее ВК-9 от толщины h клеевого шва
 Fig.3. The dependence of stresses (σ) and coefficienta concentration (K) in silicon and VK-9
 blue on the thickness (h) of the blue line

меди на 10 % (модели П1, М4). Увеличение площади пайки от 50 до 80 мкм² (модель М6) позволяет снизить напряжения в медном проводнике с 57 до 47 МПа (на 20 %).

Применение эластичного клея «Эластосил» при $E = 100$ МПа (модель М5) позволяет снизить напряжения в припое на 4 %, в КП на 7 %, в основании и клеевом шве более чем на порядок (в 40–50 раз). В кремнии концентрация напряжений в локальных угловых точках снизилась с $K = 6,3$ (при использовании ВК-9) до $K = 2,8$ (при использовании клея «Эластосил») при повышении номинального уровня σ от 92 до 108 МПа (модели П1 и М5). Зависимости напряжения σ и коэффициента концентрации K в кремнии и в клее ВК-9 от толщины h клеевого шва показаны на рис.3. Видно, что для клея ВК-9 оптимальная толщина шва составляет 50–200 мкм.

Заключение. Проведенное моделирование НДС, оценка прочности и жесткости материалов многослойной конструкции, выбор конструктивно-технологических характеристик изделия показали следующее. Напряжения зависят от упругих и пластических свойств соединяемых разнородных материалов модуля и определяются их термомеханической прочностью и жесткостью. Наилучшие результаты получены при использовании бессвинцового олововисмутного припоя: действующие напряжения в паяном соединении снижены в 1,5–2,2 раза, а концентрация напряжений – на 15 %.

Эпоксидный клей ВК-9 холодного отверждения имеет хорошую адгезию к различным материалам, характеризуется незначительной усадкой при отверждении, высокой химической стойкостью, выносливостью и долговечностью [11]. При этом трудоемкость технологического процесса сокращается. Толщину клеевого шва целесообразно выбирать в диапазоне 50–200 мкм, что позволяет уменьшить напряжения в клее и кремнии примерно на 15 %, а концентрацию напряжений – в 2,4 раза.

Литература

1. Симонов Б.М., Бритков О.М., Тимошенко А.С. Конструкции и технологии изготовления компонентов и узлов электронных средств: учеб. пособие / под ред. С.П. Тимошенко. – М.: МИЭТ, 2018. – 232 с.
2. Кузнецов О.А., Погалов А.И., Сергеев В.С. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.
3. Пицык В.С., Муравьев В.И., Саблин П.А., Евстигнеев А.И. Методика расчета площади физического контакта при изготовлении неразъемных соединений в условиях тугй посадки: сб. «Металлургия: технологии, инновации, качество» / под общ. ред. Е.В. Протопопова. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. – С. 194–200.
4. Справочник по пайке / под ред. И.Е.Петрунина. – М.: Машиностроение, 2003. – 480 с.
5. Неметаллические конструкционные материалы / Ю.В. Антипов, П.Г. Бабаевский, Ф.Я. Бородай и др. // Машиностроение: энциклопедия / под ред. А.А. Кулькова. – М.: Машиностроение, 2005. – Т. II-4 – 464 с.

6. **Копяев Б.В., Андреева Л.П.** Пластическая деформация паяного шва нахлесточного соединения // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 6. – С. 7–12.
7. **Андреева Л.П., Копяев Б.В.** Влияние толщины материала на прочность паяного нахлесточного соединения // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 12. – С. 15–17.
8. **Полянский А.М., Полянский В.М.** Прочность и излом паяного шва как показатели качества паяного соединения // Сварка и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 57–60.
9. **Ивашко А.И., Крымко М.М.** Влияние материалов припоя на параметры силовых полупроводниковых приборов // Электронная техника. Сер. 2: Полупроводниковые приборы. – 2016. – № 3 (242). – С. 14–20.
10. **Поголов А.И., Грушевский А.М., Блинов Г.А., Титов А.Ю.** Термомеханическая прочность материалов паяных соединений многокристалльных модулей памяти // Изв. вузов. Электроника. – 2009. – №6 (80). – С. 3–9.
11. **Поголов А.И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю.** Моделирование клеевых соединений для обеспечения надежности трехмерных микроэлектронных модулей // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – №1. – С. 23–31.

Поступила в редакцию 09.04.2019 г.; после доработки 09.04.2019 г.; принята к публикации 24.09.2019 г.

Поголов Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dtm@miee.ru

Титов Андрей Юрьевич – старший преподаватель Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), s4f@rambler.ru

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), spt@miee.ru

References

1. Simonov B.M., Britkov O.M., Timoshenkov A.S. *Designs and manufacturing technology components and components of electronic tools: Proc. Manual*. Ed. by S.P. Timoshenkov. Moscow, MIET Publ., 2018. 232 p. (in Russian).
2. Kuznetsov O.A., Pogalov A.I., Sergeev V.S. *The strength of the elements of microelectronic equipment*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1990. 144 p. (in Russian).
3. Pitsyk V.S., Muravev V.I., Sablin P.A., Evstigneev A.I. The method of calculating the area of physical contact in the manufacture of permanent connections in a tight fit. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo = Metallurgy: technology, innovation, quality*. Ed. by E.V. Protopopov. Novokuznetsk, Izd. tsentr SibGIU Publ., 2015. p. 194–200. (in Russian).
4. *Handbook of soldering*. Ed. by I.E. Petrunina. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 480 p. (in Russian).
5. Antipov Yu.V., Babaevsky P.G., Borodai F.Ya. et al. Non-metallic structural materials. *Mechanical engineering. Encyclopedia*. Ed. by A.A. Kul'kova. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, vol. II-4. 464 p. (in Russian).
6. Kopyaev B.V., Andreeva L.P. Plastic deformation of soldered seam lap joint. *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii = Procuring Production in Mechanical Engineering* 2016, no. 6, pp. 7–12. (in Russian).
7. Andreeva L.P., Kopyaev B.V. The effect of material thickness on the strength of brazed lap joint. *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii = Procuring Production in Mechanical Engineering*, 2016, no. 12, pp. 15–17. (in Russian).
8. Polyansky A.M., Polyansky V.M. The strength and fracture of the solder seam as indicators of the quality of the solder joint. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2014, no. 3, pp. 57–60. (in Russian).

9. Ivashko A.I., Krymko M.M. Influence of solder materials on the parameters of power semiconductor devices. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovyye pribory = Electronic equipment. Series 2: Semiconductor devices*, 2016, no. 3 (242), pp. 14–20. (in Russian).

10. Pogalov A.I., Grushevsky A.M., Blinov G.A., Titov A.Yu. Thermomechanical strength of materials of soldered joints of multichip memory modules. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2009, no. 6 (80), pp. 3–9. (in Russian).

11. Pogalov A.I., Blinov G.A., Chugunov E.Yu. Simulation of adhesive joints to ensure the reliability of three-dimensional microelectronic modules. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2018, vol 23, no. 1, pp. 23–31. (in Russian).

Received 09.04.2019; Revised 09.04.2019; Accepted 24.09.2019.

Information about the authors:

Anatoly I. Pogalov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Nano and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dtm@miee.ru

Andrei Yu. Titov – Senior Lecturer of the Institute of Nano and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), s4f@rambler.ru

Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Nano and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), spt@miee.ru

**Информация для читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

С тематическими указателями статей за 1996 - 2019 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

<http://ivuz-e.ru>

Эксергетический анализ системы воздухообмена в чистых помещениях

В.И. Каракеян, А.С. Рябышенков, М.А. Гундарцев

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва,
Россия*

gundartcev.m@yandex.ru

Система воздухообмена в чистых помещениях представляет собой сложный технологический комплекс. Одним из важнейших компонентов данного комплекса является система удаления воздуха чистых помещений. Система удаления воздуха в значительной степени определяет экологическую эффективность всего комплекса жизнеобеспечения чистых помещений. Для принятия решения по структуре и конфигурации системы в работе предложен эксергетический подход термодинамического анализа, а критерием воздействия на окружающую среду – значение удельной эксергии выброса. Приведена структурно-функциональная схема системы, на основании которой составлены эксергетические балансы, определены потери удельной эксергии и КПД в основных ее элементах при разных схемах организации выбросов. Установлено, что прямое удаление воздуха при термодинамическом преимуществе относительно системы удаления воздуха с дополнительной очисткой менее благоприятно для окружающей среды ввиду значительного уровня эксергии выбросов как фактора, определяющего возможность протекания физико-химических процессов в окружающей среде, приводящих к экологическому ущербу. На основе расчетов показана правомерность применения эксергии как объективного и универсального единого показателя, связывающего термодинамические и экологические качества системы. Практическое значение подхода – в установлении важных взаимосвязей между разными аспектами проектирования, эксплуатации систем жизнеобеспечения чистых помещений микроэлектроники и разработке мероприятий по снижению загрязнения окружающей среды за счет уменьшения эксергии выбросов.

Ключевые слова: система удаления воздуха; эксергия; термодинамика; выброс; эффективность; чистые помещения

Для цитирования: Каракеян В.И., Рябышенков А.С., Гундарцев М.А. Эксергетический анализ системы воздухообмена в чистых помещениях // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 573–580. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-573-580

Exergetic Analysis of Air Exchange System of Clean Rooms

V.I. Karakeyan, A.S. Ryabyshenkov, M.A. Gundartsev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

gundartcev.m@yandex.ru

Abstract: The air removal system significantly determines the ecological efficiency of the entire life-support providing clean rooms. In the work as a scientific basis for decision-making on the structure and configuration of the air removal system, the exergetic approach of thermographic analysis and as the criterion of environmental impact the value of the specific exergy of the emission have been proposed. A structural-functional scheme of the system has been proposed, on the basis of which the exergy balances have been compiled, the losses of specific exergy and the efficiencies in its main elements under various emission control schemes have been determined. It has been determined that the direct air removal with a thermodynamic advantage over the air removal system with additional purification is less favorable for the environment due to a significant level of exergy of emissions as a factor, determining the possibility of physical and chemical processes in the environment leading to the environment damage. The legitimacy of using the exergy as an objective and universal single indicator, linking the thermodynamic and the environmental quality of the system has been shown. The practical significance of this approach is to establish the important relationships between various aspects of the design and operation of the life-support systems for clean microelectronics and to develop measures to reduce the environmental pollution by reducing exergy of emissions.

Keywords: system of air removal; exergy; thermodynamics; emission; efficiency; clean rooms

For citation: Karakeyan V.I., Ryabyshenkov A.S., Gundartsev M.A. Exergetic analysis of air exchange system of clean rooms. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 573–580. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-573-580

Введение. Системы кондиционирования воздуха (СКВ) чистых помещений (ЧП) в классической компоновке содержат подсистемы для выполнения разных функций по трансформации воздуха. Одна из них – система удаления воздуха (СУВ), в значительной степени определяющая энергетические, экологические и экономические показатели СКВ. Оптимизация структуры СУВ по критерию оптимального соотношения между этими показателями и результатом выполнения ею целевой функции актуальна как для этапа проектирования системы, так и в период ее эксплуатации.

Существуют различные подходы системного анализа, позволяющие решать задачи оптимизации материально-энергетических потоков по некоторым частным критериям (функционально-экологическим, функционально-стоимостным и др.) [1–5]. Однако для комплексного исследования взаимосвязей между техническими и эколого-экономическими показателями любой технической системы перспективным является эксергетический метод термодинамического анализа [6–10]. Он учитывает необратимость реально протекающих процессов и рассматривает каждый элемент СУВ как самостоятельную термодинамическую систему, в которой происходят потери эксергии, обусловленные как внутренней (аэродинамическое сопротивление, тепло- и массообмен и др.), так и внешней (выбросы в окружающую среду (ОС)) необратимостью.

Включение в систему мониторинга энерго-экологической эффективности СУВ эксергетической информации позволяет выявлять и количественно оценивать проблемные элементы системы и возможности ее модернизации.

Эксергия потока воздуха в открытой термодинамической системе определяется максимальной полезной работой его взаимодействия с окружающей средой до установления равновесия с ней по давлению [8,11–13]. Материально-энергетические затраты на процесс удаления воздуха из ЧП оцениваются на основе эксергетического баланса, отражающего соотношение подведенной и отведенной эксергии. При этом рассматриваемая СУВ ограничивается некоторой замкнутой контрольной поверхностью от других объектов, выбираются термодинамические параметры окружающей среды и определяется эксергетический КПД системы и отдельных ее элементов.

Цель настоящей работы – сравнительная оценка экологичности системы удаления воздуха ЧП микроэлектроники на основе эксергетического подхода термодинамического анализа.

Система удаления воздуха ЧП. Учитывая, что целевая функция СУВ – это минимизация воздействия выброса на ОС, исходной информацией для составления эксергетического баланса СУВ является ее структурно-функциональная схема со всеми входящими и выходящими термодинамическими параметрами воздуха.

Процесс выброса отработанного воздуха определяется конструктивными особенностями технологического оборудования и примесями, появившимися при прохождении в ЧП. Воздух может подвергаться обезвреживанию и удалению разными способами – напрямую от оборудования или через боковые панели или фальшпол.

На рис.1 представлена схема ЧП высокого класса, где предусмотрены финишные фильтры (ФФ), фальшпол (ФП), подфальшпольное пространство (ПФП), предварительный фильтр (ПФ), основной фильтр (ОФ), вентилятор (В) и вытяжное устройство (ВУ). При прямоточной схеме СКВ весь отработанный воздух после ФП удаляется в ОС, а в случае рециркуляционной схемы (РЦ) обработки воздуха в ОС уходит лишь часть этого объема, определяемого коэффициентом рециркуляции $k_{РЦ}$.

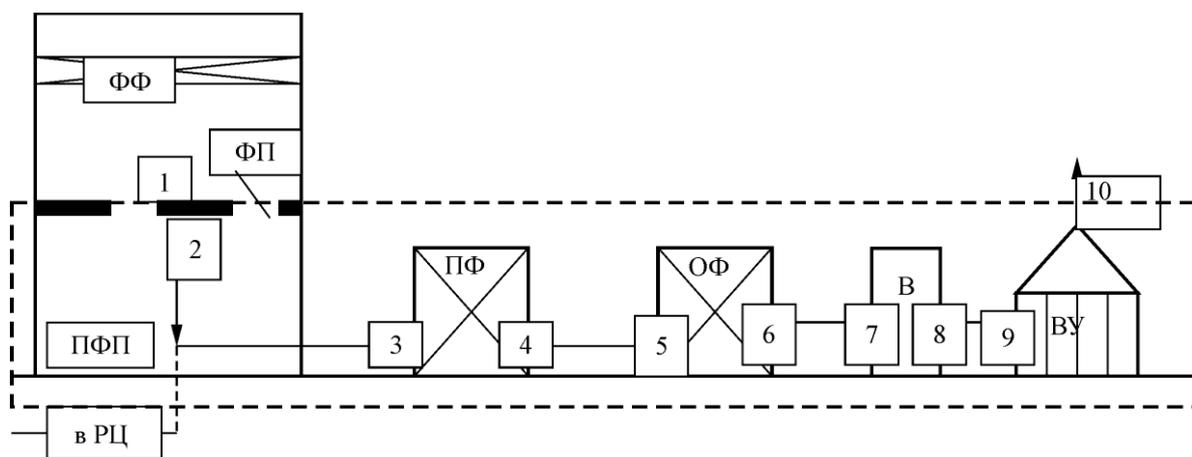


Рис.1. Структурно-функциональная схема СУВ
Fig.1. Structural and functional scheme of ARS

Контрольная поверхность, таким образом, должна охватывать обозначенные подсистемы (см. рис.1, штриховая линия), для которых устанавливаются основные связи и проводится эксергетический анализ. Анализируется путь воздуха от входа в ФП (точка 1), далее выход в ПФП (точка 2), вход и выход из ПФ (точки 3, 4), вход и выход из ОФ (точки 5, 6), вход и выход из В (точки 7, 8), вход и выход из ВУ (точки 9, 10).

Рабочим телом в системе является воздух, термодинамические характеристики которого как газовой смеси сухого воздуха и водяного пара определяются по закономерностям, характерным для идеальных газов в предположении, что концентрация сухого воздуха в смеси не изменяется, а переменной величиной является концентрация водяного пара.

Эксергетические показатели эффективности работы системы определяются посредством составления эксергетического баланса, представляющего собой сопоставление всех эксергетических потоков на входе $\sum e_{\text{вх}}$ и выходе $\sum e_{\text{вых}}$ из нее с учетом затрат эксергии на компенсацию внутренних и внешних потерь $\sum e_{\text{п}}$:

$$\sum e_{\text{вх}} = \sum e_{\text{вых}} + \sum e_{\text{п}}.$$

В данном случае входной следует считать удельную эксергию перед ФП $e_{\text{ФП}}$ в пределах контрольной поверхности, а выходной – на выходе из ВУ $e_{\text{СУВ}}$. Тогда эксергетический баланс может быть представлен в следующем виде:

- для СУВ с очисткой

$$e_{\text{ФП}_0} = e_{\text{СУВ}} + \Delta e_{\text{ФП}} + \Delta e_{\text{ПФ}} + \Delta e_{\text{ОФ}} + \Delta e_{\text{ВУ}};$$

- для СУВ без очистки

$$e_{\text{ФП}_{\text{б0}}} = e_{\text{СУВ}} + \Delta e_{\text{ФП}},$$

где $e_{\text{ФП}_0}$, $e_{\text{ФП}_{\text{б0}}}$ – удельная эксергия воздушного потока на входе в СУВ с очисткой и без очистки соответственно; $\Delta e_{\text{СУВ}}$, $\Delta e_{\text{ФП}}$, $\Delta e_{\text{ПФ}}$, $\Delta e_{\text{ОФ}}$, $\Delta e_{\text{ВУ}}$ – потери удельной эксергии в ФП, ПФ, ОФ и ВУ соответственно.

Эксергетический КПД $\eta_{\text{экс}}$ (%), определяющий термодинамическое совершенство системы, представляет собой отношение полезно использованной для обезвреживания потока эксергии $e_{\text{п}}$ ко всей затраченной эксергии:

- для СУВ с очисткой

$$\eta_{\text{экс.о}} = e_{\text{СУВ}} / e_{\text{ФП}_0} = 1 - (\Delta e_{\text{ФП}} + \Delta e_{\text{ПФ}} + \Delta e_{\text{ОФ}} + \Delta e_{\text{ВУ}}) / e_{\text{ФП}_0}; \quad (1)$$

- для СУВ без очистки

$$\eta_{\text{экс.б0}} = 1 - \Delta e_{\text{ФП}} / e_{\text{ФП}}. \quad (2)$$

В общем случае эксергия влажного воздуха определяется температурой, влагосодержанием и давлением наружного атмосферного и обрабатываемого воздуха. Поскольку общепринятым для систем кондиционирования считается равенство этих давлений при пренебрежимо малом значении кинетической энергии потока, при определении эксергии следует учитывать только две составляющие: термическую и концентрационную, обусловленные разностью температур и влагосодержания потока и окружающей среды.

Удельная эксергия e установившегося потока влажного воздуха с начальными термодинамическими параметрами (энтальпией i_1 , температурой T_1 , энтропией S_1) до достижения равновесия с окружающей средой с параметрами i_0 , T_0 , S_0 определяется по формулам [2]:

- для начального состояния:

$$e_1 = (i_1 - i_0) + T_0 (S_0 - S_1); \quad (3)$$

- для конечного состояния:

$$e_2 = (i_2 - i_0) + T_0 (S_0 - S_2). \quad (4)$$

Тогда потери удельной эксергии во всей системе определяются из выражения:

$$\Delta e = e_1 - e_2 = (i_1 - i_2) + T_0 (S_1 - S_2), \quad (5)$$

где Δe – максимальная (теоретически предполагаемая) полезная внешняя работа, которую можно было бы получить при адиабатическом обратимом переходе потока из начального состояния в конечное.

Изменение энтропии определяется по формуле Гюи–Стодолы, справедливой для расчета потери эксергии в необратимых процессах:

$$S_2 - S_1 = c_p \ln(T_2 / T_1), \quad (6)$$

где $c_p = 1,96$ кДж/(кг·°С) – удельная теплоемкость влажного воздуха.

Подставив (6) в (5), получим

$$\Delta e = e_1 - e_2 = (i_1 - i_2) + T_0 c_p \ln(T_2 / T_1). \quad (7)$$

Путем последовательного применения уравнений (1)–(7) к системе в целом или ее отдельным элементам можно установить распределение в них внутренних потерь.

Результаты исследований. В качестве примера рассмотрим работу СУВ в наиболее напряженный теплый период года. Воспользовавшись $i-d$ -диаграммой влажного воздуха определим его термодинамические параметры в элементах системы при следующих параметрах наружного воздуха: $t_0 = 30$ °С, $\varphi_0 = 80$ %, $i_0 = 88$ кДж/кг; на выходе из ЧП и входе в ФП $t = 26$ °С и $\varphi = 50$ %, $i = 52$ кДж/кг; на выходе из ФП $t = 27$ °С и $\varphi = 50$ %, $i = 60$ кДж/кг; на выходе из ПФ $t = 28$ °С и $\varphi = 60$ %, $i = 66$ кДж/кг; на выходе из ОФ $t = 29$ °С и $\varphi = 60$ %, $i = 68$ кДж/кг; на выходе из В $t = 32$ °С и $\varphi = 50$ %, $i = 72$ кДж/кг; на выходе из ВУ (СУВ) $t = 33$ °С и $\varphi = 50$ %, $i = 74$ кДж/кг.

Тогда по формулам (4)–(7) значения удельной эксергии составят: на выходе из ЧП и входе в ФП $e_{ФП} = 44$ кДж/кг; на выходе из ФП $e_{ВФП} = 39$ кДж/кг; на выходе из ПФ $e_{ПФ} = 26$ кДж/кг; на выходе из ОФ $e_{ОФ} = 20$ кДж/кг; на выходе из В $e_{В} = 14$ кДж/кг; на выходе из ВУ (СУВ) $e_{СУВ} = 10$ кДж/кг.

Распределение удельной эксергии в системе наглядно показано на диаграмме Грассмана, построенной для пяти участков: ФП, ПФ, ОФ, В и ВУ (рис.2).

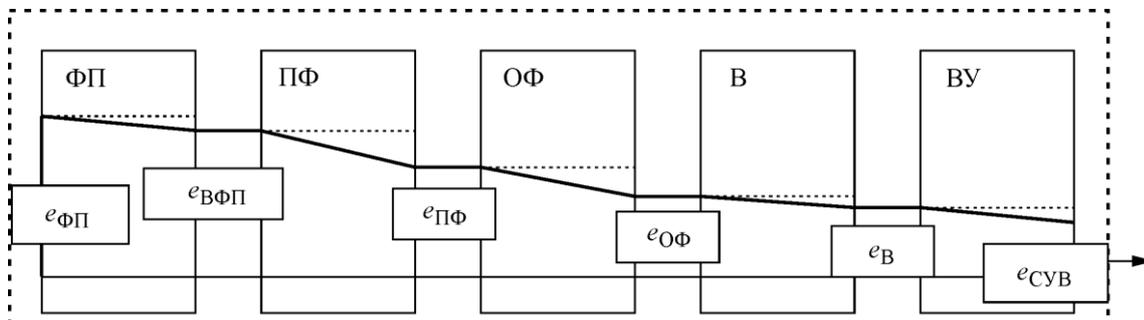


Рис.2. Диаграмма потоков эксергии в СУВ с обезвреживанием воздуха
 Fig.2. Diagram of exergy flows in ARS with air neutralization

При анализе СУВ учитываются определенные изменения температуры и относительной влажности воздуха в коммуникациях основных элементов системы и вентиляторе. При наличии сквозного потока эксергии рабочего тела эксергетический КПД определяется разностным методом, выражающим соотношение между затратами эксергии на полезный эффект и всеми ее затратами. Тогда на основании расчетов по формулам (5) и (6) и рис. 2 для эксергетического КПД, отражающего степень реализации поставленной цели, получим: эксергетический КПД СУВ с очисткой $\eta_{\text{экс.о}} = 0,23$; эксергетический КПД СУВ без очистки $\eta_{\text{экс.бо}} = 0,89$.

При рециркуляции после ФП происходит разделение потока удаляемого воздуха в соответствии с коэффициентом рециркуляции $k_{\text{РЦ}}$. Как правило, $k_{\text{РЦ}} = 0,8 - 0,9$, что означает возвращение 80–90% объема отработанного воздуха с термодинамическими параметрами после ФП для повторного использования и удаление 10–20% этого объема в ОС. В предположении о разделении эксергии после ФП в такой же пропорции удельная эксергия потока, направляемого в ОС, например, при $k_{\text{РЦ}} = 0,8$ составит 6,84 кДж/кг, а потока на рециркуляцию – 27,2 кДж/кг.

Нетрудно видеть, что затраты удельной эксергии на обезвреживание воздуха на пути от ФП до ОС для СУВ с очисткой составят 39 кДж/кг, а для СУВ без очистки – 5 кДж/кг. Полученные величины характеризуют нагрузку от выбросов на ОС, поэтому с экологической точки зрения предпочтителен вариант с очисткой. Рассматривая удельную эксергию в качестве основной характеристики вторичного энергетического ресурса воздушного потока, можно прийти к противоположному мнению. Решение о целесообразности включения в СУВ тех или иных элементов должно приниматься на основе тщательного эколого-экономического анализа и, безусловно, с учетом специфики основной технологии.

Сопоставление значений эксергетического КПД и затрат эксергии указывает на более низкую термодинамическую эффективность варианта с очисткой, что обусловлено значительными потерями эксергии при обработке отработанного воздуха в дополнительных аппаратах системы. Однако отработанный воздух без очистки имеет более высокую транзитную эксергию, потенциально опасную для ОС. Если учесть снижение энергозатрат на полное кондиционирование, а также резервы повышения термодинамической эффективности рециркуляции воздуха за счет совершенствования этого процесса, то преимущества прямой схемы обработки воздуха становятся не столь однозначными.

Очевидно, что решение о целесообразности включения в СУВ тех или иных элементов должно приниматься на основе экономического анализа с учетом снижения затрат на основное кондиционирование при рекуперации воздуха, наличия резервов повышения термодинамической эффективности рециркуляции воздуха, характера отработанного воздуха и возможного экологического риска.

Заключение. Рассмотренный случай ограничен только динамикой эксергии и не затрагивает эколого-экономическую сторону проблемы. Но поскольку на сегодняшний день эксергия признается объективным и универсальным единым показателем, связывающим термодинамику, экономику и экологию [1–3, 8], углубление такого подхода позволит аналитически установить важные взаимосвязи между разными аспектами проектирования и эксплуатации ЧП микроэлектроники.

Литература

1. **Рябышенков А.С.** Системный анализ функционирования чистых помещений для микроэлектроники // Изв. вузов. Электроника. – 2016. – Т. 21 – № 3. – С. 218–223.
2. **Рябышенков А.С., Каракеян В.И., Ларионов Н.М.** Методология системного анализа применительно к исследованию аэродинамического режима чистых помещений // Наука и образование: инновации, интеграция и развитие: материалы II Международной научно-практической конференции. – Уфа: РИО ИЦИПТ, 2015. – С. 130–135.
3. **Каракеян В.И.** Теоретическое обоснование и разработка систем контроля микропримесей в воздухе // Экологические приборы и системы. – 2012. – № 2. – С. 15–17.
4. **Баймачев Е.Э.** Определение минимальных затрат эксергии на отопление и естественную вентиляцию жилых зданий // Изв. вузов. Строительство. – 2014. – № 7. – С. 67–73.
5. **Амерханов Р.А., Драганов Б.Х.** Эксергоэкономический метод оптимизации энергопреобразующих систем // Промышленная энергетика. – 2012. – № 3. – С. 30–35.
6. **Хорошев Н.И., Елтышев Д.К., Кычкин Д.К.** Комплексная оценка эффективности технического обеспечения энергомониторинга // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5 (4). – С. 716–720.
7. **Абрамчук Ф.И., Харченко А.И.** Использование эксергетического метода при термодинамическом анализе газовых процессов в тепловых машинах // Вестник ХНАДУ. – 2011. – № 53. – С. 32–44.
8. **Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К.** Эксергетический метод и его приложения / под ред. В.М. Бродянского // М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
9. **Рымкевич А.А.** Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. – СПб.: Изд-во «АВОК Северо-Запад», 2003. – 272 с.
10. **Шишов В.В.** Энтропийно-статистический анализ холодильных циклов для систем кондиционирования // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 5 (5). – С. 143 – 156.
11. **Тишин О.А., Харитонов В.Н., Гатапова Н.Ц., Колиух А.Н.** Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии: учеб. пособие. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 92 с.
12. **Шевцов А.А., Котарев В.И.** Эксергетический анализ энергоэффективной биотехнологии порошкообразных ферментных препаратов // Известия ТСХА. – 2015. – № 1. – С. 79–90.
13. **Горбачев М.В., Иванова А.П.** Оценка эффективности действительных циклов авиационной системы кондиционирования воздуха // Решетниковские чтения. – 2013. – Т. 1. – № 17. – С. 123–125.

Поступила в редакцию 09.04.2019 г.; после доработки 09.04.2019 г.; принята к публикации 24.09.2019 г.

Каракеян Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), zelikar@mail.ru

Рябышенков Андрей Сергеевич – доктор технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ryabyshenkov@mail.ru

Гундарцев Михаил Александрович – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gundartcev.m@yandex.ru

References

1. Ryabyshenkov A.S. System analysis of clean rooms functioning for microelectronics. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 218–223. (in Russian).
2. Ryabyshenkov A.S., Karakeyan V.I., Larionov N.M. Systems analysis methodology applied to the study of the aerodynamic regime of clean rooms. *Materials of II International Scientific-Practical Conference «Science and education: innovation, integration and development»*. Ufa, RIO ICIPT Publ., 2015, pp. 130–135. (in Russian).

3. Karakeyan V.I. et al. Teoreticheskoe obosnovanie i razrabotka sistem kontrolya mikroprimesej v vozduhe. *Ekologicheskie pribory i sistemy = Environmental Instruments and Systems*, 2012, no. 2, pp. 15–17. (in Russian).
4. Bajmachev E.E. Determination of minimum exergy costs for heating and natural ventilation of residential buildings. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2014, no. 7, pp. 67–73. (in Russian).
5. Amerhanov R.A., Draganov B.H. Exergy method of optimization of energy conversion systems. *Promyshlennaya energetika = Industrial Power Engineering*, 2012, no. 3, pp. 30–35. (in Russian).
6. Horoshev N.I., Eltyshev D.K., Kychkin D.K. Kompleksnaya ocenka ehffektivnosti tekhnicheskogo obespecheniya ehnergomonitoringa. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2014, no. 5 (4), pp. 716–720. (in Russian).
7. Abramchuk F.I., Harchenko A.I. et al. Ispol'zovanie ehksergeticheskogo metoda pri termodinamicheskom analize gazovyh processov v teplovyh mashinah. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 2011, no. 53, pp. 32–44. (in Russian).
8. Brodyanskij V.M., Fratsher V., Mihalek K. *Exergy method and its applications*. Ed by V.M. Brodyanskogo. Moscow, Ehnergoatomizdat Publ., 1988. 288 p. (in Russian).
9. Rymkevich A.A. System analysis of optimization of General ventilation and air conditioning. Saint-Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2003. 272 p. (in Russian).
10. Shishov V.V. Entropy-statistical analysis of refrigeration cycles for air conditioning systems. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 5 (5), pp. 143–156. (in Russian).
11. Tishin O.A., Haritonov V.N., Gatapova N.C., Koliuh A.N. *Theoretical foundations of energy and resource saving in chemical technology: textbook*. Tambov, FGBOU VPO «TGTU» Publ., 2012. 92 p. (in Russian).
12. Shevcov A.A., Kotarev V.I. et al. Eksergeticheskij analiz ehnergoehffektivnoj biotekhnologii poroshkoobraznyh fermentnyh preparatov. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2015, no 1, pp. 79–90. (in Russian).
13. Gorbachev M.V., Ivanova A.P. Ocenka ehffektivnosti dejstvitel'nyh ciklov aviacionnoj sistemy kondicionirovaniya vozduha. *Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M.F. Reshetneva*, 2013, vol. 1, no. 17, pp. 123–125. (in Russian).

Received 09.04.2019; Revised 09.04.2019; Accepted 24.09.2019.

Information about the authors:

Valery I. Karakeyan – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), zelikar@mail.ru

Andrei S. Ryabyshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ryabyshenkov@mail.ru

Mikhail A. Gundartcev – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gundartcev.m@yandex.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 621.38.049.77:001.891.573

DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-581-588

Локальный нагрев интегрального МОП-дозиметра для отжига накопленного заряда

Д.В. Рязанцев, Е.В. Кузнецов

НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

d.ryazancev@tcen.ru

МОП-дозиметры используются для отслеживания дозы облучения в различных приложениях, таких как космическая, ядерная и медицинская промышленность, также применяются в исследовательских лабораториях и портативной электронике. МОП-дозиметры имеют ряд преимуществ: постоянно накапливают заряд под воздействием ионизирующего излучения; выполняют прямое неразрушающее считывание информации о дозе; имеют сверхмалые размеры и маленькую потребляемую мощность; работают в широком диапазоне доз ионизирующего излучения; могут быть интегрированы с другими сенсорами и электроникой. Однако такие дозиметры невозможно повторно использовать из-за насыщения подзатворного диэлектрика накопленным зарядом. Для повторного использования МОП-дозиметров необходимо отжечь накопленный заряд. В работе показаны результаты исследования структуры интегрального элемента, встроенного в МОП-дозиметр, для локального нагрева подзатворного диэлектрика с целью отжига накопленного заряда, созданного под воздействием ионизирующего излучения. Структура такого нагревательного элемента разработана с учетом расчетов в среде численного моделирования COMSOL Multiphysics. Нагревательным элементом и одновременно затвором МОП-транзистора, через который пропускается электрический ток, является n^+ -поликремний. Изготовлены тестовые структуры по 1,2-мкм КМОП аналого-цифровому технологическому маршруту. Измерен коэффициент температурного сопротивления образцов интегральных резисторов. Установлено, что при пропускании электрического тока через интегральный элемент происходят разогрев и изменение его сопротивления в соответствии с температурным коэффициентом сопротивления. По измеренным зависимостям изменения сопротивления вычислена средняя температура интегрального резистора для каждого значения пропускаемого электрического тока. Проведено сравнение результатов моделирования зависимости температуры от толщины подзатворного окисла и пропускаемого через нагревательный элемент тока с экспериментальными полученными данными. Предложенный способ локального разогрева подзатворного диэлектрика позволяет достичь температур порядка 700 °С без разрушающих последствий для структур и, таким образом, эффективно отжигать накопленный заряд в МОП-дозиметрах.

© Д.В. Рязанцев, Е.В. Кузнецов, 2019

Ключевые слова: дозовые эффекты; датчик радиации; дозовый датчик; ионизирующее излучение; отжиг заряда; математическое моделирование

Для цитирования: Рязанцев Д.В., Кузнецов Е.В. Локальный нагрев интегрального МОП-дозиметра для отжига накопленного заряда // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 581–588. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-581-588

Local Heating of Integrated MOSFET Dosimeter for Annealing Charge

D.V. Ryazantsev, E.V. Kuznetsov

SMC «Technological Center», Moscow, Russia

d.ryazancev@tcen.ru

Abstract: The MOS dosimeters are used to keep track of the radiation dose for space, nuclear and medical industries, research laboratories and various applications like portable electronics and etc. MOSFET dosimeters constantly accumulate charge under the ionizing radiation effect, execute direct non-destructive readability of the dose information, have super-small sizes and low power consumption, can operate in a large range of ionizing radiation doses and can be integrated with other sensors and electronics. However, it is impossible to re-use the MOSFET dosimeters for their original purpose. In order to return the threshold voltage to its pre-irradiation value for dosimeter re-use, it is necessary to perform the accumulated charge annealing process. In the work the results of studying the structure of the integral elements, built-in into MOSFET dosimeter for local heating of the gate dielectric for the purpose of annealing the accumulated charge, created under the ionizing radiation, have been shown. The structure of such heating element has been using COMSOL Multiphysics. The heating element is the n^+ -polysilicon gate of the MOSFET, through which electric current is passing. The test structures have been manufactured for 1.2 μ m mixed analog-digital BICMOS technology. The temperature coefficient of resistance for the fabricated samples of the integrated resistors has been measured. It has been determined, that while the electric current passing through the integral element its heating and its resistance change in accordance with temperature coefficient of resistance. A comparison of the simulation results of the temperature dependence on the gate oxide thickness and the current runs through the heating element with the experimentally obtained data has been performed. The proposed method of local heating of the gate dielectric permits to achieve the temperatures of 700 °C order without destructive consequences for the structures and thus, to effectively anneal the accumulated charge in MOSFET dosimeter.

Keywords: dosimetry; numerical simulation; current annealing

For citation: Ryazantsev D.V., Kuznetsov E.V. Local heating of integrated MOSFET dosimeter for annealing charge. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 581–588. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-581-588

Введение. Дозовые датчики на основе МОП-структур чувствительны ко всем видам ионизирующего излучения (ИИ), кроме нейтронного. В микросхемах под воздействием ИИ накапливается электрический заряд в диэлектриках, увеличиваются токи утечки p - n -переходов, изменяются электрические характеристики транзисторных структур. Необходимо отслеживать поглощенную дозу ИИ, для расчета которой в дозиметрах на основе МОП-структур измеряется сдвиг порогового напряжения, вызванный изменением заряда в подзатворном оксиде и его границы с кремнием [1]. Максимальная измеренная относительная доза зависит от насыщения зарядом подзатворного диэлектрика, при котором перестает меняться пороговое напряжение, и определяется параметрами подзатворного оксида. Существующие коммерческие активные и пассивные детекторы построены на зарубежной компонентной базе и могут измерять накопленную дозу до 20 крад [2–7], что ограничивает их возможное применение.

Основным недостатком дозиметров на основе МОП-структур является необходимость их калибровки для разных радиационных полей, относительно низкая разрешающая способность (примерно от 1 рад) и невозможность их повторного использования. Многократное применение МОП-дозиметров и воспроизводимость их характеристик исследованы в работах [8–13].

Накопленный заряд МОП-дозиметров может отжигаться уже при комнатной температуре. Максимальное изменение порогового напряжения при отжиге при комнатной температуре за 1 000 ч составляет около 12 % у p -МОП-дозиметра [9]. В процессе отжига при температуре 150 °С пороговое напряжение в среднем приближается к начальному значению за ~100 ч [9,11], при температуре 250 °С за ~10 ч. Таким образом, чем выше температура отжига, тем быстрее происходит возвращение порогового напряжения к начальному значению [8, 9, 12]. Чувствительность МОП-дозиметра (изменение порогового напряжения от дозы облучения) зависит от толщины подзатворного диэлектрика [14], и чем больше толщина подзатворного диэлектрика, тем сильнее изменяется пороговое напряжение под воздействием ИИ. Температурный отжиг одинаково эффективен как для толстых (более 0,1–1 мкм), так и для тонких (менее 0,1 мкм) диэлектриков [9]. Для p -МОП-дозиметра показано, что положительное смещение на затворе повышает эффективность температурного отжига из-за нейтрализации положительных ловушек в подзатворном оксиде электронами из подложки [9].

Актуальной задачей является создание микросистемы, работающей в диапазоне 10 рад – 1 Мрад с возможностью непрерывно отслеживать поток ИИ даже в выключенном состоянии со встроенной функцией отжига накопленного заряда для многократного использования. Цель настоящей работы – исследование структуры интегрального элемента, встроенного в МОП-дозиметр, для локального разогрева подзатворного диэлектрика от 150 °С для отжига накопленного под воздействием ИИ заряда.

Моделирование структуры. Структура нагревательного элемента разработана с учетом расчетов в среде численного моделирования COMSOL Multiphysics. В качестве нагревательного элемента используется n^+ -поликремний, одновременно являющийся затвором МОП-транзистора, через который пропускается электрический ток. В COMSOL Multiphysics создана модель с целью исследования локального нагрева подзатворного диэлектрика при нагревании затвора электрическим током для выбора оптимальных параметров структуры.

В основе модели нагревательного элемента заложено совместное решение двух систем уравнений электростатики и уравнений теплопередачи:

$$\begin{cases} \text{grad}J = Q_j, \\ J = \sigma(T)E, \\ E = -\text{grad}V, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho C_p u \text{grad}T + \text{grad}q = Q, \\ q = -k \text{grad}T, \end{cases}$$

где J – плотность тока; Q_j – внешний источник тока; σ – удельная электропроводность; E – электрическое поле; V – электрический потенциал; ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость; u – поле скоростей; q – тепловой поток; Q – дополнительный источник тепла; k – коэффициент теплопроводности.

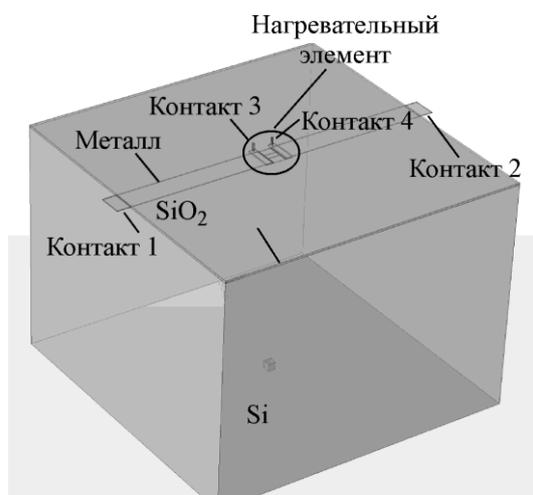


Рис.1. Общий вид моделируемой структуры в среде COMSOL Multiphysics: 1, 2 – контакты для задания электрического тока через структуру; 3, 4 – контакты для считывания изменения напряжения

Fig.1. General view of the simulated structure in the COMSOL Multiphysics: 1, 2 – contacts for setting the electric current through the structure; 3, 4 – contacts for reading the voltage change

Общий вид моделируемой структуры в среде COMSOL Multiphysics представлен на рис.1. Нагревательный элемент имеет четыре контакта для измерения сопротивления четырехзондовым методом. Габариты моделируемой структуры выбраны таким образом, чтобы при нагревании интегрального резистора на границах структуры всегда была температура окружающей среды.

Проведено исследование параметров структуры, при которых интегральный резистор в виде поликремния способен нагревать подзатворный окисел от 150 °С и выше. Максимальная температура ограничена необходимой потребляемой мощностью и надежностью структуры. Коэффициент теплопроводности окисла зависит от его толщины и механизма создания [15], что учтено при моделировании. Размер поликремния в полученной структуре над подзатворным диэлектриком составляет 8×16 мкм.

Результаты и их обсуждение. Структуры нагревательного элемента совместно с p -канальным МОП-транзистором изготовлены по 1,2-мкм КМОП аналого-цифровому технологическому маршруту. Подзатворные диэлектрики сформированы стандартными процессами термического окисления, совмещенными между собой. Для уменьшения контактного сопротивления поликремний выполнен в форме гантели.

Изготовленные образцы измерялись на ручной зондовой станции Cascade Microtech MPS 150 с системой нагрева ERS AC3 и с использованием полупроводникового измерителя Agilent B1500A при вариации температуры от 25 до 175 °С. Для расчета сопротивления поликремния применялся четырехзондовый метод измерения. На рис.2 представлена зависимость изменения сопротивления поликремния от температуры его нагрева. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) поликремния составляет ≈ 785 ppm/°С. Для значений выше 175 °С ТКС экстраполировался линейно. Среднее сопротивление структуры при комнатной температуре 52 Ом, поверхностное сопротивление поликремния $\sim 17,5$ Ом/□.

Получены зависимости изменения сопротивления поликремния от пропускаемого через него электрического тока. С использованием известного ТКС рассчитано изменение температуры по изменению сопротивления при нагреве электрическим током по формуле

$$T_2 = \frac{R_2 - R_1}{\text{ТКС}_{\text{Si}^*} R_0} + T_1,$$

где T_2 – искомая температура; R_2 – сопротивление при искомой температуре; R_1 – сопротивление при начальной температуре; R_0 – сопротивление при комнатной температуре; T_1 – начальная температура.

На рис.3 представлено изменение температуры от протекаемого тока изготовленных образцов и рассчитанных структур в COMSOL Multiphysics для двух толщин подзатворного диэлектрика (50 и 80 нм). Толщины подзатворных диэлектриков в изготовленных структурах получены из измеренных вольт-фарадных характеристик.

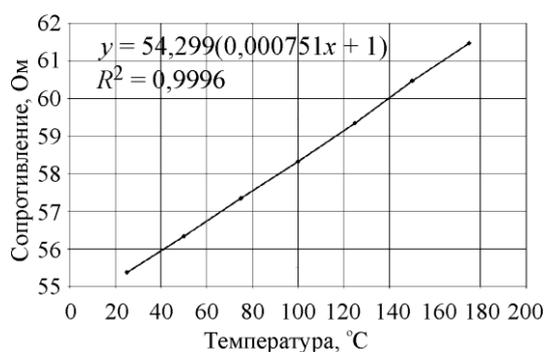


Рис.2. Зависимость изменения сопротивления поликремния от температуры его нагрева
Fig.2. Plot of the change in the resistance of polysilicon on its heating temperature

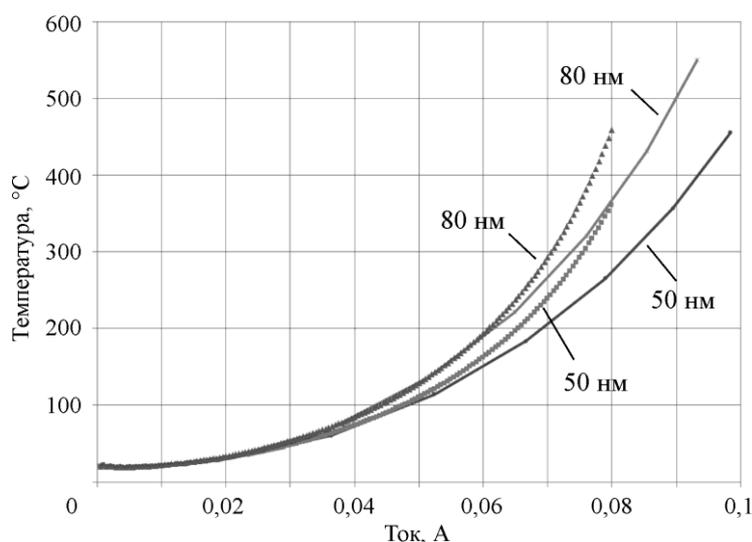


Рис.3. Зависимость температуры нагрева поликремния от пропускаемого тока через него для двух толщин подзатворного окисла: — теория; ▲▲▲ эксперимент

Fig.3. Plot of the dependence of the polysilicon heating temperature on the magnitude of the current passed through it for two thickness of the gate oxide 50 nm and 80 nm: — theory; ▲▲▲ experiment

Вычисленные значения температур отличаются от измеренных значений в канале, так как при нагревании током поликремний нагревается с большим градиентом, а при измерении изменения сопротивления поликремния температура усредняется. В канале возникает максимальное значение температуры, и по мере приближения к контактным окнам металлической разводки оно быстро спадает практически до комнатной температуры. Это происходит потому, что металл имеет большую теплопроводность и является

элементом пассивного охлаждения. На рис.4 показано изменение температуры в структуре нагревательного элемента, рассчитанного в среде Comsol Multiphysics, при токе через поликремний 76 мА и толщине подзатворного окисла 50 нм. Температура в подзатворном окисле в центре достигает 350 °С, а средняя температура, вычисленная по изменению сопротивления при его нагреве, составляет около 270 °С.

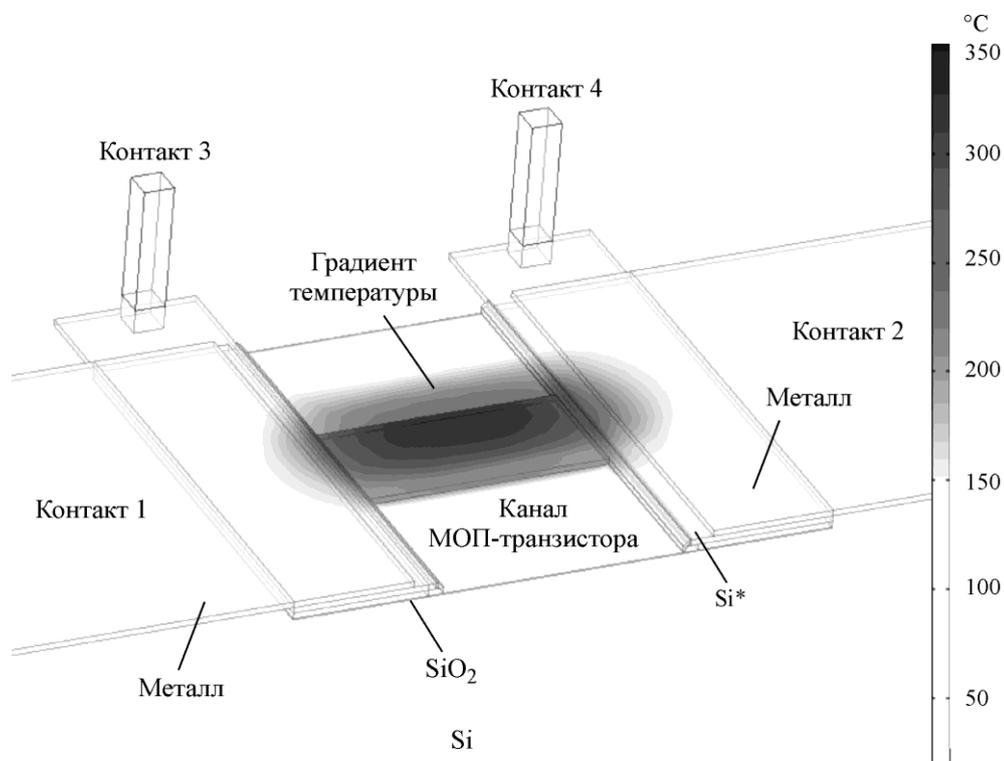


Рис.4. Изменение температуры в моделируемой структуре нагревательного элемента дозового датчика при токе через поликремний 76 мА и толщине подзатворного окисла 50 нм

Fig.4. Temperature change in the simulated structure of the heating element of the dose sensor at a current through the polysilicon 76 mA and the thickness of the gate oxide 50 nm

Измеренные значения температуры изготовленных образцов нагревательного элемента при пропускании через него электрического тока подтверждают работоспособность локального нагрева подзатворного диэлектрика МОП-дозиметра. Выполнять калибровку теоретической модели для совпадения результатов моделирования и измеренных данных нет необходимости.

Заключение. Исследована разработанная структура нагревательного элемента из n^+ -поликремния, который является затвором p -МОП-транзистора, для локального нагрева подзатворного диэлектрика с целью отжига накопленного под воздействием ИИ заряда. Результаты измерений подтвердили возможность локального разогрева подзатворного диэлектрика до температур, близких к 700 °С без разрушающих последствий для МОП-дозиметра. Предложенный метод локального нагрева позволяет повысить эффективность отжига накопленного заряда и воспроизводимость параметров МОП-дозиметра. Получить такую высокую температуру при нагревании кристалла целиком невозможно без разрушения элементов кристалла. Отсутствие разрушающих последствий определено путем нескольких последовательных длительных измерений.

Все исследования нагревательных элементов как при моделировании, так и при измерении изготовленных образцов проводились при постоянном токе. Предполагается, что для достижения оптимальных значений времени отжига и потребляемой мощности приоритетно использование механизма разогрева подзатворного окисла импульсным током [12, 13].

Литература

1. *Gladstone D.J., Chin L.M.* Automated data collection and analysis system for MOSFET radiation detectors // *Medical physics.* – 1991. – Vol. 18. – No. 3. – P. 542–548.
2. *Pejovic M.M.* P-channel MOSFET as a sensor and dosimeter of ionizing radiation // *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics.* – 2016. – Vol. 29. – No. 4. – P. 509–541.
3. *Pejovic S.M., Pejovic M.M., Stojanov D., Ciraj-Bjelac O.* Sensitivity and fading of pMOS dosimeters irradiated with X-ray radiation doses from 1 to 100 cGy // *Radiation protection dosimetry.* – 2015. – Vol. 168. – No.1. – P. 33–39.
4. *Caffrey J.A., Hamby D.M.* A review of instruments and methods for dosimetry in space // *Advances in Space Research.* – 2011. – Vol. 47. – No. 4. – P. 563–574.
5. MOSFET dosimetry mission inside the ISS as part of the Matroshka-R experiment / *A. Hallil, M. Brown, Yu. Akatov et al.* // *Radiation protection dosimetry.* – 2009. – Vol.138. – No. 4. – P. 295–309.
6. *Pejović M.M., Pejović S.M.* VDMOSFET as a prospective dosimeter for radiotherapy // *Applied Radiation and Isotopes.* – 2018. – Vol. 132. – P. 1–5.
7. Experimental evaluation of a MOSFET dosimeter for proton dose measurements / *Ryosuke Kohno, Teiji Nishio, Tomoko Miyagishi et al.* // *Physics in medicine and biology.* – 2006. – Vol.51. – No. 23. – P. 6077–6086.
8. Investigation into the re-use of PMOS dosimeters / *A. Kelleher, N. McDonnell, B. O'Neill et al.* // *IEEE transactions on nuclear science.* – 1994. – Vol. 41. – No. 3. – P. 445–451.
9. *Ristić G.S.* Thermal and UV annealing of irradiated pMOS dosimetric transistors // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2009. – Vol. 42. – No. 13. – P. 135101-1–135101-12.
10. *Pejović M.M.* Processes in radiation sensitive MOSFETs during irradiation and post irradiation annealing responsible for threshold voltage shift // *Radiation Physics and Chemistry.* – 2017. – Vol. 130. – P. 221–228.
11. *Kelleher A., Lane W., Adams L.* Investigation of on-chip high temperature annealing of PMOS dosimeters // *Proc. of the Third European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems.* IEEE. – 1995. – P. 465–469.
12. *Luo G.W., Qi Z.Y., Deng X.W., Rosenfeld A.* Investigation of a pulsed current annealing method in re-using MOSFET dosimeters for in vivo IMRT dosimetry // *Medical physics.* – 2014. – Vol. 41. – No. 5. – P. 051710-1–051710-6.
13. Direct and pulsed current annealing of p-MOSFET based dosimeter: the «MOSkin» / *S. Alshaikh, M. Carolan, M. Petasecca et al.* // *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine.* – 2014. – Vol.37. – No. 2. – P. 311–319.
14. Radiation effects in MOS oxides / *J.R. Schwank, M.R. Shaneyfelt, D.M. Fleetwood et al.* // *IEEE Transactions on Nuclear Science.* – 2008. – Vol. 55. – No. 4. – P. 1833–1853.
15. *Yamane T., Nagai N., Katayama S.I., Todoki M.* Measurement of thermal conductivity of silicon dioxide thin films using a 3ω method // *J. of Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 91. – No. 12. – P. 9772–9776.

Поступила в редакцию 09.04.2019 г.; после доработки 30.05.2019 г.; принята к публикации 24.09.2019 г.

Рязанцев Дмитрий Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), D.Ryazancev@tcen.ru

Кузнецов Евгений Васильевич – начальник лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), KEV@tcen.ru

References

1. Gladstone D.J., Chin L.M. Automated data collection and analysis system for MOSFET radiation detectors. *Medical physics*, 1991, vol. 18, no. 3, pp. 542–548.
2. Pejovic M.M. P-channel MOSFET as a sensor and dosimeter of ionizing radiation. *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, 2016, vol. 29, no. 4, pp. 509–541.
3. Pejovic S.M., Pejovic M.M., Stojanov D., Ciraj-Bjelac O. Sensitivity and fading of pMOS dosimeters irradiated with X-ray radiation doses from 1 to 100 cGy. *Radiation protection dosimetry*, 2015, vol. 168, no.1, pp. 33–39.
4. Caffrey J.A., Hamby D.M. A review of instruments and methods for dosimetry in space. *Advances in Space Research*, 2011, vol. 47, no. 4, pp. 563–574.
5. Hallil A., Brown M., Akatov Yu., Arkhangelsky V., Chernykh I., Mitrikas V., Petrov V., Shurshakov V., Tomi L., Kartsev I., Lyagushin V. MOSFET dosimetry mission inside the ISS as part of the Matroshka-R experiment. *Radiation protection dosimetry*, 2009, vol.138, no. 4, pp. 295–309.
6. Pejović M.M., Pejović S.M. VDMOSFET as a prospective dosimeter for radiotherapy. *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, vol. 132, pp. 1–5.
7. Ryosuke Kohno, Teiji Nishio, Tomoko Miyagishi, Eriko Hirano, Kenji Hotta, Mitsuhiko Kawashima, Takashi Ogino. Experimental evaluation of a MOSFET dosimeter for proton dose measurements. *Physics in medicine and biology*, 2006, vol.51, no. 23, pp. 6077–6086.
8. Kelleher A., McDonnell N., O'Neill B., Lane W., Adams L. Investigation into the re-use of PMOS dosimeters. *IEEE transactions on nuclear science*, 1994, vol. 41, no. 3, pp. 445–451.
9. Ristić G.S. Thermal and UV annealing of irradiated pMOS dosimetric transistors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, no. 13, pp. 135101-1–135101-12.
10. Pejović M.M. Processes in radiation sensitive MOSFETs during irradiation and post irradiation annealing responsible for threshold voltage shift. *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, vol. 130, pp. 221–228.
11. Kelleher A., Lane W., Adams L. Investigation of on-chip high temperature annealing of PMOS dosimeters. *Proceedings of the Third European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. IEEE*, 1995, pp. 465–469
12. Luo G.W., Qi Z.Y., Deng, X.W., Rosenfeld A. Investigation of a pulsed current annealing method in reusing MOSFET dosimeters for in vivo IMRT dosimetry. *Medical physics*, 2014, vol. 41, no. 5, pp. 051710-1–051710-6.
13. Alshaikh S., Carolan M., Petasecca M., Lerch M., Metcalfe P., Rosenfeld A. Direct and pulsed current annealing of p-MOSFET based dosimeter: the «MOSkin». *Australasian physical & engineering sciences in medicine*, 2014, vol.37, no. 2, pp. 311–319.
14. Schwank J.R., Shaneyfelt M.R., Fleetwood D.M., Felix J.A., Dodd P.E., Paillet P., Ferlet-Cavrois V. Radiation effects in MOS oxides. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, vol. 55, no. 4, pp. 1833–1853.
15. Yamane T., Nagai N., Katayama S.I., Todoki M. Measurement of thermal conductivity of silicon dioxide thin films using a 3ω method. *Journal of applied physics*, 2002, vol. 91, no. 12, pp. 9772–9776.

Received 09.04.2019; Revised 30.05.2019; Accepted 24.09.2019.

Information about the authors:

Dmitry V. Ryazantsev – Junior Researcher of the Advanced IC's Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), D.Ryazancev@tcen.ru

Evgeniy V. Kuznetsov – Head of the Advanced IC's Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), KEV@tcen.ru

Взаимосвязь физической и информационной энтропий в теории надежности для наноразмерных элементов

В.С. Кожевников¹, И.В. Матюшкин^{2,3}, Н.В. Черняев¹, Т.Д. Жукова²

¹*АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», г. Москва, Россия*

²*Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия*

³*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*

imatyushkin@niime.ru

Современные наноструктуры и наноматериалы, используемые в составе электронной компонентной базы, характеризуются высокой степенью гетерогенности и неравновесности. Во время работы прибора при термических, электрических и других воздействиях его характеристики ухудшаются в результате протекания физико-химических процессов. Вопросы обеспечения сбоеустойчивости и безотказной работы наноприборов в условиях автономного функционирования стоят чрезвычайно остро и требуют существенного развития математического аппарата в теории надежности. В работе рассмотрен физико-статистический подход к проблеме надежности наноприборов, в частности от фрагментов СБИС до уровня компонентной базы. Даны более точные формулировки при решении основного уравнения данного подхода. Получено решение в квадратурах для одномерного стационарного случая. Обоснованы наиболее значимые именно для наноприборов преимущества предлагаемого подхода перед традиционным подходом физики отказов. При этом отмечено сходство формальности физико-статистического подхода и специфики испытаний современных наноприборов с классической VAZ-моделью. Показано, что на основе динамики функции распределения изделий в пространстве их характеристик могут быть получены как эволюция функции надежности, так и эволюция информационной энтропии. Обсуждены слабые и сильные стороны гипотезы о связи информационной энтропии такого распределения (на основе испытаний) с физической энтропией наноприбора. Предложенный подход в теории надежности сочетает в себе преимущества физического подхода, опирающегося на конкретику механизмов деградации, и статистического подхода, использующего функцию надежности.

Ключевые слова: деградация; надежность; наносистема; физико-статистический подход; энтропия; уравнение непрерывности

Для цитирования: Кожевников В.С., Матюшкин И.В., Черняев Н.В., Жукова Т.Д. Взаимосвязь физической и информационной энтропий в теории надежности для наноразмерных элементов // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 589–600. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-589-600

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00626).

Correlation of Physical and Information Entropies in Reliability Theory for Nanosize Elements

V.S. Kozhevnikov¹, I.V. Matyushkin^{2,3}, N.V. Chernyaev¹, T.D. Zhukova²

¹*Molecular Electronics Research Institute, Moscow, Russia*

²*Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS, Moscow, Russia*

³*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

imatyushkin@niime.ru

Abstract: The up-to-date nanostructures and nanomaterials, used as a part of the electronic component base, are characterized by high extent of heterogeneity and non-equilibrium. During operation of the device under thermal, electric and other effects its characteristics worsen as a result of proceeding of physical-chemical processes. The issues of providing the error-free and fault-tolerant operation of nanodevices in conditions of autonomous work are very urgent and require significant development of the mathematical apparatus in the reliability theory. In the paper the physical-statistic approach (PSA) to the issue of reliability of nanodevices, in particular from the VLSI fragments to the component base level, has been considered. The more accurate than previously formulations while solving the PSA equation have been given. The solution in the quadratures for one dimensional stationary case has been obtained. The PSA advantages compared to a traditional approach of physics of failures, more significant exactly for nanodevices, have been stipulated. Besides, the similarity of the approach formality and the specifics of testing the modern nanodevices with the classical BAZ model have been noted. It has been shown that based on the dynamics of the function of distribution of items in space of their characteristics both the evolution of the reliability function and the evolution of information entropy can be obtained. The weak and strong features of the hypothesis of the relation between such distribution information entropy (based on tests) and the nanodevice physical entropy have been discussed. The proposed physical-statistic approach of the reliability theory combines the advantages of the physical approach based on the concreteness of degradation mechanisms and statistical approach using the reliability function.

Keywords: degradation; reliability; nanosystem; physico-statistical approach; entropy; equation of continuity

For citation: Kozhevnikov V.S., Matyushkin I.V., Chernyaev N.V., Zhukova T.D. Correlation of physical and information entropies in reliability theory for nanosize elements. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 589–600. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-589-600

Funding: the study has been funded by RFBR (project N 18-07-00626).

Введение. Современные наноструктуры и наноматериалы, широко используемые в составе электронной компонентной базы наноприборов, имеют высокую степень гетерогенности и неравновесности. При термических, электрических и других воздействиях

во время работы прибора его характеристики испытывают дрейф, ухудшаются в результате протекания внутренних физико-химических процессов, простейшим из которых является диффузия. Эти процессы, как правило, носят деградационный характер, многообразны и неконтролируемы [1]. Особенно данные факторы проявляются при таких дестабилизирующих воздействиях, как ионизирующее излучение космического пространства. Воздействие отдельных заряженных частиц и накопление общей поглощенной дозы излучений приводят к деградации порогового напряжения МОП-структур. Вопросы обеспечения сбоеустойчивости и безотказной работы наноприборов в условиях автономного функционирования в настоящее время стоят чрезвычайно остро и требуют существенного развития математического аппарата в теории надежности для исследования частных случаев поведения энтропии и функции надежности при некоторых формальных предположениях об интенсивности деградации.

Практически все деградационные явления сводятся к перераспределению вещества и заряда в системе [2]. При переходе к проектным нормам менее 45 нм эти явления происходят в гетерогенной физической системе, которая по определению неравновесна и в которой возрастает роль дискретности вещества и внутренних поверхностей раздела. По-видимому, девиация структурных параметров наноприбора неустранима технологическим путем, а с ее проявлением в испытаниях (например, на снятой ВАХ или ВФХ) следует все больше считаться, так как среднее квадратичное отклонение становится сравнимым с математическим ожиданием. Если N – число атомов в наноприборе, то математическое ожидание M его характеристики можно оценить как $M \sim N$, а дисперсию D как $D \sim N$. Тогда среднее квадратичное отклонение $\sigma = \sqrt{D} \sim \sqrt{N}$. При этом отношение $\frac{\sigma}{M}$ (коэффициент вариации) обратно пропорционально \sqrt{N} и сравнимо с единицей при малых значениях N . Механизмы деградации становятся комплексными, а поиск конкретных механизмов малоэффективным [3].

Состояние наноприбора как термодинамической системы описывается прежде всего энтропией, которая при условии замкнутости системы растет согласно второму началу термодинамики. Состояние наноприбора как объекта статистического исследования в теории надежности, применяемой в любом массовом производстве, описывается функцией надежности на основе измерений эксплуатационно-технических характеристик. Связать оба подхода позволяют гипотеза о корреляции физической (больцмановской) энтропии и информационной (шенноновской) энтропии [4], понимаемой как энтропия плотности распределения случайной величины, и физико-статистический подход (ФСП) [5] в теории надежности. В ФСП используется аналог классического уравнения непрерывности для описания динамики функции распределения наноприборов в фазовом пространстве их характеристик.

Дискуссия о тождественности энтропии в смысле Больцмана и в смысле Шеннона ведется с 30-х гг. XX в. Цель настоящей работы – анализ некоторых аспектов этой комплексной проблемы через призму теории надежности систем, прежде всего наноразмерных, а именно с точки зрения ФСП. Также рассматривается задача более строгой формализации решения основного уравнения ФСП для одномерного стационарного случая.

Подходы к определению энтропии и макросостояния прибора. Будем понимать термин «деградация» в смысле любых внутренних процессов, происходящих при эксплуатации наноприбора. Рассмотрим существующие представления об энтропии.

Приращение термодинамической (Клаузиуса) энтропии есть нормированная на температуру теплота: $dS = \frac{\delta Q}{T}$. Статистическая (Больцмана) энтропия как мера распространенности макросостояния выражается логарифмом числа реализующих его микросостояний Z : $S = k \ln Z + \text{const}$. Статистическая и термодинамическая энтропии совпадают с точностью до константы, которая определяется согласно третьему началу термодинамики.

Информационная (Шеннона) энтропия, первоначально связанная с телеграфными сообщениями, обобщена Сциллардом на физические системы. Энтропия Шеннона есть мера неопределенности P события или состояния: $H = \log_2 \frac{1}{P}$. В этом подходе информация, содержащаяся в сообщении, а в рассматриваемом случае – определяемая в испытании, измерениях, есть мера снятия неопределенности, так называемая «негэнтропия». Вопрос о тождественности статистической и информационной энтропий до сих пор не решен ввиду сложности их интерпретации. Тем не менее формальное сходство имеется с точностью до множителя константы Больцмана. Тогда $S = kH = -k \sum_i p_i \log p_i$, где i индексирует элементарные события или макросостояния.

Энтропия распределения связана с математической случайной величиной, не обязательно имеющей денотатом физическую систему. Хотя существуют вариации в определениях [4], обычно берут аналог шенноновского выражения. Для непрерывной n -мерной случайной величины с плотностью $f(\mathbf{x})$ имеем $H = - \int_{\mathbb{R}^n} f(\mathbf{x}) \log_2 f(\mathbf{x}) dx_1 dx_2 \dots dx_n$. Такое определение удобно, так как при максимизации энтропии распределения, а она есть функционал плотности, при разных налагаемых условиях интегрального вида выводятся равномерное, экспоненциальное и нормальное распределения. Этот факт говорит о фундаментальной роли энтропии для статистики природных явлений.

Интуитивное представление о макросостоянии становится плохо определенным и дискуссионным, если говорить об электронном приборе, например фрагменте СБИС. В физике полупроводников для N электронов в системе дискретных энергетических уровней $\{E_i\}$ – это усредненная во времени заселенность $\{N_i\}$. В термодинамике для идеального газа макросостояние характеризуется макропараметрами $\langle p, T \rangle$. При этом каждое микросостояние задается в фазовом пространстве скоростей и импульсов двойками $\langle q, p \rangle_{i=1,2,\dots,N}$. В кристаллографии для случая примеси замещения в твердом теле микросостоянием можно считать координаты атомов примеси, статической суммой Z – число перестановок, а за макропараметр можно взять среднее расстояние между атомами примеси. В пределах чипа или его фрагмента находятся сотни миллионов вентиляей и транзисторов, изготовленных при почти идентичных технологических условиях. Следовательно, каждому из них отвечает микросостояние, если под наноприбором понимать именно транзистор. Выборка для испытаний содержит множество микросостояний, подлежащее усреднению и дающее в пределе макросостояние.

Допустим, вектор ξ характеризует полностью макросостояние прибора. Полнота описания – это принципиальное требование. Нет гарантии, что все компоненты ξ измеримы. Более того, скорее всего, это не так и вообще нельзя даже сконструировать полный набор макропараметров, описывающих поведение наноприбора в целом по выборке. Можно констатировать, что макропараметры есть результат усреднения, агреги-

рования микросостояний, т.е. $\xi = A(\{\eta_i\})$, $i = \overline{1, N}$, где N – большое число (можно приравнять к объему выборки), A – оператор агрегирования.

Для простоты не будем различать измерение и испытание. В результате однократного испытания над i -м экземпляром в выборке получаем связь $\eta_i \mapsto \mathbf{x}_i$ (микросостояние \leftrightarrow измеренные технические характеристики). Основная проблема заключается в установлении достаточности глубины вектора $\mathbf{x}_i = (x_1^i, \dots, x_m^i)$ для восстановления «невидимого» микросостояния η_i . По-видимому, придется обойтись корреляцией. Заменим задачу другой: $\xi \Leftrightarrow \langle \mathbf{x} \rangle = B(\{\mathbf{x}_i\})$, $i = \overline{1, N}$, где B – оператор агрегирования на основе, например, метода моментов [6, 7], более стандартного с точки зрения математической статистики. В случае условного нанотранзистора компонентом вектора η_i будет, например, подвижность дырок в канале, а компонентом вектора \mathbf{x}_i – подпороговое напряжение, которое легко экстрагируется из ВАХ. Из испытаний, проводимых при аттестации наноприборов, можно восстановить их распределение $f(\mathbf{x})$ в пространстве характеристик.

Представим, что плотность распределения зависит от времени, поскольку и во время испытаний, и при нормальных условиях эксплуатации деградация заключается в дрейфе микросостояний, а значит, и макросостояния, т.е. каких-то усредненных структурных параметров, что коррелирует с измеряемыми параметрами. Другая проблема заключается в возможности использования/экстраполирования результатов испытаний для оценки изменения энтропии прибора при его работе в обычных условиях. Для этой ситуации можно применить классическую VAZ-модель [8], которая, несмотря на апелляцию к привычным величинам, таким как энергия активации, стресс, носит формальный характер и грубо учитывает механизмы деградации. VAZ-модель связывает время до отказа и при некотором предположении интенсивность отказов λ со стрессом σ и температурой T :

$$\tau = \tau_0 \exp\left(-\frac{E_a - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad \lambda = \frac{1}{\tau}, \quad (1)$$

где τ_0 – временная константа; E_a – энергия активации; γ – размерный параметр, такой, что произведение $\gamma\sigma$ представляет собой нагрузку, приходящуюся на единицу объема.

Однако проблема применения формулы (1) заключается в том, что для наноприборов такая простая связь становится неочевидной. Оставляя в стороне вопросы методики испытаний, предположим, что $f = f(\mathbf{x}, t)$. Если эта зависимость известна, то путем интегрирования находим энтропию и функцию надежности:

$$f(\mathbf{x}, t) \Rightarrow \begin{cases} R(t) = \int_{V_R} f(\mathbf{x}, t) dx_1 dx_2 \dots dx_m, & V_R \sim \prod_{k=1}^m [x_k - \Delta x_k; x_k + \Delta x_k], \\ H(t) = - \int_{R^n} f(\mathbf{x}, t) \log_2 f(\mathbf{x}, t) dx_1 dx_2 \dots dx_m, \end{cases} \quad (2)$$

где $R(t)$ – функция надежности [9]; $V_R \subseteq \mathbb{R}^m$ – область годности (диапазон параметров, когда изделие считается годным); $H(t)$ – энтропия распределения.

Схема на рисунке кратко поясняет рассуждения.



Схема исследования корреляционной связи энтропии и функции надежности на основании ФСП
Study scheme of correlation relationship of entropy and reliability function in terms of PSA

Обычно функция надежности задается распределением Вейбулла [7] или при идеализации экспоненциальным распределением. Конечно, в практических задачах нанотехнологии релевантны и другие типы распределений. Энтропия распределения, если отождествлять ее со статистической, должна возрастать, т.е. косвенные критерии правильности подхода имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dH}{dt} > 0, \\ \left(\frac{dR}{dt} = -\lambda R \right) \vee \left(R(t) = A_k e^{-(\lambda_k(t-c_k))^{\delta_k}}, t \in [t_k, t_{k+1}] \right). \end{array} \right. \quad (3)$$

Здесь $\langle A_k, c_k, \lambda_k \rangle$ – параметры распределения Вейбулла, заданного кусочно-непрерывно на k отрезках времени.

Возникает вопрос о знаке производной $\left(\frac{\partial R}{\partial H} \begin{array}{l} < \\ > \end{array} 0 \right)$: всегда ли деградационные процессы идут в направлении повышения энтропии? Связь энтропии и функции надежности представляется более гибкой и неоднозначной, чем кажется на первый взгляд. В качестве примера можно рассмотреть рекристаллизацию стекла, стимулируемую, как правило, светом. В рабочих условиях наноприбор не является закрытой системой, поэтому первое соотношение (3) не обязательно выполняется. Поскольку наноприбор существенно гетерогенен, то в одних его частях энтропия может повышаться, а в других – понижаться. Замутнение стекла, т.е. понижение энтропии, является деграда-

ционным процессом, снижающим надежность. Исследование этих вопросов требует отдельного теоретического анализа.

Физико-статистический подход и его основное уравнение. Пусть случайная выборка состоит из N штук изделий (наноприборов). Проведем гипотетическое измерение всех n «инженерных» параметров для каждого изделия. Тогда легко эмпирически определить число изделий dN , попавших в интервал, т.е. в малый объем фазового пространства: $[x_1 - dx_1, x_1] \times \dots \times [x_n - dx_n, x_n]$. Примем $dN = Nf(x_1, \dots, x_n)dx_1 \times \dots \times dx_n$ как определение плотности распределения $f(\mathbf{x})$. Предположим, что такое измерение проводилось сразу после изготовления наноприборов в момент времени $t=0$, т.е. являлось аттестационным контролем. Поместим всю выборку в примерно одинаковые условия эксплуатации и в момент t проведем второе измерение. Ввиду деградиционных внутренних процессов характеристики каждого изделия изменятся, что приведет к изменению плотности распределения. Наличие непредсказуемых катастрофических отказов приводит к исключению (изъятию) части изделий из выборки. Движущая сила эволюции плотности распределения, когда некоторые изделия «перетекают» из одного объема фазового пространства в соседний, – медленные деградиционные явления. При некоторой формализации последних задача состоит в предсказании динамики функции распределения.

Проведем аналогию с гидро- или электродинамикой. Будем говорить о выборке изделий как о веществе, а фазовое пространство отождествим с геометрическим, где это вещество перемещается. Случайные отказы сравним с источниками утечки вещества (например, это рекомбинация электронов на ловушках), а интенсивность деградации – со скоростью движения частиц-изделий. Для задания динамики функции распределения будем использовать физико-статистический аналог уравнения непрерывности в теории надежности [5]:

$$\frac{\partial f(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \operatorname{div}(f(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{c}(\mathbf{x}, t)) = -q(t)f(\mathbf{x}, t), \quad (4)$$

где $\mathbf{c}(\mathbf{x}, t) = \frac{d\mathbf{x}}{dt}$ – скорости деградации вектора измеряемых характеристик \mathbf{x} ; $q(t)$ – интенсивность случайных отказов, т.е. отказов, не связанных с деградацией.

Полная интенсивность отказов $\lambda(t)$ в данном случае обусловлена деградиционными и случайными процессами:

$$-\frac{d}{dt} \ln R(t) = \lambda(t) = \lambda_d(t) + q(t).$$

Таким образом, в отличие от формулы (1) связь формальных и физических аспектов для уравнений (2), (3) задается сложнее и более гибко. В рамках ФСП через величины \mathbf{c} и q можно инкорпорировать конкретные физико-химические механизмы в общую структуру модели. Следует обратить внимание и на обратную постановку задачи: зная динамику функции надежности $R(t)$, определить пару $\langle \mathbf{c}, q \rangle$, а через нее косвенно получить представление о механизмах деградации.

Параметры изделий не могут варьироваться в бесконечной области и превышать некоторые естественные значения. Тем не менее примем в формулировке начальных условий для (4) такую идеализацию:

$$t \geq 0, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad f(\mathbf{x}, 0) = f_0(\mathbf{x}). \quad (5)$$

При отсутствии случайных отказов $v(q \equiv 0)$ число изделий в выборке сохраняется, что также, поскольку уравнение непрерывности отражает закон сохранения вещества, необходимо требовать от решения (4), (5):

$$\int_{\mathbb{R}^n} f(\mathbf{x}, t) \equiv 1.$$

Естественны также требования непрерывности и нулевая асимптотика:

$$f(\mathbf{x}, t) \in C^0(\mathbb{R}^n), \quad \lim_{x_i \rightarrow \infty} f(\mathbf{x}, t) = 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

Отметим практический интерес к решению обратной задачи. В первую очередь необходимо выяснить, какие функциональные зависимости $\mathbf{c}(\mathbf{x}, t)$ порождают часто встречающуюся форму вейбулловского распределения для функции надежности $R(t)$. Более неформальным вопросом является нахождение связи условий эксплуатации и конкретных механизмов деградации, особенно для многомерного случая, с видом зависимости $\mathbf{c}(\mathbf{x}, t)$.

Анализ общего случая. Схема решения. По умолчанию будем предполагать непрерывную дифференцируемость \mathbf{c} и f при $x \in \mathbb{R}^n, t \in [0, t)$. Сначала покажем, что уравнение (4) можно свести к случаю $q(t) \equiv 0$. Проведя замену

$$f(\mathbf{x}, t) = z(\mathbf{x}, t) \exp\left(-\int_0^t q(\tau) d\tau\right), \text{ найдем, что уравнение принимает вид}$$

$$z_t(\mathbf{x}, t) + \operatorname{div}(z(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{c}(\mathbf{x}, t)) = 0.$$

Далее будем рассматривать уравнение, если $q(t) \equiv 0$:

$$\frac{\partial f(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \operatorname{div}(f(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{c}(\mathbf{x}, t)) = 0. \tag{6}$$

Переписывая его в виде

$$f_t + \mathbf{c}(\mathbf{x}, t) \nabla f = -f \nabla \mathbf{c}(\mathbf{x}, t),$$

получаем уравнение, решаемое стандартным приемом, а именно с помощью вспомогательного уравнения в частных производных, из которого находится функция v от $(n+2)$ независимых переменных [10]:

$$v_t + \mathbf{c}(\mathbf{x}, t) \nabla_x v - (\nabla \mathbf{c}(\mathbf{x}, t) v_y) = 0. \tag{7}$$

Далее составим систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dt}{ds} = 1, \\ \frac{d\mathbf{x}}{ds} = \mathbf{c}(\mathbf{x}, t), \\ \frac{dy}{ds} = -y \nabla \mathbf{c}(\mathbf{x}, t) \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \dot{t} = 1, \\ \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{c}(\mathbf{x}, t), \\ \dot{y} = -y \nabla \mathbf{c}(\mathbf{x}, t), \end{cases} \tag{8}$$

где точка обозначает дифференцирование по s . Затем найдем ее первые интегралы $v_1(\mathbf{x}, t, y), \dots, v_{n+1}(\mathbf{x}, t, y)$, через которые выражается общее решение уравнения (7):

$$v(\mathbf{x}, t, y) = \Phi(v_1(\mathbf{x}, t, y), \dots, v_{n+1}(\mathbf{x}, t, y)).$$

Тогда решение $f(\mathbf{x}, t)$ уравнения (6) определяется из тождества

$$\Phi(v_1(\mathbf{x}, t, f(\mathbf{x}, t)), \dots, v_{n+1}(\mathbf{x}, t, f(\mathbf{x}, t))) \equiv 0.$$

Одномерный стационарный случай. В одномерном случае $n=1$, $\mathbf{x} \equiv x$, $\mathbf{c}(\mathbf{x}, t) \equiv c(x, t)$. Под стационарностью понимается отсутствие зависимости скорости деградации от времени: $c(x, t) = c(x)$. В этих предположениях система (8) принимает вид

$$\begin{cases} \dot{t} = 1, \\ \dot{x} = c(x), \\ \dot{y} = -yc'(x), \end{cases}$$

а в качестве ее первых интегралов удобно взять v_1 и v_2 :

$$\begin{cases} v_1(x, t, y) = yc(x), \\ v_2(x, t, y) = t - \int \frac{dx}{c(x)}. \end{cases}$$

В выражении для $v_2(x, t, y)$ знак интеграла обозначает некоторую фиксированную первообразную. Уравнение на $f(x, t)$ имеет вид

$$\Phi\left(f(x, t) \cdot c(x), t - \int \frac{dx}{c(x)}\right) = 0,$$

откуда получаем

$$f(x, t) = F\left(t - \int \frac{dx}{c(x)}\right) (c(x))^{-1}, \tag{9}$$

если $\frac{\partial \Phi(v_1, v_2)}{\partial v_1} \neq 0$ и $c(x) \neq 0$. Принципиально важно отметить возможность неоднозначности, т.е. существования разных функций $F = F_1, F_2$, а значит, и возможность склейки $F = \begin{cases} F_1, x < x_{cr}, \\ F_2, x \geq x_{cr} \end{cases}$ в какой-то критической точке.

Начальное условие $f(x, 0) = f_0(x)$ определяет функцию $F(\xi)$:

$$F\left(-\int \frac{dx}{c(x)}\right) = c(x) \cdot f_0(x).$$

Чтобы найти $F(\xi)$, нужно обратить функцию $-\int \frac{dx}{c(x)}$:

$$\xi = -\int \frac{dx}{c(x)} \Rightarrow x = x(\xi), \quad (10)$$

$$F(\xi) = c(x(\xi)) \cdot f_0(x(\xi)).$$

Для получения явного вида решения $f(x,t)$ остается подставить в (9) выражение для $F(\xi)$ из (10).

Отметим еще одно свойство (6). Пусть f_0 четная, а c нечетная (по x). Тогда при любом t решение f четное.

Заключение. Связь энтропии и функции надежности особенно актуальна для наноприборов и гетерогенных систем. Рассмотренный физико-статистический подход в теории надежности сочетает преимущества физического подхода, опирающегося на конкретику механизмов деградации, и статистического подхода, использующего функцию надежности. Выбором вектора характеристик \mathbf{x} , а также выражения для интенсивности деградации $\mathbf{c}(\mathbf{x},t)$ моделируется поведение произвольной физической системы. Этот выбор может осуществляться на основе как физических принципов, так и результатов статистической обработки данных, полученных при тестировании наноприборов. С помощью решения основного уравнения физико-статистического подхода путем его преобразования к эквивалентному виду системы обыкновенных дифференциальных уравнений можно рассмотреть некоторые частные случаи. В стационарном одномерном случае ($\mathbf{c}(\mathbf{x},t) = c(x)$) данное уравнение решается в квадратурах.

В качестве направлений дальнейшего исследования можно назвать изучение случаев более высокой размерности, т.е. учитывающих сразу несколько характеристик, а также решение обратной задачи, заключающейся в нахождении скоростей деградации и начального распределения при известной функции надежности или временной зависимости энтропии системы.

Литература

1. **Kuo W.** Challenges related to reliability in nano electronics // IEEE Transactions on Reliability. – 2006. – Vol. 55. – No. 4. – P. 569–570.
2. **Triebel O.** Reliability issues in high-voltage semiconductor devices: diss. for the degree of doctor of technical science. – Vienna, 2012. – URL: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/triebl/> (дата обращения: 16.06.2019).
3. **Matic Z., Sruc V.** The physics-of-failure approach in reliability engineering // 30th International Conference on Information Technology Interfaces, Croatia, 2008. – IEEE. – 2008. – P. 745–750.
4. **Azzam M.M., Awad A.M.** Entropy measures and some distribution approximations // Microelectronics Reliability. – 1996. – 1996. – Vol. 36. – No. 10. – P. 1569–1580.
5. **Алексаия И.Т., Черняев Н.В.** Выражения для основных количественных показателей надежности в физико-статистическом подходе // Петербургский журнал электроники. – 1994. – Т. 1. – № 4. – P. 56–58.
6. **Pearson K.** Method of moments and method of maximum likelihood // Biometrika. – 1936. – Vol. 28. – No. 1/2. – P. 34–59.
7. **García O.** Simplified method-of-moments estimation for the Weibull distribution // New Zealand Journal of Forestry Science. – 1981. – Vol. 11. – P. 304–306.

8. Zhurkov S.N. Kinetic concept of the strength of solids // *Int. J. Fracture Mechanics*. – 1965. – Vol. 1. – No. 4. – P. 311–323.
9. Bensoussan A. Microelectronic reliability models for more than moore nanotechnology products // *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*. – 2017. – Vol. 30. – No. 1. – P. 1–25.
10. Тихонов А.Н., Васильева А.Б., Свешников А.Г. Дифференциальные уравнения. – М.: Наука, 1985. – 232 с.

Поступила в редакцию 17.06.2019 г.; после доработки 17.06.2019 г.; принята к публикации 24.09.2019 г.

Кожевников Владислав Сергеевич – инженер-техник АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный пр., 12/1), vkozhevnikov@niime.ru

Матюшкин Игорь Валерьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, Советская ул., 3), доцент кафедры проектирования и конструирования интегральных микросхем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), imatyushkin@niime.ru

Черняев Николай Владимирович – кандидат технических наук, начальник центра АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный пр., 12/1), nchernyaev@mikron.ru

Жукова Татьяна Дмитриевна – инженер-исследователь Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, Советская ул., 3), zhukova_t@ippm.ru

References

1. Kuo W. Challenges Related to Reliability in Nano Electronics. *IEEE Transactions on Reliability*, 2006, vol. 55, no. 4, p. 569–570.
2. Triebel O. *Reliability issues in high-voltage semiconductor devices*: Diss. Doctor of technical science. Vienna, 2012. URL: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/triebl/> (accessed 16.06.2019).
3. Matic Z., Sruck V. The Physics-of-Failure approach in reliability engineering. *30th International Conference on Information Technology Interfaces «ITI 2008»*, 2008. IEEE. 2008. pp. 745–750.
4. Azzam M.M., Awad A.M. Entropy measures and some distribution approximations. *Microelectronics Reliability*, 1996, vol. 36, no. 10, pp. 1569–1580.
5. Aleksanyan I.T., Chernyaev N.V. Expression for fundamental numerical ratio of reliability in the hysic-statistical approach. *Peterburgskiy zhurnal elektroniki = Petersburg Electronics Journal*, 1994 vol. 1, no. 4, pp. 56–58. (in Russian).
6. Pearson K. Method of moments and method of maximum likelihood. *Biometrika*, 1936, vol. 28, no. 1/2, pp. 34–59.
7. Garcia O. Simplified method-of-moments estimation for the Weibull distribution. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1981, vol. 11, pp. 304–306.
8. Zhurkov S.N. Kinetic concept of the strength of solids. *Int. J. Fracture Mechanics*, 1965, vol. 1, no. 4, pp. 311–323.
9. Bensoussan A. Microelectronic reliability models for more than moore nanotechnology products. *Facta universitatis – series: Electronics and Energetics*, 2017, vol. 30, no. 1, pp. 1–25.
10. Tikhonov A.N., Vasilyeva A.B., Svешnikov A.G. *Differential equations*. Moscow, Nauka Publ., 1985. 232 p. (in Russian).

Received 17.06.2019; Revised 17.06.2019; Accepted 24.09.2019.

Information about the authors:

Vladislav S. Kozhevnikov – Engineering Technician, Molecular Electronics Research Institute (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadnyi pr., 12), vkozhevnikov@niime.ru

Igor V. Matyushkin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), Assoc. Prof. of the Design and Construction Integrated Circuits Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), imatyushkin@niime.ru

Nikolay V. Chernyaev – Cand. Sci. (Eng.), Head of Center, Molecular Electronics Research Institute (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadnyi proezd, 12), nchernyaev@mikron.ru

Tatiana D. Zhukova – Research Engineer, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), zhukova_t@ippm.ru

Книжные новинки



Денисов А.Н., Коняхин В.В. Полузаказные БИС на БМК серий 5503 и 5507: в 4 кн.: Практическое пособие. Кн. 1. Методология проектирования и освоение производства / под общ. ред. академика РАН А.Н. Саурова. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. 200 с.



ISBN 978-5-94836-442-1

Это первая книга серии практических пособий в четырех книгах под общим названием «Полузаказные БИС на БМК серий 5503 и 5507», посвященных общим сведениям о базовых матричных кристаллах, вопросам методологии проектирования БИС на их основе, средствам проектирования и библиотекам ячеек полузаказных микросхем серий 5503 и 5507, нашедших широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре.

Книга содержит сведения об отечественных базовых матричных кристаллах, применяемых в настоящее время в аппаратуре космического назначения. Детально описана конструкция БМК серий 5503 и 5507, приведены их основные характеристики. В книге представлена методология проектирования полузаказных БИС и разработки аппаратуры на их основе, изложен порядок освоения производства БИС, дан обзор нормативно-технической документации, регламентирующей требования к микросхемам, приведен пример проектирования микросхемы на БМК серии 5503 средствами САПР «Ковчег 3.04».

Промышленная версия САПР «Ковчег 3.04» свободно распространяется и размещена на сайте (<http://www.asic.ru>).

Книга предназначена для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры, а также для преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов, изучающих современные методы проектирования специализированных БИС.

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 004.414.23:004.312.42

DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-601-609

Блочный метод синтеза триггерных схем с использованием карт минтермов

А.А. Кулакова, Е.Б. Лукьяненко

Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

anastasya.staryh@mail.ru

Создание методов совершенствования триггерных схем с целью снижения числа транзисторов и увеличения их энергоэффективности является актуальной задачей. Для развития современной микроэлектроники требуются методы, позволяющие синтезировать энергоэффективные триггерные схемы, которые имеют наименьшую рассеиваемую мощность, высокое быстродействие и занимают минимальную площадь кристалла с сохранением своей функциональности. В работе представлен блочный метод синтеза триггерных схем. Показано, что использование карт минтермов в данном методе позволяет одновременно синтезировать триггерную схему и оптимизировать ее. Метод рассмотрен на примерах синтеза одно- и двухступенчатых D -, RS -, JK -, T -триггеров. Проведено сравнение полученных триггеров со стандартными триггерными схемами на логических элементах по энергоэффективности. Показано, что использование предложенного метода позволяет достигнуть значительного улучшения (в среднем в 2–4 раза) энергоэффективности триггерных схем.

Ключевые слова: карта Карно; триггерная схема; тактовый сигнал; синтез и оптимизация схем; энергоэффективность схемы

Для цитирования: Кулакова А.А., Лукьяненко Е.Б. Блочный метод синтеза триггерных схем с использованием карт минтермов // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 601–609. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-601-609

Block Method of Synthesis of Trigger Circuits Using Maps of Minterms

A.A. Kulakova, E.B. Lukyanenko

Southern Federal University, Taganrog, Russia

anastasya.staryh@mail.ru

Abstract: The creation of methods for improving the trigger circuits in the direction of reducing the number of transistors and increasing their energy efficiency is an important task. For development of modern microelectronics the methods, allowing the synthesis of the energy-efficient trigger circuits, that have the least power dissipation, high speed and keep the minimum area of the crystal while maintaining their functionality, are required. In the work the block method of the synthesis of trigger circuits has been presented. It has been shown that the method uses the maps of minterms, which permits to simultaneously synthesize the trigger circuit and to optimize it. The method has been presented on the examples of the synthesis of one- and two-step *D*-, *RS*-, *JK*-, *T*-triggers. The comparison of the obtained triggers with standard trigger circuits on logic elements with respect to their energy efficiency has been performed. It has been shown that the use of the proposed method enables a significant improvement (in average 2–4 times) of the energy efficiency of trigger circuits.

Keywords: Karnaugh map; flip-flop circuit; clock signal; circuit synthesis and optimization; energy efficiency of circuit

For citation: Kulakova A.A., Lukyanenko E.B. Block method of synthesis of trigger circuits using maps of minterms. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 601–609. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-601-609

Введение. Синтез комбинационных схем с использованием карт минтермов и блоков из массивов *p*- и *n*-канальных МОП-транзисторов, расположенных в верхней и нижней полуплоскостях схемы, проведен в работе [1]. Такой подход может применяться и для синтеза триггерных схем.

Цель настоящей работы – синтез различных типов триггеров с помощью блочного метода и их сравнение по энергоэффективности с триггерами на логических элементах, схемотехника которых рассмотрена в [2–6].

Таблица 1
Таблица истинности
одноступенчатого *D*-триггера
Table 1
The truth table of one-step *D*-trigger

<i>C</i>	<i>D</i>	Q^{n+1}
0	0	Q
0	1	Q
1	0	0
1	1	1

***D*-триггер.** Составим таблицу функционирования одноступенчатого *D*-триггера (табл.1). Выходной сигнал Q^{n+1} принимает значения в зависимости от состояния входных переменных – информационного сигнала *D* и тактового сигнала *C*. Полагаем, что при *C* = 0 триггер находится в режиме хранения, а при *C* = 1 – в режиме записи.

Согласно табл.1 выходная функция Q^{n+1} равна:

$$Q^{n+1} = Q\bar{C}\bar{d} + Q\bar{C}d + Cd.$$

На основе полученного уравнения составим прямую и инвертированную карту минтермов для выходного сигнала Q^{n+1} (рис.1). В карте минтермов (рис.1,а) «склеим» единицы [7] и запишем оптимизированное уравнение для формирователя единиц, расположенного в нижней полуплоскости схемы:

$$Q_{[1]}^{n+1} = dC + Q\bar{C}. \quad (1)$$

Из инвертированной карты Карно (рис.1,б) запишем уравнение, в котором инвертируем каждый сигнал. Получим формулу, описывающую подсхему формирователя логического нуля, расположенную в верхней полуплоскости схемы:

$$Q_{[0]}^{n+1} = d\bar{C} + QC. \quad (2)$$

По найденным выражениям, применяя правила синтеза КМОП-схем [1, 8], синтезируем схему одноступенчатого D -триггера. Подсоединив второй D -триггер с инверсией синхросигнала, получим двухступенчатый D -триггер с динамическим управлением (рис.2).

При $C = 1$ транзисторы $V2, V3$ открыты и информационный сигнал D поступает на вход инвертора $D1$ и далее на выход первой ступени. Устанавливается режим записи. При $C = 0$ открываются транзисторы $V6, V7$ и образуется положительная обратная связь по цепям $D1, V5, V6$ или $D1, V8, V7$, обеспечивающая режим хранения (защелкивание выходного сигнала Q), который обеспечивается за счет наличия сигнала Q в слагаемых $Q\bar{C}$ в (1) и QC – в (2). Во второй ступени из-за изменения полярности тактового сигнала первоначально устанавливается режим хранения, а затем – записи, что обеспечивает динамический режим.

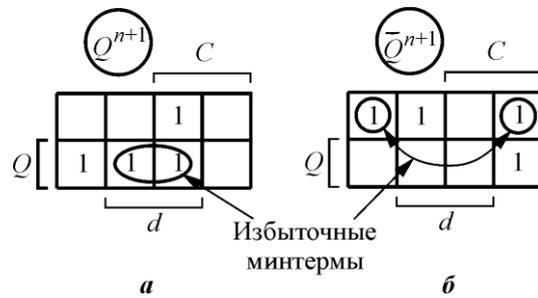


Рис.1. Карта минтермов D -триггера для сигнала Q^{n+1} (а) и инвертированная карта (б)
 Fig.1. Map of minterms for D -trigger for signal Q^{n+1} (a) and inverted card (b)

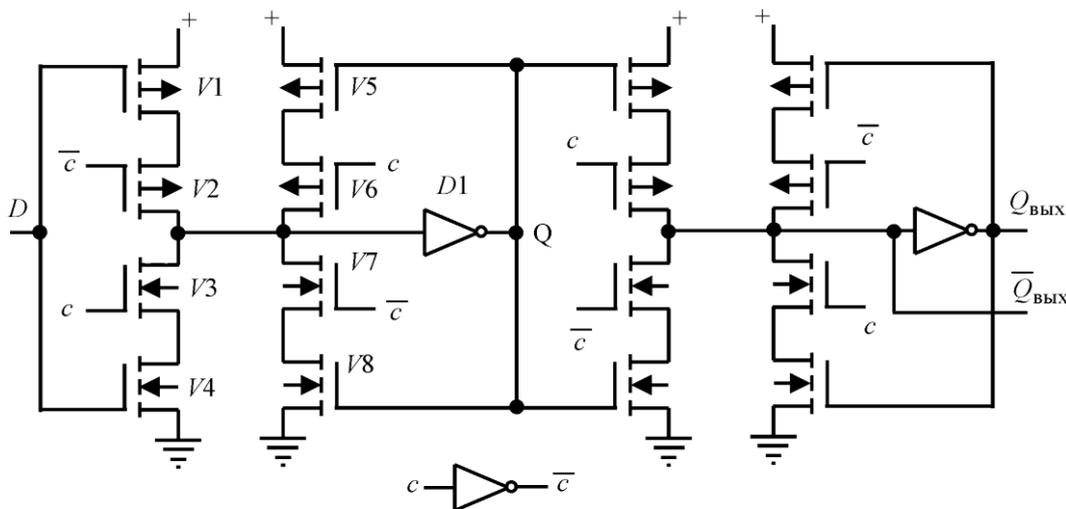


Рис.2. Схема двухступенчатого D -триггера
 Fig.2. Circuit of master-slave D -trigger

Принцип работы полученной схемы D -триггера аналогичен схемам, выполненным на мультиплексорах. Ее недостатком является то, что в режиме записи отсутствует триггерный эффект, так как в этом режиме отсутствует связь с выходным сигналом Q . Чтобы ввести триггерный эффект в режиме записи, добавим в (1) избыточные минтермы $Qd\bar{C}$, QdC (см. рис.1,а), а в (2) – минтермы $Q\bar{C}d$, QCd (см. рис.1,б). Избыточные минтермы позволяют добавить слагаемые Qd в (1) и (2). Наличие в этих слагаемых выходного сигнала Q обеспечивает защелкивание данных на выходе первой ступени триггера. Тогда формулы, описывающие подсхемы формирователей единиц и нулей, принимают вид

$$Q_{[1]}^{n+1} = Q(d + \bar{C}) + Cd, \quad Q_{[0]}^{n+1} = Q(d + C) + \bar{C}d.$$

Синтезированная по этим формулам схема D -триггера показана на рис.3.

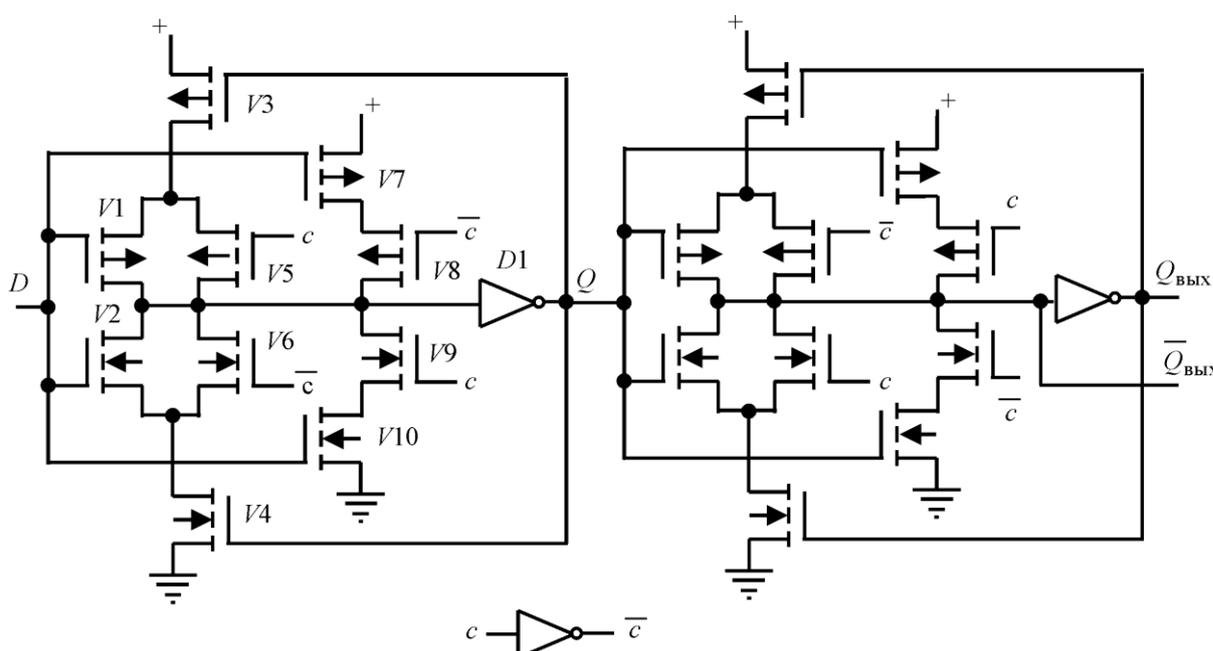


Рис.3. Схема D -триггера с динамическим управлением и защелкой в каждой ступени в режиме записи данных

Fig.3. The circuit of D -trigger with dynamic control and latch in each step in the data recording mode

Рассмотрим работу первой ступени триггера. При $C = 1$ транзисторы $V8$, $V9$ открыты и сигнал D через транзисторы $V7$, $V10$ поступает на выход инвертора $D1$. Выходной сигнал Q подается на транзисторы $V3$, $V4$ и совместно с транзисторами $V1$, $V2$ образует положительную обратную связь. Таким образом, в режиме записи входные данные защелкиваются в триггер. При $C = 0$ открываются транзисторы $V5$, $V6$. Цепи $D1$, $V3$, $V5$ или $D1$, $V4$, $V6$ образуют петлю положительной обратной связи и переводят триггер в режим хранения. Вторая ступень триггера работает аналогично. Только в результате смены полярности тактового сигнала режимы записи и хранения меняются местами.

Исследование схем проводилось методом схемотехнического моделирования в САПР OrCAD. Использовалась модель МОП-транзистора четвертого поколения BSIM4, что позволило снимать характеристики при напряжении питания, равном 3,3 В. Подробные сведения о моделях МОП-транзисторов приведены в работе [9]. Тактовая частота выбрана равной 50 МГц, токи МОП-транзисторов равны 1 мА при 0,18-мкм

технологии. Периметр и площадь областей стока и истока рассчитывались по методике, приведенной в работе [10].

Проведено сравнение двухступенчатого D -триггера по энергоэффективности с триггером на логических элементах [4]. Энергоэффективность L (пДж·шт.) рассчитывалась как произведение времени задержки распространения $t_{з,р}$ (нс) на среднюю рассеиваемую мощность $P_{ср}$ (мВт) и на количество транзисторов в схеме N (шт.) [1]:

$$L = t_{з,р} P_{ср} N.$$

Средняя мощность определялась путем усреднения мгновенной мощности и измерялась в конце промежутка времени 2 мкс. Время задержки измерялось как среднее значение на выходах триггера при разных уровнях выходного сигнала.

Измеренные параметры D -триггеров имеют следующие значения:

- на логических элементах: $P_{ср} = 0,045$ мВт, $\tau_{з,р} = 0,20$ нс, $N = 36$ шт., $L = 0,32$ пДж·шт;
- с защелкой в режиме записи данных: $P_{ср} = 0,031$ мВт, $\tau_{з,р} = 0,19$ нс, $N = 26$ шт., $L = 0,15$ пДж·шт;
- без защелки: $P_{ср} = 0,026$ мВт, $\tau_{з,р} = 0,14$ нс, $N = 22$ шт., $L = 0,08$ пДж·шт.

Схема разработанного D -триггера с защелкой превосходит по энергоэффективности схему на логических элементах в 2 раза, а схема D -триггера без защелки в режиме записи данных – в 4 раза.

RS-триггер. RS -триггер имеет два информационных входа: вход установки S и вход сброса R . Добавим к ним тактовый сигнал C и составим таблицу функционирования одноступенчатого RS -триггера (табл.2).

Таблица 2

Таблица истинности RS -триггера

Table 2

The truth table of RS -trigger

C	S	R	Q^{n+1}
0	0	0	Q
0	0	1	Q
0	1	0	Q
0	1	1	Q
1	0	0	Q
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	X

Из табл.2 получаем уравнение выходного сигнала Q^{n+1} , выраженное через минтермы:

$$Q^{n+1} = Q\bar{C}(\bar{S}\bar{R} + \bar{S}R + S\bar{R} + SR) + QC\bar{S}\bar{R} + CS\bar{R} + CSR.$$

Из уравнения составим карты минтермов для выходного сигнала Q^{n+1} в прямом и инвертированном виде, по которым запишем выражения для схем в нижней полуплоскости (формирователь единиц) и в верхней полуплоскости (формирователь нулей):

$$Q_{[1]}^{n+1} = SC + Q(\bar{C} + \bar{R}), \quad Q_{[0]}^{n+1} = \bar{S}\bar{R}\bar{C} + Q(C + S).$$

На основе полученных уравнений синтезируем схему одноступенчатого RS -триггера. Добавив к данной схеме вторую ступень в виде одноступенчатого D -триггера, получим двухступенчатый RS -триггер (рис.4).

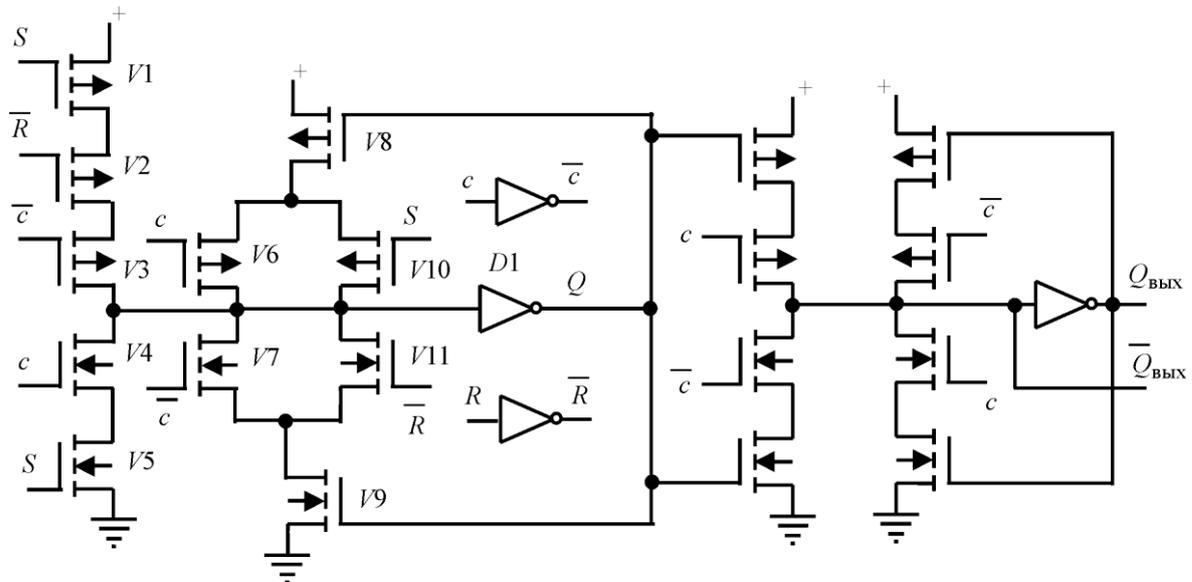


Рис.4. Схема синтезированного RS-триггера с динамическим управлением
 Fig.4. The circuit of the synthesized RS-trigger with dynamic control

Первая ступень, выполняющая функции RS-триггера, работает следующим образом. Режим хранения соответствует значению $C = 0$. При этом открываются транзисторы $V6, V7$ и по цепям $D1, V8, V6$ или $D1, V9, V7$ поддерживается положительная обратная связь. Цепочка транзисторов $V1-V5$ отключена. Режиму записи соответствует логическое значение тактового сигнала $C = 1$. При этом по цепям $V1, V2, V3, D1$ или $V5, V4, D1$ устанавливается выходной сигнал Q , который защелкивается, так как цепи $D1, V8, V10$ или $D1, V9, V11$ образуют положительную обратную связь. Транзистор $V1$ служит для исключения неопределенного состояния в RS-триггере. Схема имеет динамическое управление за счет второй ступени триггера.

Измеренные параметры RS-триггеров имеют следующие значения:

- на логических элементах [6]: $P_{cp} = 0,033$ мВт, $\tau_{з,р} = 0,20$ нс, $N = 34$, $L = 0,22$ пДж·шт;
- разработанный: $P_{cp} = 0,024$ мВт, $\tau_{з,р} = 0,18$ нс, $N = 27$ шт., $L = 0,11$ пДж·шт.

Энергоэффективность разработанной схемы в 2 раза выше, чем схемы на логических элементах.

JK-триггер. Значения выходных сигналов JK-триггера как функции от входных сигналов C, J, K приведены в табл.3.

Таблица 3

Таблица истинности JK-триггера

Table 3

The truth table of JK-trigger

C	J	K	Q^{n+1}
0	0	0	Q
0	0	1	\bar{Q}
0	1	0	Q
0	1	1	Q

C	J	K	Q^{n+1}
1	0	0	Q
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	\bar{Q}

Выходной сигнал триггера Q^{n+1} вычисляется как сумма произведений функции на минтермы. Таким образом, из табл.3 находим

$$Q^{n+1} = \bar{C}Q(\bar{J}\bar{K} + \bar{J}K + J\bar{K} + JK) + CQ\bar{J}\bar{K} + CJ\bar{K} + CJK\bar{Q}.$$

Оптимизированные уравнения для описания подсхем формирователей единиц и нулей получим из прямой и инвертированной карт Карно:

$$Q_{[1]}^{n+1} = Q(\bar{C} + \bar{K}) + JC\bar{Q}, \quad Q_{[0]}^{n+1} = Q(C + J) + \bar{K}C\bar{Q}.$$

По формулам синтезируем формирователи единиц и нулей в нижней и верхней полуплоскостях, в результате чего получаем схему статического JK -триггера. Добавляя схему D -триггера, синтезируем схему JK -триггера с динамическим управлением (рис.5). При синтезе значение \bar{Q} заменяется на $\bar{Q}_{\text{ВЫХ}}$, так как \bar{Q} , взятое из первой ступени, образует отрицательную обратную связь.

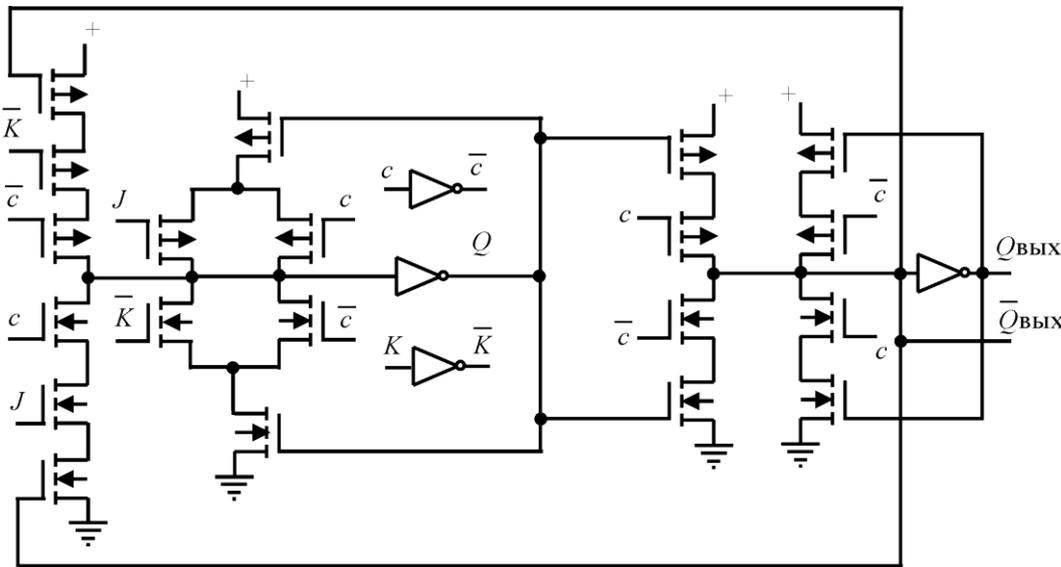


Рис.5. Схема разработанного JK -триггера
Fig.5. The circuit of developed JK -trigger

Двухступенчатый JK -триггер срабатывает по отрицательному фронту тактового импульса. Правильность функционирования триггера подтверждена моделированием для всех последовательностей и сочетаний входных сигналов J и K .

Измеренные параметры JK -триггеров имеют следующие значения:

- на логических элементах [6]: $P_{cp} = 0,049$ мВт, $\tau_{3,p} = 0,23$ нс, $N = 38$ шт., $L = 0,43$ пДж·шт;

- разработанный: $P_{cp} = 0,035$ мВт, $\tau_{3,p} = 0,20$ нс, $N = 28$ шт., $L = 0,20$ пДж·шт.

Энергоэффективность разработанной схемы в 2 раза выше, чем схемы на логических элементах.

T-триггер. T -триггер изменяет свое состояние при каждом поступлении тактового сигнала.

Согласно таблице истинности T -триггера (табл.4), запишем уравнение работы триггера:

$$Q^{n+1} = \bar{C}Q + C\bar{Q}.$$

Таблица 4
Таблица истинности
Т-триггера

Table 4
The truth table of T-trigger

C	Q^{n+1}
0	Q
1	\bar{Q}

На основании прямой и инвертированной карт Карно для выходного сигнала Q^{n+1} запишем уравнения, отражающие работу формирователей единиц и нулей:

$$Q_{[1]}^{n+1} = \bar{C}Q + C\bar{Q}, \quad Q_{[0]}^{n+1} = CQ + \bar{C}\bar{Q}.$$

По полученным формулам синтезируем схему Т-триггера со статическим управлением. Добавив D-триггер, получим триггер с динамическим управлением. Сигнал \bar{Q} в формулах снимается с инверсного выхода второй ступени. Схема двухступенчатого Т-триггера показана на рис.6.

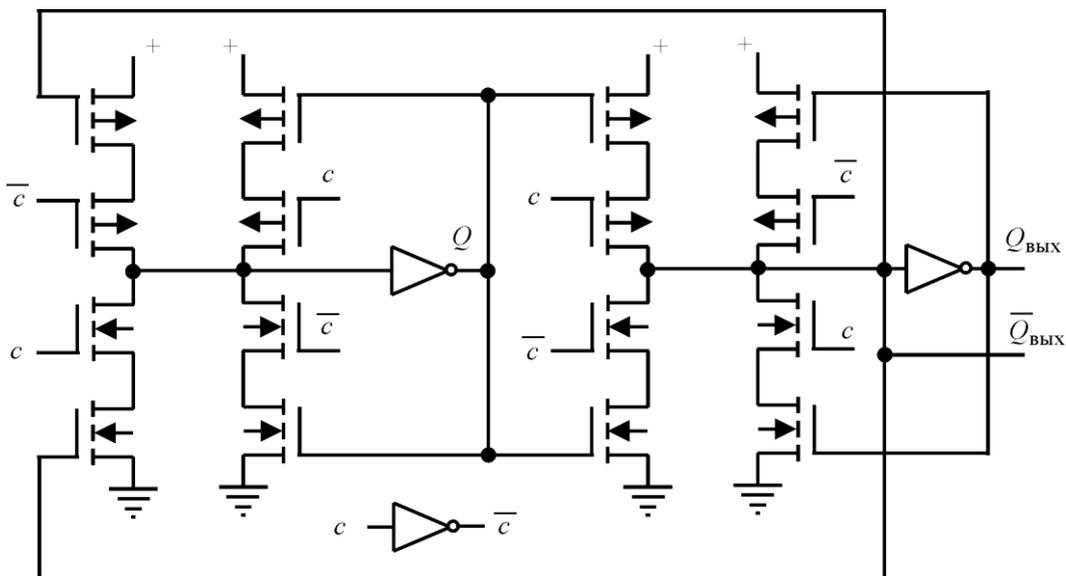


Рис.6. Синтезированная схема двухступенчатого Т-триггера
Fig.6. The synthesized circuit of master-slave T-trigger

При $C = 1$ первая ступень триггера находится в режиме записи выходного инверсного сигнала \bar{Q} . При смене уровня тактового сигнала первая ступень переходит в режим хранения выходного инверсного сигнала, а вторая – в режим записи инвертированного сигнала. В результате обеспечивается смена состояний триггера. Энергоэффективность Т-триггеров соответствует энергоэффективности D-триггеров.

Заключение. Результаты моделирования показали, что триггерные схемы, синтезированные с использованием блочного метода, превосходят аналоги на стандартных логических элементах по энергоэффективности в 2–4 раза. У синтезированного двухступенчатого D-триггера энергоэффективность увеличилась в 4 раза, у D-триггера с защелкой в каждой ступени в режиме записи данных, RS-триггера и JK-триггера – в 2 раза. Таким образом, представленный метод синтеза триггерных схем можно успешно применять для оптимизации последовательных схем по энергоэффективности.

Литература

1. Старых А.А. Метод синтеза функциональных блоков комбинационных схем с использованием минтермов и макстермов // Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – Вып. 2-3 (236–237). – С. 63–69.
2. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 528 с.

3. **Бойко В.И., Гуржий А.Н., Жуйков В.Я.** Схемотехника электронных систем. Цифровые устройства. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 512 с.
4. **Шило В.Л.** Популярныe цифровые микросхемы: справочник. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
5. **Барри Уилкинсон.** Основы проектирования цифровых схем. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 320 с.
6. **Зельдин Е.А.** Триггеры. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
7. **Алексенко А.Г.** Современная схемотехника. – М.: Энергия, 1979. – 112 с.
8. **Рабай Ж.М., Чандракасан А., Николич Б.** Цифровые интегральные схемы. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 912 с.
9. **Денисенко В.В.** Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. – М.: Физматлит, 2010. – 408 с.
10. **Ракитин В.В.** Интегральные схемы на КМОП-транзисторах. – М., 2007. – 307 с.

Поступила в редакцию 14.05.2019 г.; после доработки 11.06.2019 г.; принята к публикации 24.09.2019 г.

Кулакова Анастасия Алексеевна – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Инжинирингового центра приборостроения, радио- и микроэлектроники Южного федерального университета (Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2), anastasya.staryh@mail.ru

Лукьяненко Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент Южного федерального университета (Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2), luk101010@mail.ru

References

1. Starykh A.A. The method for the synthesis of functional blocks of combinational circuits with the use of minterms and maxterms. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor devices*, 2015, iss. 2-3 (236-237), pp. 63–69. (in Russian).
2. Ugrymov E.P. *Digital circuitry*. St.Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2001. 530 p. (in Russian).
3. Boyko V.I., Gurzhiy A.N., Zhujkov V.Ya. *Circuitry of electronic systems. Digital devices*. St.Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2004. 512 p. (in Russian).
4. Zeldin E.A. *Triggers*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 96 p. (in Russian).
5. Barry Wilkinson. *Fundamentals of digital circuit design*. Moscow, Publishing house «Williams», 2004. 320 p. (in Russian).
6. Pukhalsky G.I., Novoseltseva T.Ya. *Designing digital devices*. St. Petersburg, Lan publishing house, 2012, 896 p. (in Russian).
7. Aleksenko A.G. *Modern microcircuitry*. Moscow, Energy Publ., 1979. 112 p. (in Russian).
8. Rabai J.M., Chandrakasan A., Nikolich B. *Digital Integrated circuits. Design methodology*. 2nd edition. Moscow, LLC «I.D.Williams» Publ., 2007. 912 p. (in Russian).
9. Denisenko V.V. *Compact MOSFET models for SPICE in micro-and nanoelectronics*. Moscow, Fizmatlit, 2010. 408 p. (in Russian).
10. Rakitin V.V. *Integrated circuits in CMOS transistors*. Moscow, 2007. 307 p. (in Russian).

Received 14.05.2019; Revised 11.06.2019; Accepted 24.09.2019.

Information about the authors:

Anastasya A. Kulakova – Cand. Sci. (Eng.), Junior Scientific Researcher, Southern Federal University (Russia, 347922, Taganrog, Shevchenko st., 2), anastasya.staryh@mail.ru

Yevgeniy B. Lukyanenko – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Southern Federal University (Russia, 347922, Taganrog, Shevchenko st., 2), luk101010@mail.ru

Алгоритм компрессии и декомпрессии потока конфигурационных данных ПЛИС

И.В. Кузьминов^{1,2}, В.В. Лосев¹, И.С. Новожилов^{1,2}, Ю.А. Чаплыгин¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

²АО «Научно-исследовательский институт молекулярной
электроники», г. Москва, Россия

dsd@miee.ru

При записи в ПЗУ ряда зашивок ПЛИС возникает необходимость уменьшения объема конфигурационных данных. Это позволяет уменьшить топологический размер блока ПЗУ на кристалле. Существующие алгоритмы компрессии конфигурационных данных базируются на поиске энтропии случайного набора прошивок. В работе предложен механизм компрессии и декомпрессии конфигурационных данных ПЛИС, основанный на особенностях архитектуры. Показано, что поток конфигурационных данных имеет некоторые закономерности, обусловленные большим количеством «запрещенных» состояний в наборе конфигурационных данных, когда образуются недопустимые связи логических элементов. Предложен алгоритм компрессии и декомпрессии потока конфигурационных данных ПЛИС, базирующийся на анализе архитектуры ПЛИС и составлении таблицы перекодировки с помощью команд префиксного кода. Преимуществом алгоритма является поиск наиболее повторяющихся комбинаций на основе анализа архитектуры ПЛИС вместо поиска энтропии случайного набора конфигурационных данных. Алгоритм декодирования характеризуется относительной простотой, что позволяет сэкономить аппаратные ресурсы для реализации механизма декомпрессии.

Ключевые слова: алгоритм компрессии; конфигурационные данные ПЛИС; префиксное кодирование

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (договор № 19-07-00541/19).

Для цитирования: Кузьминов И.В., Лосев В.В., Новожилов И.С., Чаплыгин Ю.А. Алгоритм компрессии и декомпрессии потока конфигурационных данных ПЛИС // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 610–618. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-610-618

Algorithm for Compression and Decompression of the FPGA Configuration Bit Stream

I.V. Kuzminov^{1,2}, V.V. Losev¹, I.S. Novozhilov^{1,2}, Yu.A. Chaplygin¹

¹National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Russia

²JSC «Molecular Electronics Research Institute», Moscow, Russia

dsd@miee.ru

Abstract: It is necessary to reduce the configuration bit stream volume if there is a need to write several FPGA configurations to the ROM. This leads to decrease in the topological size of the ROM block on the chip. The article discusses the development of the mechanism of compression and decompression of the FPGA configuration bit stream. It has been shown that the stream of configuration data has some regularities. This is due to the presence of a large number of «forbidden» states in the configuration data set, when inadmissible connections of logical elements are formed. The algorithm of compression and decompression of the FPGA configuration bit stream has been proposed. The algorithm is based on the analysis of the FPGA architecture and the compilation of the conversion table using the prefix code commands. The advantage of the algorithm is the search for the most repetitive combinations based on the analysis of the FPGA architecture, instead of searching for the entropy of a random set of configuration data. Another advantage is the relative simplicity of the decoding algorithm, which saves hardware resources for the implementation of the decompression mechanism.

Keywords: compression and decompression algorithm; FPGA configuration bit stream; prefix coding

Funding: the work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (contract № 19-07-00541/19).

For citation: Kuzminov I.V., Losev V.V., Novozhilov I.S., Chaplygin Yu.A. Algorithm for compression and decompression of the FPGA configuration bit stream. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 610–618. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-610-618

Введение. Применение механизма компрессии (сжатия) конфигурационных данных (КД) дает возможность уменьшить объем ПЗУ, используемый для хранения конфигурации, и тем самым уменьшить топологическую площадь блока ПЗУ. Существующие алгоритмы компрессии КД базируются на поиске энтропии случайного набора прошивок.

Цель настоящей работы – разработка алгоритма компрессии и декомпрессии, обусловленного особенностями архитектуры ПЛИС. Отметим, что в рамках данной статьи термин «механизм» имеет более широкое понятие, чем «алгоритм». Механизм содержит в себе алгоритм компрессии и декомпрессии. Под понятием «прошивка» понимается набор конфигурационных данных под определенный проект, реализуемый на ПЛИС.

Разработка алгоритма компрессии и декомпрессии конфигурационных данных. Суть механизма компрессии и декомпрессии заключается в том, что данные архивируются с помощью программного обеспечения, которое используется для конфигурирования ПЛИС. Заархивированные данные посредством передачи набора команд записываются во внутреннее ПЗУ. При необходимости программирования ПЛИС данные поступают в устройство разархивации, реализованное аппаратно и встроенное во внутреннюю структуру ПЛИС (рис.1).



Рис.1. Функциональная диаграмма работы механизма компрессии и декомпрессии конфигурационных данных

Fig.1. Functional diagram of the compression and decompression algorithm of the configuration bit stream

Блок взаимодействия с ПЛИС представляет собой синхронный последовательно-параллельный интерфейс. Максимальное быстродействие при этом достигается при условии, что длина закодированных последовательностей не превышает разрядности внутренней шины памяти. Файл конфигурации в рассматриваемом случае представляет собой набор двоичной информации. При уменьшении количества битов программирования уменьшается конфигурационный файл. Поскольку устройство разархивирования должно быть реализовано аппаратно и расходует ресурсы логической емкости микросхемы, задача состоит в том, чтобы максимально упростить механизм разархивации [1]. Необходимо, чтобы алгоритм реализовывал сжатие без потерь.

Алгоритм компрессии характеризуется коэффициентом сжатия – отношением сжатого конфигурационного файла к оригинальному конфигурационному файлу [2–4]. В случае применения алгоритма компрессии и декомпрессии имеет значение также скорость декодирования КД: чем больше компрессия данных, тем дольше процесс раскодировки, и наоборот. Таким образом, второй количественной оценкой алгоритма является скорость раскодировки [5].

Прошивка ПЛИС представляет собой набор данных из единиц и нулей, последовательность которых, как правило, имеет некоторые закономерности, зависящие от архитектуры ПЛИС. Это обусловлено большим количеством «запрещенных» состояний в зашивке, когда образуются недопустимые связи логических элементов. Анализ спроектированных прошивок ПЛИС показал, что количество единиц в потоке конфигурационных данных составляет не более 30 %. Исходя из этих данных, предложен механизм архивации, основанный на принципе записывания «единиц в окружении нулей». Основной алгоритм служит набор из 256 восьмибитных команд, которые кодируют следующие последовательности входных бит: набор нулей в количестве 500, 1 000 и 2 000 бит; одну, две и три единицы; комбинации 01, 001, 0001 и т.д. в количестве 250. После архивации набор команд подается непосредственно в ПЛИС на устройство разархивирования, где данные преобразуются обратно в конфигурационные.

Данный алгоритм архивации показал хорошие результаты в случае архивации относительно простых конфигурационных данных, содержащих не более 20 % единиц на

прошивку и длинные комбинации нулей. Однако при дальнейшем усложнении устройств, реализуемых в ПЛИС, и, соответственно, росте количества единиц в потоке конфигурационных данных выявлено увеличение объема информации после архивации. Это обусловлено большим количеством команд, кодирующих последовательности данных короче 8 бит. В предельном случае большое количество команд приводит к тому, что объем заархивированных данных будет равен исходным данным. Другим недостатком является скорость аппаратной декомпрессии. При длине максимального закодированного слова 2 000 бит и разрядности внутренней шины памяти 32 бит разница равна 63, т.е. при номинальном быстродействии интерфейса, равном 100 Мбит/с, скорость декомпрессии составит 1,5 Мбит/с.

Для увеличения количества зашивок, которые можно сжать, принято решение использовать в качестве механизма архивации префиксное кодирование. Префиксный код представляет собой команды различной длины, которые можно однозначно декодировать из потока данных без использования разделительных знаков. Таким образом, выполняется условие Фано: если в код входит слово a , то для любой непустой строки b слова ab в коде не существует [6, 7] и возникает возможность записи коротких комбинаций конфигурационных данных командами соизмеримой или меньшей длины. Для оценки структуры возможных конфигурационных данных использовалась псевдорандомизация всех способов программирования логических блоков ПЛИС, состоящая из следующих шагов.

Шаг 1. Определение всех разрешенных состояний секторов памяти, программирующих логический блок.

Шаг 2. Описание правил, по которым секторы памяти могут находиться в том или ином состоянии относительно друг друга.

Шаг 3. Проведение рандомизации возможных состояний секторов памяти и проверка на соответствие правилам.

В результате получены наборы случайных зашивок для 89 %-ной конфигурационной памяти ПЛИС. Случайные зашивки нельзя рассматривать как реализованные устройства на ПЛИС, но они дают представление о том, каким наихудшим случаем могут быть представлены конфигурационные данные с точки зрения архивации.

В алгоритме компрессии используется известный подход, при котором из битовой последовательности удаляются нулевые последовательности [1, 8]. Сначала из битового потока выбираются наиболее длинные последовательности, которые соответствуют наиболее длинным командам, составленным в префиксном коде. Например, максимальная длина одной из девяти команд в префиксном коде будет равна восьми. Далее необходимо индексировать места, из которых удалены эти длинные последовательности. Затем повторно запускается проход по файлу для следующей более короткой команды с пропуском индексированных данных. Описанный многопроходный цикл с каждой новой итерацией сокращает количество обрабатываемых данных. В результате выполненных проходов формируется ассоциативный список, куда загружаются команды с соответствующим порядковым номером.

Поскольку алгоритм предусматривает удаление из битового потока последовательности нулей, необходимо предусмотреть команду единичной длины для записи «1». Кроме того, необходимо провести выборку последовательности нулей разного количества. Путем экспериментального тестирования разного набора последовательностей составлена таблица перекодировки (таблица).

**Таблица перекодировки
Conversion table**

Номер кодируемой последовательности	Код последовательности (префиксный код)	Кодируемая последовательность
1	«0»	1
2	«11»	0
3	«101»	100
4	«1001»	0000_0
5	«1000_1»	0000_00
6	«1000_01»	0000_000
7	«1000_001»	0000_0000_0000_0000
8	«1000_0001»	0000_0000_0000_0000_0000_0000
9	«1000_0000»	0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000

После нескольких проходов цикла последовательность значительно сокращается благодаря удалению наиболее длинных последовательностей, что обеспечивает высокопроизводительную работу алгоритма кодирования. Блок-схема алгоритма компрессии представлена на рис.2.

Аппаратный блок декомпрессии представляет собой сдвиговый регистр с переполнением. Информация для каждой команды префиксного кода записана в регистры, на каждую команду существует свой декодер. Поиск команд происходит с помощью сдвига «скользящего окна», реализованного на сдвиговом регистре. Путем побитного увеличения размера окна на каждой итерации происходит сравнение с набором команд. При нахождении команды данные, соответствующие этой команде, фиксируются в промежуточный регистр. Размер «скользящего окна» при этом обнуляется для следующего побитного увеличения и поиска новой команды. При заполнении промежуточного регистра данные поступают в выходной регистр. Блок-схема алгоритма декомпрессии представлена на рис.3.

Приведем результаты компрессии КД:

<i>Номер теста</i>	<i>Коэффициент сжатия</i>
1	1,0007
2	3,96
3	2,24
4	4,01
5	4,01
6	4,02
7	4,03
8	4,02

В виде первого теста использованы наборы случайных зашивок для 89 %-ной конфигурационной памяти ПЛИС. Для остальных 11 % данные генерировались с помощью тех же алгоритмов. Таким образом, данные сгенерированы по худшему случаю. Этот набор данных имеет небольшой процент сжатия, но он гарантирует возможность сжатия любого набора данных для ПЛИС с заданной архитектурой. В качестве остальных тестов представлены реальные наборы КД с конкретными проектами.

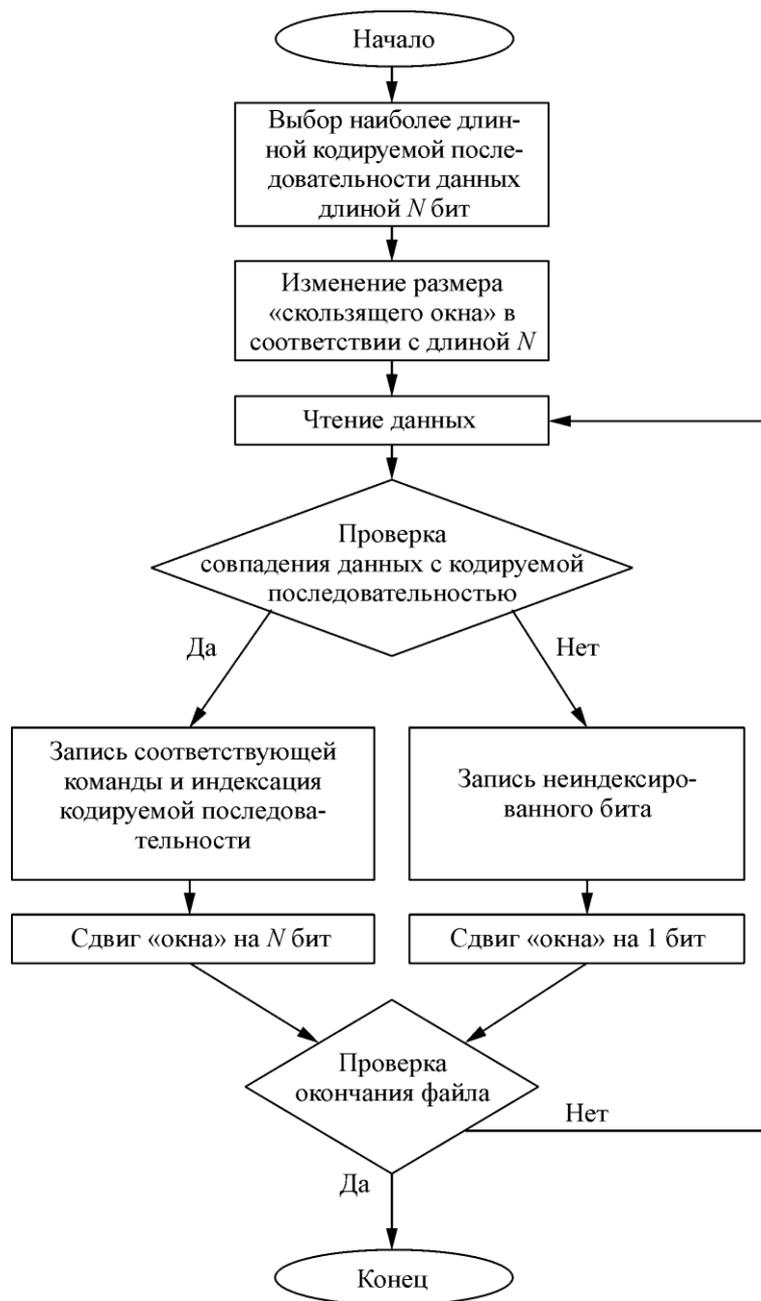


Рис.2. Блок-схема алгоритма компрессии
Fig.2. Block diagram of compression algorithm

Алгоритм компрессии конфигурационных данных ПЛИС заключается в следующем:

- анализ архитектуры с целью исключения последовательностей данных, которые приводят к образованию недопустимых связей логических элементов;
- генерация случайных зашивок с учетом выявленных ограничений и наибольшей энтропии данных;
- составление набора команд с использованием префиксного кодирования;
- составление таблицы кодирования;
- проверка таблицы кодирования путем архивации данных с максимально допустимым количеством единиц на строку.

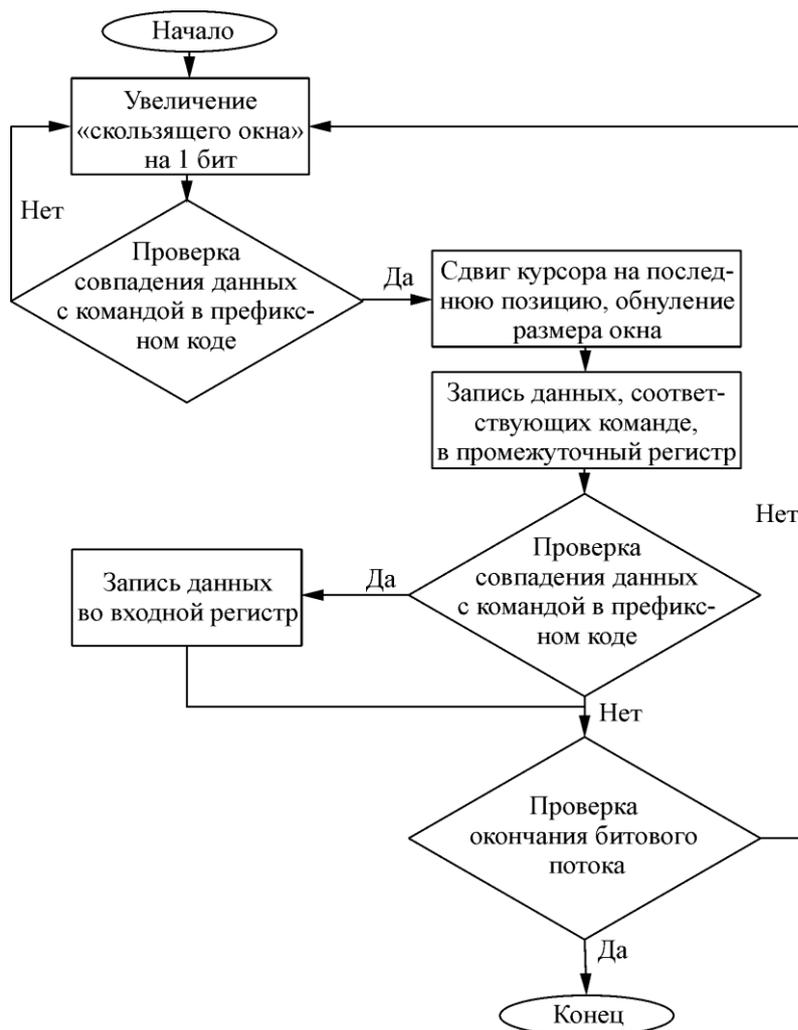


Рис.3. Блок-схема алгоритма декомпрессии
 Fig.3. Block diagram of decompression algorithm

Заключение. Предложенный алгоритм компрессии и декомпрессии позволяет получить средний коэффициент сжатия, равный 3,41. Алгоритм кодирования реализован на языке Skill, время кодировки составляет примерно 20 с. Поскольку максимальная длина битовой последовательности не превышает разрядности шины, скорость раскодировки составляет 100 Мбит/с.

На основе анализа архитектуры ПЛИС можно исключить из рассмотрения большое количество данных, которые могут содержаться в загружаемом потоке. Таким образом, любая прошивка ПЛИС может быть сжата с помощью исключения набора нулей и префиксного кодирования. Эта возможность обусловлена n -ым количеством запрещенных состояний в любой прошивке. Эффективность сжатия обеспечивает качество анализа случайных зашивок конкретной архитектуры ПЛИС.

Литература

1. Шалтырев В.А., Шалтырев К.А., Шагури И.И. Динамическая реконфигурация ПЛИС с использованием сжатых битовых потоков // Изв. вузов. Электроника. – 2009. – №2(76). – С. 43–50.
2. Hemnath P., Prabhu V. Compression of FPGA bitstreams using improved RLE algorithm // 2013 Intern. Conf. on Information Communication and Embedded Systems (ICICES). IEEE. – 2013. – P. 834–839.

3. **Hauck S., Wilson W.D.** Runlength compression techniques for FPGA configurations // In Proc. IEEE Symp. Field Program. Custom Comput. Mach. IEEE. – 1999. – P. 286–287.
4. **Dandalis A., Prasanna V.K.** Configuration compression for FPGA-based embedded systems // IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst. – 2005. – Vol. 13. – Iss. 12. – P. 1394–1398.
5. **Rui Yu, Yibin Li.** Compression of FPGA bitstreams using a novel bitmask and RLE algorithm // International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking. – 2015. – Vol. 3. – Iss. 4. – P. 17–22.
6. **Марков А.А.** Введение в теорию кодирования. – М.: Наука, 1982. – 192 с.
7. **Левитин А.В.** Жадные методы: алгоритм Хаффмана // Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. – М.: Вильямс, 2006. – Гл. 9. – С. 392–398.
8. **Choueka Y., Fraenkel A., Klein S., Segal E.** Improved hierarchical bit-vector compression in document retrieval systems // Proc. of ACM Conf. on Research and Development in Information Retrieval. – 1986. – P. 88–96.

Поступила в редакцию 17.06.2019 г.; после доработки 27.06.2019 г.; принята к публикации 24.09.2019 г.

Кузьминов Игорь Васильевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-конструктор АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный пр., 12/1), ikuzminov@niime.ru

Лосев Владимир Вячеславович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dsd@miee.ru

Новожиллов Иван Сергеевич – магистр кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-конструктор АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный пр., 12/1), inovozhilov@niime.ru

Чаплыгин Юрий Александрович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, президент, заведующий кафедрой интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ar@miee.ru

References

1. Shaltyrev V.A., Shaltyrev K.A., Shagurin I.I. Dynamic reconfiguration of FPGA using compressed bitstreams. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2009, no. 2(76), pp. 43–50. (in Russian).
2. Hemnath P., Prabhu V. Compression of FPGA bitstreams using improved RLE algorithm. *2013 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES). IEEE*, 2013, pp. 834–839.
3. Hauck S., Wilson W.D. Runlength compression techniques for FPGA configurations. *In Proc. IEEE Symp. Field Program. Custom Comput. Mach. IEEE*, 1999, pp. 286–287.
4. Dandalis A., Prasanna V.K. Configuration compression for FPGA-based embedded systems. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst.*, 2005, vol.13, iss.12, pp. 1394–1398.
5. Rui Yu, Yibin Li. Compression Of FPGA Bitstreams Using A Novel Bitmask And RLE Algorithm. *International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking*, 2015, vol.3, iss.4, pp. 17–22.
6. Markov A.A. *Introduction to coding theory*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 192 p. (in Russian).
7. Levitin A.V. *Huffman Coding. Greedy Method*. Algorithms. Introduction to development and analysis. Moscow, Vil'yams Publ., 2006, pp. 392–398. (in Russian).
8. Choueka Y., Fraenkel A., Klein S., Segal E. Improved hierarchical bit-vector compression in document retrieval systems. *Proc. of ACM Conf. on Research and Development in Information Retrieval*, 1986, pp. 88–96.

Received 17.06.2019; Revised 27.06.2019; Accepted 24.09.2019.

Information about of authors:

Igor V. Kuzminov – PhD Student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq. 1), Engineer of JSC Molecular Electronics Research Institute (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, 1-st Western Passage, 12/1), ikuzminov@niime.ru

Vladimir V. Losev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dsd@miee.ru.

Ivan S. Novozhilov – Master’s Degree Student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of JSC Molecular Electronics Research Institute (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, 1-st Western Passage, 12/1), inovozhilov@niime.ru

Yury A. Chaplygin – Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., President, Head of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1) ar@miee.ru

**Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- по каталогу «Газеты, журналы» АО Агентство «Роспечать» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 47570
- по прямой подписке в АО Агентство «Роспечать»: www.press.rosp.ru
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934
- через редакцию - с любого номера и до конца года

**Подписку на электронную версию журнала
можно оформить на сайтах:**

- Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»: www.rucont.ru; www.akc.ru;
www.pressa-rf.ru
- ООО «УП Урал-Пресс»: www.delpress.ru
- ООО «ИВИС»: www.ivis.ru

**Исследование стойкости МЭМС-акселерометров
емкостного типа к внешним механическим воздействиям**

Аунг Тхура, Б.М. Симонов, Ан.С. Тимошенко

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

serborsel@mail.ru

Надежная эксплуатация механических датчиков угловой скорости и линейного ускорения возможна при обеспечении их устойчивого функционирования под воздействием внешних факторов. В работе на вибростенде LDS V455 исследованы механические воздействия широкополосной (синусоидальной) вибрации и ударов на экспериментальные образцы микромеханических акселерометров. Полученные амплитудно-частотные характеристики экспериментальных образцов использованы для оценки их качества, которое выражается в линейности в достаточно широком частотном диапазоне и отсутствии резонансных пиков. С помощью вибростенда заданы интенсивность и продолжительность удара. Результаты экспериментов показали, что ударная нагрузка обрабатывается неодинаково для образцов механических акселерометров, рассчитанных на разные диапазоны значений измеряемого ускорения. Выяснено, что выходной сигнал у образцов в диапазоне измерений ускорения $\pm 1,2$ g ограничен сверху, у образцов в диапазоне до ± 5 g сигнал не входит в заданный профиль. Установлено, что образцы ПЛУ 5-17 хорошо обрабатывают профиль удара. Показано, что допустимая ударная нагрузка на образцы механических акселерометров должна подбираться с учетом откликов, т.е. выходных сигналов при ударном воздействии.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр емкостного типа; синусоидальная вибрация; амплитудно-частотная характеристика; ударные импульсы; профиль удара

Для цитирования: Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенко Ан.С. Исследование стойкости МЭМС-акселерометров емкостного типа к внешним механическим воздействиям // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 619–626. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-619-626

Study on Resistance of Samples of Capacitive Type Micromechanical Accelerometers to Mechanical Stress

Aung Thura, B.M. Simonov, An.S. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

serborsel@mail.ru

Abstract: Reliable operation of mechanical sensors of the angular velocity and linear acceleration in modern conditions is possible only when their stable operation under effect of the external factors has been provided. The mechanical effects-broadband (sinusoidal) vibration and the shock on the experimental samples of micromechanical accelerometers (MMA) on the vibration stand LDS V455 have been studied. The obtained amplitude-frequency characteristics (AFC) of the experimental samples can be used to characterize their quality. The high quality, has been reflected in the linearity of the frequency response in a fairly wide frequency range and in absence the resonant peaks. To achieve this, it is necessary to work out the technology of manufacturing samples. The areas of application of the MMA samples can be selected according to the AFC type obtained for them. The shock pulses can be approximated by a series of semi-sinusoidal pulses with the duration equal to half the period of the sine function. With the help of a vibrating table the intensity and duration of the impact have been set. The results of the experiments have shown that the shock load is worked out differently for MMA samples, calculated for different ranges of the measured acceleration values. From the data obtained it can be seen that the output signal of the MMA samples to acceleration measurement range ± 1.2 is limited from above, the output signal of the MMA samples in the range up to ± 5 g is not included into a specified profile. It has been determined that MMA PLU 5-17 samples fulfill well the impact profile. The selection of permissible impact loads on the MMA samples should be made based on the feedback, i.e. the output signal on the impact.

Keywords: micromechanical accelerometer of capacitive type; sinusoidal vibration; amplitude-frequency characteristic; shock pulses; impact profile

For citation: Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov An.S. Study on resistance of samples of capacitive type micromechanical accelerometers to mechanical stress. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 619–626. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-6-619-626

Введение. При использовании МЭМС-датчиков в транспортных средствах, авиационной и космической технике, а также для реализации других целей необходимо учитывать влияние на них внешних факторов. В результате, например, вибрации, механических и температурных воздействий в датчиках могут возникать динамические деформации, напряжения и прочие нежелательные (неучтенные) изменения [1]. Поэтому для обеспечения надежной работы и стабильности параметров МЭМС-датчиков уже на этапе проектирования структуры чувствительного элемента, а также на последующих этапах жизненного цикла изделий [2] необходимо контролировать влияние разных типов воздействий.

Цель настоящей работы – исследование стойкости экспериментальных образцов микромеханических акселерометров (ММА) емкостного типа, предназначенных для

измерения ускорения в разных диапазонах его значений, к механическим воздействиям, а именно к широкополосной (синусоидальной) вибрации и ударам.

Образцы и методы их исследования. Образцы для измерения ускорений отличаются друг от друга в первую очередь жесткостью торсионов, используемых в их конструкциях, которая зависит от их толщины. Кроме того, применяются разные типы корпусов, где используются разные электронные схемы обработки сигналов. Образцы условно разбиты на группы: образец №1 (801МСУ1Л-1,2-А-1) – для измерения в диапазоне значений ускорения до 1,2 g (рис.1,*а*); образец № 2 (801МСУ1Л-5-А-1) и образец №4 (ПЛУ 5-17) – до 5 g (рис.1,*б,з*); образец №3 (201МСУ1Л50А) – до 50 g (рис.1,*в*). В каждой группе исследовано не менее пяти образцов.

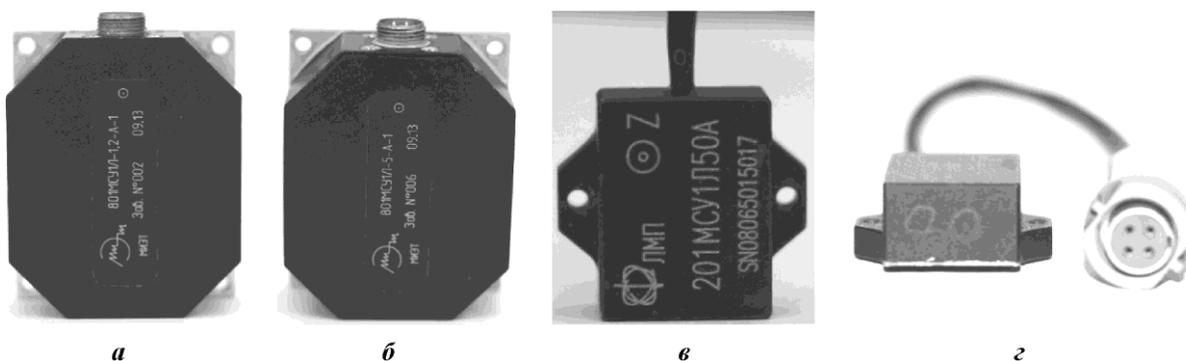


Рис.1. Экспериментальные образцы ММА с разным диапазоном измерения ускорений: *а* – образец №1 (до 1,2 g); *б* – образец №2 (до 5 g); *в* – образец №3 (до 50 g); *з* – образец №4 (до 5 g)

Fig.1. Experimental samples of MMA for research with a different measurement range of accelerations: *a* – sample №1 (up to 1,2 g); *b* – sample №2 (up to 5 g); *c* – sample №3 (up to 50 g); *d* – sample №4 (up to 5 g)

Воздействие на образцы синусоидальных вибраций проводится из окружающей среды. Подобные вибрации могут иметь различные частоты [3]. Механические удары, воздействующие на образцы, характеризуются стремительным, быстро растущим во времени ускорением. Удары обычно описываются пиковым ускорением. Механические удары относятся к наиболее характерным видам внешних воздействий в реальных условиях эксплуатации приборов. При ударах происходит непериодическое возбуждение механической системы, которое характеризуется интенсивностью, частотой, жесткостью нагрузки и способно вызывать значительные смещения элементов конструкции приборов и систем относительно друг друга [4]. Как реакция на удар возможны следующие ситуации. Из-за превышения предела текучести материала при интенсивном ударе происходит перелом. Повреждения могут привести, в частности, к так называемой стимуляции из-за контакта деталей при ударе [4, 5]. При отсутствии удара детали, например гребенки актюатора, работают, не касаясь друг друга, а при стимуляции может произойти их замыкание и потеря работоспособности актюатора. Расслаивание может происходить, например, из-за отказа крепления между слоями, короткое замыкание – из-за контакта деталей с различными потенциалами, например зубцов гребенчатых электродов актюатора.

Для измерений характеристик образцов ММА на вибростенде LDS V455 при механических ударах используется программно-аппаратный комплекс [6]. На шейкере есть место для установки тестируемых образцов акселерометров. С компьютера управляющий сигнал подается к шейкеру через усилитель мощности LDS-PA1000L. Обратная связь между управляющим блоком и вибростендом обеспечивает контроль параметров движения шейкера.

Исследование выходных характеристик образцов ММА при синусоидальной вибрации. ММА характеризуются рядом параметров, в том числе чувствительностью, линейностью, полосой пропускания, рабочим диапазоном температуры и др. [7–10]. Исследованы амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) образцов ММА. Испытания с измерением АЧХ позволяют определить отклонения чувствительности и фазовый сдвиг в зависимости от рабочей частоты [11, 12]. На вибростенде задавались параметры воздействий: диапазон рабочих частот 12–2 500 Гц; амплитуда ускорения (в единицах g). На рис.2,*а* показана АЧХ ММА при вибрационном воздействии ускорения ±1,2 g в рабочем диапазоне частот 12–2 500 Гц (образец №1). Видно, что характеристика линейна до 500 Гц. При возрастании частоты появляется резонансный пик на частоте 1 300 Гц, что, скорее всего, вызвано недостаточным демпфированием чувствительного элемента ММА.

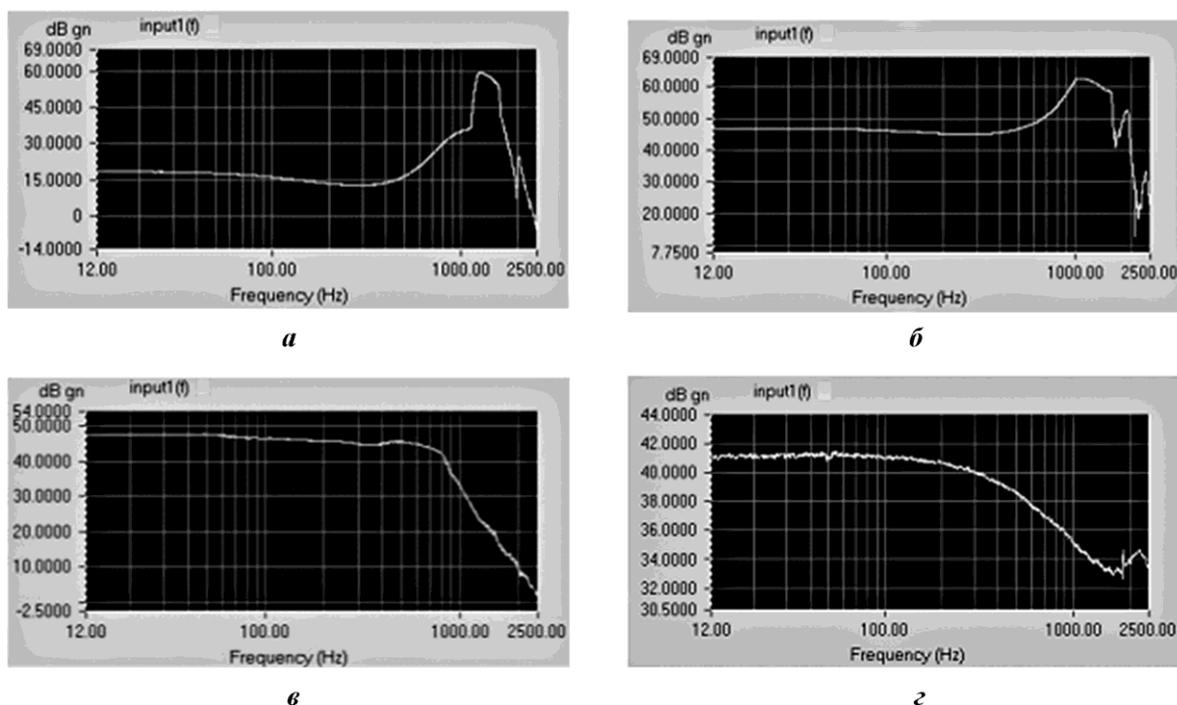


Рис.2. АЧХ образцов ММА при разном вибрационном воздействии ускорения: *а* – образец №1 (±1,2 g); *б* – образец №2 (±5 g); *в* – образец №4 (±5 g); *г* – образец №3 (±50 g)

Fig.2. The amplitude-frequency characteristics of samples of MMA under a different vibration acceleration: *a* – sample №1 (±1,2 g); *b* – sample №2 (±5 g); *c* – sample №4 (±5 g); *d* – sample №3 (±50 g)

Амплитуда выходного сигнала (рис.2) определяется по формуле

$$A = 20 \log(V_2 / V_1),$$

где A – амплитуда, дБ; V_1 – выходное напряжение при постоянном ускорении 1,2 g на частоте $f = 0$ (для образца №1); V_2 – входное напряжение при постоянном ускорении 1,2 g на частоте f .

На рис.2,*б* показана АЧХ ММА при вибрационном воздействии ускорения ±5 g (образец №2). Видно, что характеристика линейна до частоты вибрации 600 Гц. Затем с повышением частоты появляется резонансный пик на частоте 1 300 Гц, что, скорее всего, так же вызвано недостаточным демпфированием чувствительного элемента ММА. Образцы №1 и №2, исследованные при вибрационном воздействии ускорения ±1,2 и ±5 g, имеют одинаковые резонансные частоты. АЧХ образцов №1 и №2 получены для диапазона частот 12–2 500 Гц и характеризуются линейностью до частоты 500–550 Гц.

Далее наблюдается максимум АЧХ в области резонанса, который для образца №1 имеет место при частоте 1 300 Гц, а для образца №2 – при частоте 1 000 Гц. При повышении частоты выше резонансной появляются паразитные резонансные частоты (при 2 000 Гц для образца №1, при 1 900 и 2 400 Гц для образца №2).

На рис.2,в показана АЧХ ММА при вибрационном воздействии ускорения $\pm 5g$ (образец №4). АЧХ имеет широкую полосу рабочих частот (по сравнению с другими образцами), линейность до 760 Гц. АЧХ отличается отсутствием паразитных пиков, которые имеют место у образцов №1 и №2 акселерометров (см. рис.2,а,б).

На рис.2,г показана АЧХ ММА при вибрационном воздействии ускорения $\pm 5g$ (образец №3). АЧХ имеет достаточно широкую полосу рабочих частот, линейную до 550 Гц.

АЧХ образцов №3 и №4 в диапазоне частот 12–2 500 Гц имеют линейность в более широком диапазоне частот (до 650–700 Гц у образца №4, до 750–800 Гц у образца №3). Затем наблюдается спад АЧХ, резонанс отсутствует.

Таким образом, влияние синусоидальной вибрации на АЧХ четырех образцов ММА заметно отличается в зависимости от вибрационного ускорения. Это позволяет сделать выводы о возможных областях применения образцов. Полученные АЧХ ММА могут использоваться для характеристики их качества. Например, АЧХ образцов №1 и №2 свидетельствуют об их недостаточно высоком качестве. Это отражается в линейности АЧХ только в ограниченном частотном диапазоне и наличии нескольких резонансных частот, что может быть связано с недостаточно отработанной технологией изготовления данных образцов. В частности, внутрикорпусное давление ($\sim 10^{-1} - 10^{-2}$ мм рт. ст.) оказывает значительное влияние на колебательный процесс чувствительного элемента внутри корпуса, поскольку на движение чувствительного элемента влияет газовое демпфирование, в большой мере определяемое внутрикорпусным давлением. Улучшения АЧХ можно добиться стабилизацией внутрикорпусного давления при отработке режима герметизации корпусов. Отметим, что для выяснения причин снижения качества образцов требуется анализ их внутренней структуры и методов корпусирования, что может быть самостоятельной задачей. АЧХ образцов №3 и №4 свидетельствуют об их высоком качестве.

Исследование выходных сигналов образцов ММА при динамическом ударе.

Ударное, или шокное, воздействие на приборы (датчики) описывается кривой ускорения во времени, которая для реальных ситуаций, как правило, имеет сложную форму. Согласно [4] ударные импульсы могут быть аппроксимированы полусинусоидальными импульсами с длительностью, равной половине периода функции синуса. Пик ускорения выражается как a -пик, а длительность τ импульса считается при ударе (рис.3). Как правило, чем выше амплитуда пикового ускорения, тем короче его продолжительность. Выходные сигналы образцов ММА рассмотрены при воздействии удара полусинусоидальной формы, что соответствует работе [13]. Испытание на устойчивость к воздействию одиночных ударов (испытание 106 согласно ГОСТу) проводится с целью проверки изделий на противостояние разрушающему влиянию механических ударов одиночного действия и выполнение после этого своих функций. Искажение выходного сигнала или изменение его значения входит в число ре-

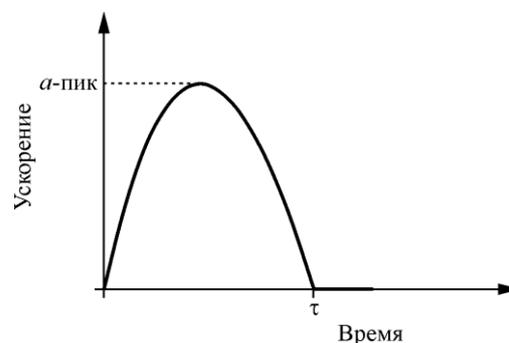


Рис.3. Ударная модель с использованием приближения полусинусоидальной формы
Fig.3. Shock model using the approximation of half-sine shape

комендуемых параметров, по которым можно судить об устойчивости к воздействию одиночных ударов изделий в целом [13].

Проведены эксперименты по исследованию воздействия удара на датчики ММА по основной оси чувствительности. С помощью вибростенда LDS V455 задавались интенсивность и продолжительность удара. Для образцов ММА, рассчитанных на диапазон измеряемых ускорений до ± 1 g, ± 5 g, ± 20 g и более ± 20 g, амплитуда вибраций (воздействующие ускорения при ударе) равны соответственно 0,5 g, 1 g, 2 g и 3 g.

На рис.4 представлены выходные сигналы образцов ММА при воздействии на них удара по оси чувствительности Z. На рис.4,а показан выходной сигнал ММА при ударе с амплитудой $\pm 0,5$ g (образец №1). Видно, что выходной сигнал не входит в профиль эталонного сигнала и ограничен по амплитуде. На рис.4,б приведен выходной сигнал ММА при ударе ± 1 g (образец №2). Датчик в целом обрабатывает эталонный профиль удара и послеударную область, но имеет некоторые незначительные погрешности, а именно минимальное демпфирование на резонансной частоте. На рис.4,в показан выходной сигнал ММА при ударе с амплитудой ± 1 g (образец №4). Выходной сигнал полностью входит в заданный эталонный профиль. Образец хорошо обрабатывает профиль удара и послеударное время. На рис.4,г представлен выходной сигнал ММА при ударе с амплитудой ± 3 g (образец №3). Выходной сигнал не входит в профиль,

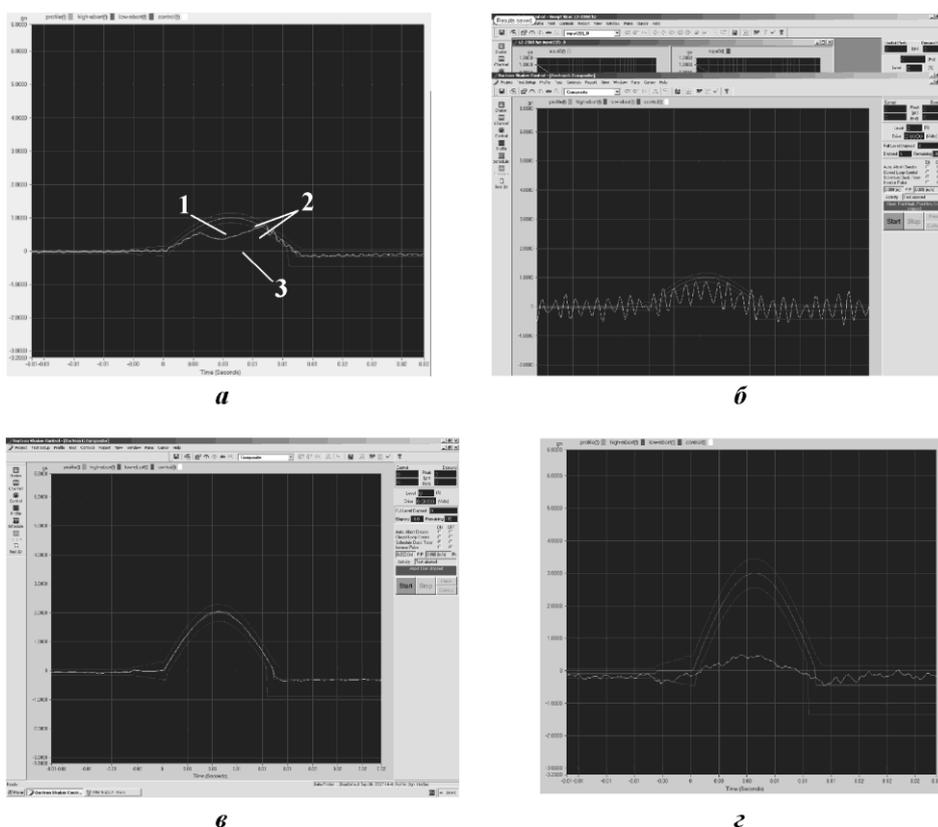


Рис.4. Выходные сигналы образцов ММА при ударе с разной амплитудой: а – образец №1 ($\pm 0,5$ g); б – образец №2 (± 1 g); в – образец №4 (± 1 g); г – образец №3 (± 3 g) (1 – выходной сигнал образца ММА; 2 – границы воздействующего сигнала; 3 – эталонный сигнал, создаваемый вибростендом и воздействующий на испытуемый датчик)

Fig.4. Output signals of the MMA samples during the kick with a different amplitude: а – sample №1 ($\pm 0,5$ g); б – sample №2 (± 1 g); в – sample №4 (± 1 g); г – sample №3 (± 3 g) (1 – the output signal of the MMA sample; 2 – the boundaries of the acting signal; 3 – the reference signal generated by the vibrostand and acting on the test sensor)

отклонения от него значительны. Возможная причина отклонения от эталонного профиля в том, что вибростенд, использованный в эксперименте, не может обеспечить заданный профиль удара, так как образец предназначен для использования в большом диапазоне значений воздействующего ускорения (50 g).

Заключение. Наличие резонансных пиков, линейность АХЧ в ограниченном частотном диапазоне свидетельствуют о недостаточной отработанности технологии изготовления (несовершенстве конструкции) образцов ММА. Для выяснения причин снижения качества образцов требуется анализ внутренней структуры образцов и методов их корпусирования. Области применения образцов ММА могут быть выбраны в соответствии с видом полученных для них АХЧ. Образцы ММА 801МСУ1Л-1,2-А-1 и 801МСУ1Л-5-А-1 могут применяться при измерениях параметров и характеристик процессов землетрясений (частота которых находится между 1 и 35 Гц), на кораблях (частота обычно составляет от 3 до 30 Гц) и в дорожно-транспортных средствах (частота 1 и 500 Гц). Образцы ММА ПЛУ 5-17 и 201МСУ1Л50А можно использовать не только при измерениях параметров движения и характеристик землетрясений, но и в кораблестроении, автомобилестроении, а также в авиации и космических аппаратах.

Подбор допустимой ударной нагрузки на образцы ММА должен осуществляться с учетом откликов, т.е. выходных сигналов на ударное воздействие. В проведенном эксперименте приемлемый отклик получен для образцов ММА, рассчитанных на диапазон измерения до ± 5 g. Следовательно, ударное воздействие с амплитудой вибрации, не превышающей 1 g, является допустимым.

Литература

1. *Вавилов В.Д., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С.* Микросистемные датчики физических величин: монография. В 2 ч. Ч.1. – М.: Техносфера, 2018. – 550 с.
2. *Тимошенко С.П., Симонов Б.М., Горошко В.Н.* Надежность технических систем и техногенный риск. – М.: Юрайт, 2017. – 502 с.
3. *Christian L.* Sinusoidal vibration. – Second Ed. – Wiley book. – 2009. – Vol. 1. – 410 p.
4. *Allyson L.H., Mark G.S., Herbert R.S.* MEMS reliability. – Springer MEMS Reference Shelf, 2010. – 306 p.
5. *Patrick L.W.* Selecting accelerometers for mechanical shock measurements // Journal for Sound and Vibration. – 2007. – P. 14–18.
6. *Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенко С.П.* Исследование воздействия случайной вибрации на характеристики микромеханических акселерометров // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 511–520.
7. Оценка работоспособности чувствительного элемента преобразователя линейных ускорений и расчет основных параметров / *В.В. Калугин, С.А. Анчутин, Е.С. Кочурина и др.* // Приборы. Приборы и средства автоматизации. – 2018. – №9 (219). – С. 1–5.
8. Особенности конструкции и технологии изготовления чувствительного элемента микроакселерометра / *С.П. Тимошенко, В.В. Калугин, С.А. Анчутин и др.* // Сб. тез. Междунар. форума «Микроэлектроника-2018» 4-й Междунар. науч. конф. «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули» (Алушта, 01–06 окт. 2018 г.). – М.: Техносфера, 2018. – С. 425–426.
9. *Timoshenkov S., Kalugin V., Anchutin S., Kochurina E.* Simulation of the sensitive elements of the micro-accelerometer with the software product ANSYS // Proc. of International Conference «Micro- and Nanoelectronics – 2018». (Zvenigorod, 1–5 Oct., 2018). – М.: MAKS Press, 2018. – 95 p.
10. *Keya Sanyal, Kalyan Biswas.* Structural design and optimization of MEMS based capacitive accelerometer // Devices for Integrated Circuit. IEEE. – 2017. – March.
11. *Челтанов И.Б., Евстифеев М.И., Кочетков А.В.* Методы испытаний микромеханических датчиков и приборов // Приборы. – 2014. – № 4(166). – P. 16–20.
12. *Ефремов А.К.* Об эквивалентности испытаний на воздействие случайной вибрации // Вестник МГТУ им. Баумана. – 2012. – №2 (27). – P. 22–38.
13. ГОСТ Р 51371-99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. – М., 1999.

Поступила в редакцию 28.03.2019 г.; после доработки 02.07.2019 г.; принята к публикации 24.09.2019 г.

Аунг Тхура – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aungthura87@gmail.com

Симонов Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), serborsel@mail.ru

Тимошенко Андрей Сергеевич – инженер Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), alfaromeo155@mail.com

References

1. Vavilov V.D., Timoshenkov S.P., Timoshenkov A.S. *Microsystem sensors of physical quantities: Monograph in two parts*. Moscow, Technosphaera Publ., 2018. P. 1. 550 p. (in Russian).
2. Timoshenkov S.P., Simonov B.M., Goroshko V.N. *Reliability of technical systems and man-made risk*. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 502 p. (in Russian).
3. Christian L. *Sinusoidal vibration*. Second ed. Wiley book, 2009, vol. 1. 410 p.
4. Allyson L.H., Mark G.S., Herbert R.S. *MEMS reliability*. Springer MEMS Reference Shelf, 2010. 306 p.
5. Patrick L.W. Selecting accelerometers for mechanical shock measurements. *Journal for Sound and Vibration*, 2007, pp. 14–18.
6. Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov S.P. Research of influence of random vibrations on MEMS samples. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 511–520. (In Russian).
7. Kalugin V.V., Anchutin S.A., Kochurina E.S., Golovin M.S., Shalimov A.S. Performance evaluation of a sensitive element of the Converter of linear acceleration and the calculation of the basic parameters. *Devices and means of automation*, 2018, vol. 219, no. 9, pp.1–5. (in Russian).
8. Timoshenkov S.P., Kalugin V.V., Zaryankin N.M. Kochurina E.S. Design features and manufacturing technology of sensitive element of microaccelerometer. *4th International scientific conference «Electronic component base and microelectronic modules»*. Moscow, Technosphaera Publ., 2018, pp. 425–426. (in Russian).
9. Timoshenkov S., Kaluga V., Anchutin S., Kochurina E. Simulation of the sensitive elements of the micro-accelerometer with the software product ANSYS. *Proceedings of International Conference «Micro- and Nanoelectronics – 2018»*. Moscow, MAKS Press Publ., 2018, 95 p.
10. Keya Sanyal, Kalyan Biswas. Structural design and Optimization of MEMS based Capacitive Accelerometer. *IEEE. Devices for Integrated Circuit*, March, 2017.
11. Chelpanov I.B., Evstifeev M.I., Kochetkov A.V. Test methods of micromechanical sensors and devices. *Devices*, 2014, no. 4(166), pp.16–20. (in Russian).
12. Efremov A.K. On the equivalence of tests for the effect of random vibration. *Vestnik MGTU im. Baumana = Herald of the Bauman Moscow State Technical University*, 2012, no. 2 (27), pp. 22–38. (in Russian).
13. *State standard R 51371-99. Test Methods for resistance to mechanical external factors of machines, devices and other technical products*. Moscow, 1999. (in Russian).

Received 28.03.2019; Revised 02.07.2019; Accepted 24.09.2019.

Information about of authors:

Aung Thura – PhD Student of the Institute of Nano-and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aungthura87@gmail.com

Boris M. Simonov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano-and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), serborsel@mail.ru

Andrey S. Timoshenkov – Engineer of the Institute Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alfaromeo155@mail.com

ОТ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Общим собранием членов Российской академии наук 14–15 ноября 2019 г. академиком Российской академии наук по Отделению нанотехнологий и информационных технологий избран

Горбачевич Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории квантового дизайна молекулярных и твердотельных наноструктур Отделения физики твердого тела Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, заведующий кафедрой квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Сердечно поздравляем нашего коллегу с высоким званием! Желаем дальнейших успехов на благо Российской науки!

Редколлегия

ЮБИЛЕИ

Гаврилову Сергею Витальевичу – 60 лет



16 декабря 2019 г. исполнилось 60 лет Сергею Витальевичу Гаврилову, доктору технических наук, профессору, лауреату Премии Правительства Российской Федерации 2015 г. в области науки и техники, директору Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН).

В 1983 г. С.В. Гаврилов окончил Московский физико-технический институт, факультет управления и прикладной математики. В 1997 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 2007 г. – докторскую. С 1994 г. по настоящее время работает в ИППМ РАН. С июля 2019 г. С.В. Гаврилов – директор ИППМ РАН.

Сергей Витальевич Гаврилов – ведущий специалист в области систем автоматизации проектирования, моделирования и оптимизации интегральных схем. Непосредственно им и под его руководством разработаны основы теории логических корреляций для решения задач повышения качества и снижения чувст-

вительности микросхем к сбоям и помехам; разработаны методы логико-временного анализа микросхем, сочетающие в себе традиционно разделяемые аспекты и уровни проектирования; создан математический аппарат и программные средства ускоренной характеристики библиотек элементов и сложно-функциональных блоков СБИС.

С 2009 г. С.В. Гаврилов совмещает работу в ИППМ РАН с научно-образовательной деятельностью в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» в должности профессора на кафедре проектирования и конструирования интегральных микросхем, с сентября 2018 г. исполняет обязанности заведующего этой кафедрой.

С.В. Гаврилов имеет свыше 160 публикаций, из них 2 монографии, 8 авторских свидетельств и патентов. Под его руководством подготовлено 6 кандидатов наук.

С.В. Гаврилов – член Экспертного совета ВАК по управлению, вычислительной технике и информатике (с 2014 по 2019 г.), заместитель председателя Оргкомитета Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем».

Сергей Витальевич Гаврилов – ученый, получивший международное признание в области моделирования и оптимизации микроэлектронных СБИС. Неоднократно выступал с докладами на международных конференциях International Conference on Computer Aided Design (ICCAD) (США), Design Automation and Test in Europe (DATE) (Германия, Франция), International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED) (США), а также проводил лекции и семинары по приглашению таких ведущих мировых микроэлектронных компаний, как Motorola Inc., Freescale Semiconductor Inc., Intel Corp.

Поздравляем Сергея Витальевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и активной творческой деятельности!

Редколлегия

КОНФЕРЕНЦИИ

Об итогах 2-й Международной конференции «Микроэлектронные приборы и технологии» (MicDAT' 2019) 22–24 мая 2019 г., г. Амстердам, Голландия

С 22 по 24 мая 2019 г. в Амстердаме прошла ежегодная 2-я Международная конференция «Микроэлектронные приборы и технологии» (Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT'2019)). В 2018 г. в Барселоне (Испания) состоялась первая конференция MicDAT'2018, которая привлекла широкое внимание научного микроэлектронного сообщества.

MicDAT органично дополняет крупные конференции, организаторами и участниками которых в основном являются компании, технические университеты и научные лаборатории – лидеры в области микроэлектроники. Конференция предоставляет свою трибуну также ученым и специалистам из стран со средним уровнем развития микроэлектронных технологий, работы которых соответствуют мировому уровню. В состав Программного комитета MicDAT входят известные ученые в области микро- и нанoeлектроники.

Учредителем и организатором конференции традиционно выступила Международная ассоциация IFSA (International Frequency Sensor Association), которая является связующим звеном между промышленностью и высшими учебными заведениями в течение последних 20 лет. Среди членов Ассоциации – ведущие производители микросхем и САПР «Analog Devices», «Ams», «Balluff», «Cadence», «Mentor», «Texas Instruments» и др. Официальные партнеры конференции – компании «Excelega» (Испания) и

«F2D» (Ирландия), специализирующиеся в области производства высокоточных интегральных преобразователей частотно-временных параметров электрических сигналов в код и их применения в измерительных системах и цифровых интегральных датчиках, а также издательство «IFSA Publishing» (Испания) и журнал «Sensors» MDPI (Швейцария).

На церемонии открытия вступительное слово произнес президент Ассоциации IFSA С.Ю. Юриш (Испания). В пленарном докладе «Новые АЦП высокого разрешения на базе преобразователей напряжение – частота» С.Ю. Юриш рассмотрел проблемы построения АЦП на нанометровых аналоговых компонентах с проектной нормой от 90 нм и ниже.

В рамках работы секций участники конференции обсудили проблемы развития микроэлектроники. Представлены результаты исследований специалистов из 12 стран: Алжира, Великобритании, Германии, Испании, Китая, Польши, России, Словакии, Тайваня, Франции, Южной Кореи и Японии.

Программа конференции в полной мере отражает современное состояние микро- и нанoeлектроники. В частности, в докладе Дж. Хе и др. (Шеньженьский университет, Китай, Гонконг) приведена базовая технология 3-мерных интегральных схем на основе стека FinFET-CMOS; в докладе К.О. Петросянца и Д.А. Попова (МИЭМ НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия) проанализирован эффект саморазогрева

в глубоко субмикронных структурах SOI MOSFET; в докладе Я. Омура (Технический университет, г. Кансай, Япония) предложена конструкция оптического ротора на основе стержневидного кремниевое $p-n$ -перехода для МЭМС; в докладе Дж. Би и др. (Институт микроэлектроники Академии наук Китая) рассмотрено влияние радиации на SONOS-структуры флеш-памяти с плавающим затвором; в работе Фр. Фельдхофа и др. (Университет г. Ильменау, Германия) предложен искусственный нейрон на основе сверхпроводящих элементов. Обсуждались также возможности международного сотрудничества в рамках совместных проектов и международных программ.

Во время работы конференции аспиранты и ученые имели возможность ознакомиться с продукцией издательства «IFSA Publishing» и компаний «Excelera» и «F2D».

К началу работы конференции издан сборник докладов. Запланирован тематический выпуск журнала «Sensors & Transducers» с расширенными версиями лучших докладов, представленных на конференции. Авторы, рекомендованные Оргкомитетом, представят свои статьи для публикации в виде глав в 3-м томе популярной серии книг «Advances in Microelectronics: Reviews», который будет издан «IFSA Publishing» в 2020 г.

Конференция MicDAT'2020 состоится 17–19 июня 2020 г. на о. Тенерифе (Канарские острова, Испания). Крайний срок подачи тезисов докладов – 15 марта 2020 г.

Информация о конференции доступна на веб-сайте: <http://www.micdat-conference.com/>

*С. Ю. Юриш,
канд.т.н. председатель Оргкомитета,
президент IFSA*

*К.О. Петросяни,
д.т.н., проф. МИЭМ НИУ ВШЭ,
член Оргкомитета*

Тематический указатель статей, опубликованных в 2019 году

Фундаментальные исследования

Горбацевич А.А., Журавлёв М.Н. Электронные свойства ветвящихся молекулярных структур. Обзор. Т. 24, № 5, с. 439–458.

Мальшев И.В., Филь К.А., Гончарова О.А. Определение компонент объемной проводимости полупроводников типа $A^{III}B^V$ в сильных постоянных электрических полях и при гармоническом воздействии. Т. 24, № 1, с. 7–15.

Сибатов Р.Т., Морозова Е.В., Костишко Б.М., Светухин В.В., Кицюк Е.П., Павлов А.А. Модель аномальной диффузии для описания импеданса литий-ионного аккумулятора. Т. 24, № 4, с. 331–341.

Материалы электроники

Белогорохов И.А., Белогорохова Л.И. Исследование композиционных материалов на основе полистирола и сахарозы методом ИК-спектроскопии Т. 24, № 1, с. 16–21.

Вигдорович Е.Н. Формирование низкоомных слоев p -типа в гетероструктурах $Ga_{1-x}Al_xN/GaN$. Т. 24, № 2, с. 118–128.

Гаджиев Т.М., Алиев М.А., Асваров А.Ш., Гаджиева Р.М., Бидалов Б.А., Исмаилов А.М., Шомахов З.В. Зависимость морфологии поверхности и структуры пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ от температуры селенизации. Т. 24, № 2, с. 107–117.

Неустроев С.А., Неустроев Н.С. Образование ковалентных связей между центральными атомами базовых плоскостей сопряженных призм кубического углерода под воздействием внешнего давления. Т. 24, № 4, с. 342–349.

Тихонов Р.Д., Поломошнов С.А., Костюк Д.В. Спектрофотометрический контроль хлоридного электролита для электрохимического осаждения пермаллоя. Т. 24, № 2, с. 129–136.

Технологические процессы и маршруты

Белов А.Н., Голишников А.А., Костюков Д.А., Шевяков В.И. Металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе сплава вольфрама с титаном. Т. 24, № 1, с. 22–29.

Громов Д.Г., Дубков С.В., Ерицян Г.С., Савицкий А.И., Быков В.А., Бобров Ю.А. Термическая стабилизация геометрических параметров массива наночастиц серебра, полученного вакуум-термическим испарением на ненагретую подложку. Т. 24, № 6, с. 557–564.

Евдокимова Н.Л., Долгов В.В., Иванов К.А. Определение теплового сопротивления кристалл – корпус полупроводникового прибора из его кривой охлаждения. Т. 24, № 1, с. 30–41.

Каракеян В.И., Рябышенков А.С., Гундарцев М.А. Эксергетический анализ системы воздухообмена в чистых помещениях. Т. 24, № 6, с. 573–580.

Любимов А.В., Борисов А.Г., Корчагин Е.П., Козлитин А.И., Осипенкова Н.Г. Исследование процесса электроосаждения сплава олово – свинец с высоким содержанием свинца. Т. 24, № 5, с. 459–468.

Печерская Е.А., Голубков П.Е., Карпанин О.В., Артамонов Д.В., Сафронов М.И., Печерский А.В. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий. Т. 24, № 4, с. 363–369.

Поголов А.И., Титов А.Ю., Тимошенко С.П. Термомеханическая прочность соединений элементов в микроэлектронных модулях. Т. 24, № 6, с. 565–572.

- Полунина А.А., Петров В.С., Ханбеков И.Ф., Ли И.П., Гайдар А.И., Локтев Д.Н.* Термическое активирование геттеров в технологии производства магнетронов. Т. 24, № 4, с. 370–382.
- Рудаков Г.А., Парамонов В.В.* Применение метода комплексного планирования эксперимента для оптимизации процесса глубокого анизотропного плазменного травления кремния. Т. 24, № 4, с. 350–362.
- Сивченко А.С., Кузнецов Е.В., Сауров А.Н.* Определение времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика суб-100-нм МОП-транзисторов с помощью ускоренных испытаний. Т. 24, № 5, с. 469–478.
- Тихонов Р.Д., Поломошнов С.А., Амеличев В.В., Костюк Д.В., Черемисинов А.А.* Анализ электрохимического процесса осаждения пленок пермаллоя. Т. 24, № 6, с. 547–556.

Элементы интегральной электроники

- Асаёнок М.А., Зеневич А.О., Новиков Е.В.* Кинетика и амплитуда фотоотклика кремниевых фотоэлектронных умножителей. Т. 24, № 4, с. 391–397.
- Гуминов Н.В., Мьо Мин Тхант, Романюк В.А., Шомахмадов Д.П.* Сравнение характеристик GaAs и GaN НЕМТ-транзисторов. Т. 24, № 1, с. 42–50.
- Кожеевников В.С., Матюшкин И.В., Черняев Н.В., Жукова Т.Д.* Взаимосвязь физической и информационной энтропий в теории надежности для наноразмерных элементов. Т. 24, № 6, с. 589–600.
- Королёв М.А., Мордкович В.Н., Леонов А.В., Девликанова С.С.* Исследование КНИ полевых датчиков Холла в режиме неполного обеднения. Т. 24, № 4, с. 383–390.
- Кулакова А.А., Лукьяненко Е.Б.* Энергоэффективные КМОП-триггеры с инверторной запоминающей ячейкой. Т. 24, № 3, с. 230–238.
- Маковская Т.И., Данилюк А.Л., Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Борисенко В.Е.* Зарядовые свойства транзисторной МОП-структуры с каналом из двумерного кристалла. Т. 24, № 2, с. 137–150.
- Новиков С.Г., Беринцев А.В., Алексеев А.С., Сомов А.И., Светухин В.В.* Исследование влияния температуры на выходные параметры радиоизотопных источников электрического питания на основе двойного преобразования энергии радиационного распада. Т. 24, № 2, с. 151–159.
- Озеркин Д.В., Бабешко В.В.* Синтез SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ с учетом температурной зависимости параметров. Т. 24, № 2, с. 185–196.
- Павлова М.Д., Дегтерев А.Э., Ламкин И.А., Тарасов С.А.* Влияние параметров процесса формирования нанокompозитного слоя «фталоцианин:фуллерен» на фотоэлектрические характеристики структур ZnPc:C₆₀/C₆₀. Т. 24, № 4, с. 398–406.
- Петросянец К.О., Исмаил-Заде М.Р., Самбурский Л.М.* Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур. Т. 24, № 2, с. 174–184.
- Рязанцев Д.В., Кузнецов Е.В.* Локальный нагрев интегрального МОП-дозиметра для отжига накопленного заряда. Т. 24, № 6, с. 581–588.
- Семёнов А.А., Усанов Д.А., Дронкин А.С.* Активный аппаратный стек процессора. Т. 24, № 3, с. 219–229.
- Сергеев В.А., Смирнов В.И., Ходаков А.М., Куликов А.А., Черняков А.Е.* Влияние дефектов структуры и конструкции на тепловые характеристики мощных биполярных СВЧ-транзисторов. Т. 24, № 5, с. 479–488.
- Юсипова Ю.А.* Динамика вектора намагниченности свободного слоя спин-вентильной структуры в магнитном поле, перпендикулярном плоскости слоев. Т. 24, № 5, с. 489–502.
- Юсипова Ю.А.* Прецессия намагниченности свободного слоя спинового вентиля и его переключение при воздействии магнитного поля, перпендикулярного оси анизотропии. Т. 24, № 2, с. 160–173.
- Якунин А.Н., Аунг Мьо Сан.* Исследование и модификация многозарядного параллельно-префиксного сумматора. Т. 24, № 2, с. 197–207.

Схемотехника и проектирование

Melikyan V.Sh., Hayrapetyan A.K., Kostanyan H.T., Margaryan H.V., Grigoryan H.T., Martirosyan A.A. Power Supply Ratio Improvement Using Self-Calibration in Voltage Regulators (Меликян В.Ш., Айрапетян А.К., Костанян А.Т., Маргарян А.В., Григорян А.Т., Мартirosyan А.А. Улучшение коэффициента подавления нестабильности питания с помощью самокалибровки в регуляторах напряжения). Т. 24, № 3, с. 248–256.

Melikyan V.Sh., Khachikyan K.T., Gumroyan H.V., Babayan A.V., Avushyan S.A., Hakobyan K.T. Crystal Area Reduction Method for Impedance Matching Systems in High-Speed Data Links (Меликян В.Ш., Хачикян К.Т., Гумроян Р.В., Бабаян А.В., Авушян С.А., Акопян К.Т. Метод уменьшения площади кристалла для систем согласования импедансов в высокоскоростных каналах передач). Т. 24, № 5, с. 503–510.

Кузьминов И.В., Лосев В.В., Новожилов И.С., Чаплыгин Ю.А. Алгоритм компрессии и декомпрессии потока конфигурационных данных ПЛИС. Т. 24, № 6, с. 610–618.

Кулакова А.А., Лукьяненко Е.Б. Блочный метод синтеза триггерных схем с использованием карт минтермов. Т. 24, № 6, с. 601–609.

Рябцев В.Г., Волобуев С.В. Имплементация памяти в систему на кристалле со встроенными средствами самотестирования и самовосстановления. Т. 24, № 3, с. 239–247.

Микро- и наносистемная техника

Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенко Ан.С. Исследование стойкости МЭМС-акселерометров емкостного типа к внешним механическим воздействиям. Т. 24, № 6, с. 619–626.

Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенко С.П. Исследование воздействия случайной вибрации на характеристики микромеханических акселерометров. Т. 24, № 5, с. 511–520.

Ван Хао Ло, Нестеренко Т.Г. Система резонансной настройки вибрационного многокомпонентного МЭМС-гироскопа. Т. 24, № 3, с. 267–278.

Губанова О.В., Кузнецов Е.В., Рыбачек Е.Н., Сауров А.Н. Биосенсор на основе химически чувствительного нанопроволочного полевого транзистора с минимальным контактом к плавающей затвору. Т. 24, № 4, с. 407–414.

Йе Ко Ко Аунг, Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенко С.П. Параметры чувствительного элемента сэндвич-конструкции емкостного микромеханического акселерометра. Т. 24, № 3, с. 257–266.

Информационно-коммуникационные технологии

Виноградов А.Н. Модель системы управления движением мобильного робота на основе нечеткой логики. Т. 24, № 1, с. 79–86.

Воротнёв Д.В., Голованов Р.В. Методика обучения бинарных классификаторов в задачах сегментации изображений. Т. 24, № 3, с. 279–290.

Гагарина Л.Г., Гайдук И.О., Кремер Е.А., Можжухина А.В. Эффективный метод локализации ошибок при проектировании специализированных БИС. Т. 24, № 5, с. 530–538.

Ермошенко Ю.М. Модель вектора состояния в виде квазислучайного процесса для комплексного аэрологического радиозондирования атмосферы. Т. 24, № 1, с. 72–78.

Кобяк И.П. Идентификация бернуллиевских последовательностей криптографическими методами. Т. 24, № 3, с. 301–308.

Матюшкин И.В., Заплетина М.А. Отражение и транспонирование данных в матрице клеточно-автоматного вычислителя. Т. 24, № 1, с. 51–63.

Минаков Е.И., Валихин Г.А. Определение потерь распространения радиолокационной волны вблизи земной поверхности. Т. 24, № 1, с. 64–71.

Минаков Е.И., Мешков А.В., Мешкова Е.О. Модифицированное преобразование Хафа в задаче повышения вероятности обнаружения объектов в радиоэлектронных системах наблюдения. Т. 24, № 3, с. 291–300.

Петров Е.Н., Гагарина Л.Г. Разработка программного модуля динамического управления вводом-выводом библиографических данных. Т. 24, № 4, с. 415–422.

Северюкова Е.А., Волкова Е.А., Узрватов А.В., Копылова М.Д. Имитационное моделирование системы мониторинга окружающей среды. Т. 24, № 5, с. 521–529.

Краткие сообщения

Гончаров И.Н., Козырев Е.Н., Урумов В.В. Оптимизация усилительной способности двухкамерных электронно-оптических преобразователей. Т. 24, № 4, с. 428–432.

Гуляев А.С., Кольцов В.Б., Северюкова Е.А. Применение программных средств для оценки термодинамической устойчивости на примере железа. Т. 24, № 3, с. 309–312.

Ключников А.С., Красюков А.Ю., Артамонова Е.А., Королёв М.А., Ефимова Д.И. Влияние толщины пленки кремния КНИ-структуры на параметры планарного беспереходного МОП-транзистора. Т. 24, № 1, с. 87–91.

Лукин С.С. Имитационная модель для оценки эффективности процессов сбора и переработки промышленных отходов. Т. 24, № 4, с. 423–427.

Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А. Связь уровня фототока светоизлучающих InGaN/GaN-гетероструктур с уровнем НЧ-шума и порогового тока. Т. 24, № 1, с. 92–96.

Юбилей

Гаврилову Сергею Витальевичу – 60 лет. Т. 24, № 6, с. 628.

Грибов Б.Г., Горнев Е.С., Плотников Ю.И., Тельминов О.А. Научно-исследовательский институт молекулярной электроники: от выполнения НИОКР к электронным технологиям мирового уровня. Т. 24, № 3, с. 317–321.

Лабунову Владимиру Архиповичу – 80 лет. Т. 24, № 2, с. 210–211.

Петросянцу Константину Орестовичу – 75 лет. Т. 24, № 2, с. 212.

Конференции

3rd International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT'2020), 17–19 June 2020, Tenerife (Canary Islands), Spain. Т. 24, № 6, 2-я стр. обложки.

26-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2019». Т. 24, № 1, 4-я стр. обложки.

Об итогах 26-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2019». Т. 24, № 3, с. 322.

Об итогах 2-й Международной конференции «Микроэлектронные приборы и технологии» (MicDAT' 2019), 22–24 мая 2019 г., г. Амстердам, Голландия. Т. 24, № 6, с. 629–630.

Объединенная выставка ЭлектронТехЭкспо и ЭкспоЭлектроника. Т. 24, № 1, 3-я стр. обложки.

Открытие Центра компетенций национальной технологической инициативы «Сенсорика» в МИЭТ. Т. 24, № 1, с. 97–98.

От Российской академии наук. Т. 24, № 6, с. 627.

Памяти Бархоткина Вячеслава Александровича. Т. 24, № 3, с. 313–314.

Памяти Жореса Ивановича Алфёрова. Т. 24, № 2, с. 208–209.

Памяти Усанова Дмитрия Александровича. Т. 24, № 3, с. 315–316.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 июля 2019 г.)

Внимание! Введены новые требования к выполнению рисунков.

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал «Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА» публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- фундаментальные исследования;
- материалы электроники;
- технологические процессы и маршруты;
- элементы интегральной электроники;
- схемотехника и проектирование;
- микро- и наносистемная техника;
- интегральные радиоэлектронные устройства;
- биомедицинская электроника;
- информационно-коммуникационные технологии;
- проблемы высшего образования.

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом **в 2-х экземплярах**.

2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.

3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).

4. Лицензионный договор о передаче авторского права в 2-х экземплярах. Форму лицензионного договора с автором можно найти по ссылке: <http://ivuz-e.ru/authors/>

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

- на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;
- на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать **ключевые слова** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

- печатается *через два интервала* с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);
- абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца (применение этого символа в других целях не допускается), ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов;
- все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом;
- перед знаками препинания пробелы не ставятся, после них – один пробел;
- разрядка слов не допускается;
- не допускается применение псевдографики, а также стилей.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только *по умолчанию*. Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Векторные рисунки представляются в формате файла *.SVG (версии 1.1). Для выполнения иллюстраций рекомендуется использовать свободно распространяемый векторный редактор Inkscape 0.92 (официальный сайт <https://inkscape.org>). Текст и линии на рисунке должны быть редактируемыми (текст не «в кривых»).

2. Полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в формате TIFF (без компрессии). **Использование MS Word не допускается.**

3. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок должен быть представлен в отдельном файле. Формат рисунков не должен превышать 15×22 см. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

- оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

- нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

- русскоязычные источники также должны быть переведены на английский язык.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

- оформляется отдельным файлом;

- необходимо указать: фамилию, имя, отчество полностью; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, служебный адрес (на русском и английском языках), служебный телефон, e-mail;

- указать автора, ответственного за прохождение статьи, для аспирантов – научного руководителя.

Плата за публикацию статей не взимается.

Статьи направлять по адресу: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ, редакция журнала «Известия вузов. Электроника», комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miec.ru

<http://ivuz-e.ru>

ПОДПИСКА 2020

Научно-технический журнал «Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОНИКА»

Периодичность журнала - 6 номеров в год

В центре внимания журнала - актуальные проблемы электроники. На его страницах освещаются результаты научно-исследовательских работ, выполненных в вузах и НИИ, на промышленных предприятиях страны, методические аспекты преподавания с учетом современных требований и форм обучения, дается информация о научных конференциях. Формируются специальные выпуски по тематическому признаку.

Подписаться на печатную версию журнала можно:

по каталогу «Газеты, журналы»
АО Агентство «Роспечать»
в любом почтовом отделении

Подписной индекс 47570

по прямой подписке в АО Агентство «Роспечать»:
www.press.rospr.ru

по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис»
в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934

через редакцию - с любого номера и до конца года

**Подписку на электронную версию журнала можно оформить
на сайтах:**

- Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»: www.rucont.ru; www.akc.ru; www.pressa-rf.ru
- ООО «УП Урал-Пресс»: www.delpress.ru
- ООО «ИВИС»: www.ivis.ru



Адрес редакции: 124498, г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, дом 1, МИЭТ, комн. 7231

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

<http://ivuz-e.ru>