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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 24
№ 5
сентябрь - октябрь

Vol. 24
No. 5
September - October

2019

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.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.dlib.eastview.com



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

Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 24, № 5, 2019
сентябрь – октябрь

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)
Горбацевич Александр Алексеевич – чл.-корр. 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., Фонд «Сколково», ООО «Центр плазменных и вакуумных технологий» (Москва, Россия)
Лабунов 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 «Синопсис 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)
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия)

© “Известия вузов. Электроника”, 2019
© МИЭТ, 2019

Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада)
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники 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)
Таиров 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)
Тимошенков 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. Проскурякова*
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 09.10.2019. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 12,555 усл.печ.л., 11,136 уч.-изд.л. Тираж 180 экз. Заказ № 19. 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

Фундаментальные исследования

Горбацевич А.А., Журавлёв М.Н. Электронные свойства ветвящихся молекулярных структур. Обзор 439

Технологические процессы и маршруты

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..... 459

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 469

Элементы интегральной электроники

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 479

Юсипова Ю.А. Динамика вектора намагниченности свободного слоя спин-вентильной структуры в магнитном поле, перпендикулярном плоскости слоев 489

Схемотехника и проектирование

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) 503

Микро- и наносистемная техника

Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенков С.П. Исследование воздействия случайной вибрации на характеристики микромеханических акселерометров 511

Информационно-коммуникационные технологии

Севрюкова Е.А., Волкова Е.А., Угроватов А.В., Копылова М.Д. Имитационное моделирование системы мониторинга окружающей среды 521

Гагарина Л.Г., Гайдук И.О., Кремер Е.А., Можжухина А.В. Эффективный метод локализации ошибок при проектировании специализированных БИС 530

К сведению авторов 539

Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 24, No. 5, 2019
September – October
The scientifical 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. Gorbatsevich – Cor. Mem. 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., The Skolkovo Foundation, 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 09.10.2019. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 12,555. Number of copies 180. Order no. 19. 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

Fundamental researches

Gorbatsevich A.A., Zhuravlev M.N. Electronic Properties of Branched Molecular Structures. Review 439

Technological processes and routes

Lyubimov A.V., Borisov A.G., Korchagin E.P., Kozlitin A.I., Osipenkova N.G. Study of the Process of Cathodic Electrodeposition of High-Lead Tin-Lead Alloy 459

Sivchenko A.S., Kuznetsov E.V., Saurov A.N. Time to Failure Determination for sub-100 nm MOS Transistors Gate Dielectric by Means of Accelerated Tests 469

Integrated electronics elements

Sergeev V.A., Smirnov V.I., Khodakov A.M., Kulikov A.A., Chernyakov A.E. Influence of Defects of Structure and Construction on Thermal Characteristics of High-Power Bipolar Microwave Transistors 479

Iusipova Iu.A. Free-Layer Magnetization Vector Dynamics of the Spin-Valve Structure in the Magnetic Field Perpendicular to the Layers Plane 489

Circuit engineering and design

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 503

Micro- and nanosystem technology

Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov S.P. Research of Influence of Random Vibrations on MEMS Samples 511

Information-communication technologies

Sevryukova E.A., Volkova E.A., Ugrovatov A.V., Kopylova M.D. Imitation Simulation of Environment Monitoring System 521

Gagarina L.G., Gayduk I.O., Kremer E.A., Mozhzukhina A.V. Efficient Error Localization Method during Developing Specialized LSI 530

Instructions for authors 539

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
FUNDAMENTAL RESEARCHES

УДК 539.19:621.38 **DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-439-458**

Электронные свойства ветвящихся молекулярных структур

Обзор

А.А. Горбацевич[1,2], М.Н. Журавлёв[2]

[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г.Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г.Москва, Россия

aagor137@mail.ru

Разработка новых типов макромолекулярной архитектуры – одно из основных направлений развития современной физики полимеров. Применительно к электронике особое место занимают электропроводящие π-сопряженные молекулы. В обзоре рассмотрены отличительные особенности электронных свойств органических полупроводников по сравнению с их твердотельными аналогами. Особое внимание уделено роли электрон-электронных и электрон-фононных взаимодействий в образовании автолокализованных возбужденных состояний – солитонов и поляронов. Проанализированы конструктивные и деструктивные интерференционные эффекты в молекулярных структурах, содержащих узлы ветвления и кольцевые группы. Размер ветвящейся молекулы при этом должен быть мал для сохранения квантовой когерентности. В таких молекулах эффекты автолокализации несущественны и транспорт определяется электронами и дырками, инжектированными из контактов. Предложены два подхода к описанию квантовой интерференции в ветвящихся молекулах: на основе молекулярных орбиталей и в рамках картины локализованных атомных орбиталей. Данные подходы позволяют сформулировать правила конструирования молекулярных структур, в которых наблюдается квантовая интерференция. Представлены последние результаты по разработке квантовых молекулярных интерференционных транзисторов со сверхнизким энергопотреблением. Кратко рассмотрены несопряженные ветвящиеся полимеры с древовидной структурой – дендримеры, которые могут быть эффективны для создания систем сбора и преобразования электромагнитного излучения.

Ключевые слова: ветвящиеся сопряженные полимеры; молекулярная электроника; квантовая интерференция; аккумуляция света; дендримеры

© А.А. Горбацевич, М.Н. Журавлёв, 2019

Для цитирования: Горбацевич А.А., Журавлёв М.Н. Электронные свойства ветвящихся молекулярных структур. Обзор // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 439–458. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-439-458

Electronic Properties of Branched Molecular Structures

Review

A.A. Gorbatsevich[1,2], M.N. Zhuravlev[2]

[1]Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

aagor137@mail.ru

Abstract: The design of new types of macromolecular architecture is one of the main directions of development of modern polymer physics. With regard to electronics, a special place is occupied by electrically conductive π-conjugated molecules. The review considers the distinctive features of the electronic properties of organic semiconductors in compare with their solid-state analogs. Special attention is paid to the role of electron-electron and electron-phonon interactions in the formation of autolocalized excited states: solitons and polarons. The constructive and destructive interference effects in molecular structures containing branching nodes and ring groups are discussed. The size of a branched molecule should be not large to preserve quantum coherence. The autolocalization effects in such molecules are not pronounced and transport is provided by electrons and holes injected from electrodes. Two main approaches to the description of quantum interference in branched molecules are desribed in the review: on the basis of molecular orbitals and within localized atomic orbitals picture. These approaches make it possible to formulate design rules for molecular structure exhibiting quantum interference. The recent results are presented on the design of quantum interference molecular transistor with extremely low switching power. Dendrimers, tree-branching nonconjugated molecules, are briefly considered, which can become effective tools for electromagnetic radiation collection and transformation.

Keywords: branched conjugated polymers; molecular electronics; quantum interference; light harvesting; dendrimers

For citation: Gorbatsevich A.A., Zhuravlev M.N. Electronic properties of branched molecular structures. Review. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 439–458. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-439-458

Введение. Развитие элементной базы электроники и фотоники, а также современных подходов к обработке информации тесно связано с освоением новых материалов. В последние годы наблюдается интерес к изучению π-сопряженных олигомеров и полимеров благодаря фундаментальным научным результатам и успешному их внедрению в промышленность. В π-сопряженных материалах обнаружено большое разнообразие новых концепций в результате взаимодействия между π-электронной и геометрической структурами, что отмечено нобелевскими премиями по химии 2000 и 2016 гг. [1, 2].

Основной упор современных исследований делается на обеспечении возможности изготовления электронных приборов (или их частей) при значительно меньших затратах

[3] по сравнению с традиционной кремниевой технологией или на создании устройства, функциональные возможности которого сложно достижимы с использованием кремния [4]. Вместе с тем большое внимание уделяется молекулярной электронике [5, 6], которая могла бы составить конкуренцию кремниевой электронике в области предельно малых размеров элементов (порядка одного или нескольких нанометров). Существенную роль в таких структурах играют квантово-механические интерференционные эффекты, что делает их популярным объектом фундаментальных исследований. Современные исследования показывают, что наряду с высокой воспроизводимостью, присущей молекулярным структурам с фиксированной геометрией, такие элементы могут также иметь исключительно низкое энергопотребление [7, 8]. Использование отдельных молекул в качестве активных элементов СБИС может перейти в реальную практическую плоскость в случае создания методов литографии с атомной точностью, а также решения проблемы формирования воспроизводимых электрических контактов к молекулам.

Полимерные и молекулярные π-сопряженные полупроводники в некоторых применениях имеют преимущества перед твердотельными аналогами. Тонкие пленки из полимерных материалов, как правило, очень гладкие, морфологически и структурно однородные на больших площадях. Реологические свойства растворов полимеров хорошо контролируются, что является одним из условий развития печатной электроники [9]. Полимерно-кристаллические домены, как правило, намного меньше, чем характерные размеры оптоэлектронных устройств. Как следствие, транспортные характеристики изотропны, а разброс параметров от устройства к устройству небольшой [10]. Кроме того, полимерные пленки нанометровой толщины имеют высокую механическую прочность, что делает их потенциально совместимыми с прокаткой и изготовлением рулонов на гибких подложках [11].

π-Сопряженные полимеры применяются в светоизлучающих, нелинейно-оптических и фотоэлектрических устройствах, пластиковых полевых транзисторах и для электромагнитного экранирования [12]. Также они являются активными компонентами во многих биологических оптико-физических процессах, например в качестве коллекторов света при фотосинтезе и в зрительном механизме посредством фотоизомеризации [13]. При этом разветвленная структура полимера повышает эффективность сбора фотовозбуждений. Транспорт заряда в органических молекулах – важный компонент функционирования клеток.

В настоящем обзоре рассматриваются отличительные особенности электронных свойств органических полупроводников на основе сопряженных полимеров и молекулярных структур по сравнению с их твердотельными аналогами, обсуждаются интерференционные эффекты в молекулярных структурах, содержащих узлы ветвления, в том числе перспективные для транзисторных приложений, а также оптоэлектронные приложения ветвящихся сопряженных полимеров.

Электронные свойства проводящих полимеров. Электронные свойства сопряженных полимеров значительно отличаются от свойств объемных неорганических полупроводников. Во-первых, это характер процессов, вызывающих высокую проводимость материалов. При легировании неорганических полупроводников частицы легирующей примеси занимают позиции в решетке основного материала без изменения зарядового состояния. Реакция легирования в органических сопряженных полимерах является реакцией переноса заряда, приводящей к частичному окислению или восстановлению полимера [14]. Воздействие окислителя X (или восстановителя M) ведет к образованию положительно (или отрицательно) заряженного полимерного комплекса.

Поэтому «процесс легирования» в случае проводящих полимеров может быть классифицирован как окислительно-восстановительные реакции по общей схеме:

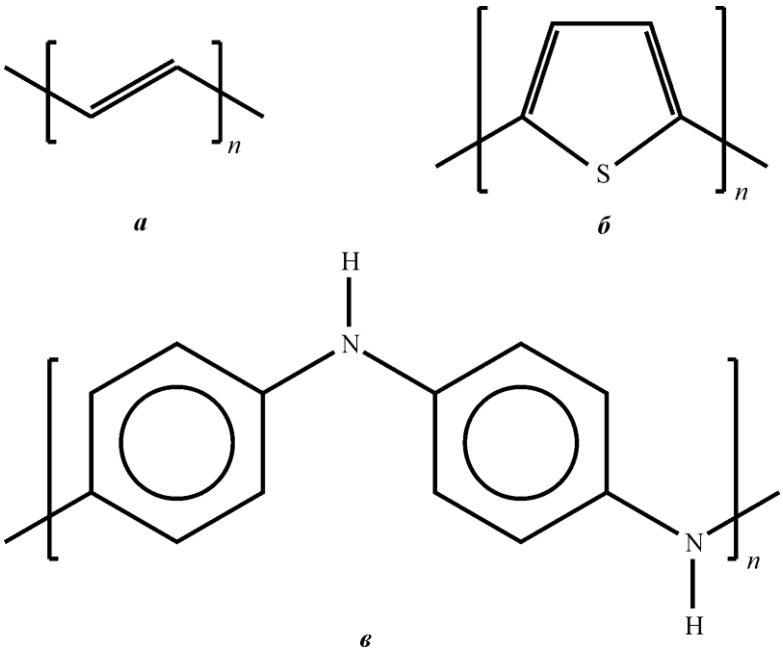
окисление (*p*-легирование): полимер + $X \leftrightarrow$ (полимер)$^{n+}$ + X^{n-};

восстановление (*n*-легирование): полимер + $M \leftrightarrow$ (полимер)$^{n-}$ + M^{n+}.

Обычно $X = I_2$, Br_2, AsF_5; а M = Na, Li. Данные реакции наиболее вероятны в случае ненасыщенных полимеров с π-электронами, поскольку они могут быть легко удалены или добавлены к полимерным цепям с образованием многозарядных ионов. Следовательно, в этих типах полимеров возможна высокая проводимость при легировании.

Во-вторых, первоначально считалось, что увеличение проводимости при легировании органических сопряженных полимеров есть результат появления дополнительных электронов (или дырок) в энергетических зонах. Это предположение, однако, было быстро опровергнуто следующим открытием. Полиацетилен и полипарафенилен характеризуются проводимостью, которая связана не со свободными электронами, а с бесспиновыми носителями заряда [15, 16]. Обнаружено, что высокая электропроводность, получаемая при легировании, связана с образованием автолокализованных возбуждений, таких как солитоны, поляроны и биполяроны, которые могут относительно свободно перемещаться через материал. Эти квазичастицы возникают в результате сильного взаимодействия между зарядом в цепочке (электрон или дырка) в процессе легирования и молекулярной структурой, т.е. являются прямым следствием сильного электрон-фононного взаимодействия в квазиодномерных полимерах [17]. В настоящее время установлено, что в полимерах с вырожденным основным состоянием, таких как транс-полиацетилен, носители заряда – заряженные солитоны – могут существовать изначально, а в полимерах с невырожденным основным состоянием, таких как цис-полиацетилен, полипиррол, политиофен или полифенилен, носители заряда – поляроны – образуются при легировании. Поляроны затем объединяются, образуя биполяроны без спина. Появление биполярона также подтверждается расчетами, которые показывают, что образование одного биполярона термодинамически более устойчиво, чем образование двух разделенных полярона, несмотря на кулоновское отталкивание между двумя одинаковыми зарядами.

В-третьих, электропроводящие полимеры в отличие от неорганических полупроводников не являются высокоупорядоченными кристаллами и не имеют дальнего порядка, электроны движутся квазиодномерно вдоль отдельных макромолекул [1]. На рис.1 приведены примеры молекулярных структур. Возникновение беспорядка в полимерах приводит к локализации носителей заряда, а проводимость осуществляется по активационному механизму. Следовательно, хотя органические полимеры проявляют транспортные и оптические свойства, аналогичные свойствам сетки из кристаллических полупроводников, интерпретация этих свойств [18] и конструирование материалов связаны с различными физическими явлениями. Эти необычные электронные свойства могут быть объяснены тем, что сопряженные полимеры ведут себя как квазиодномерные системы с сильными внутримолекулярными электронными взаимодействиями и относительно слабыми межмолекулярными [19]. Слабые межмолекулярные электронные взаимодействия, возникающие из-за плохого перекрытия электронных волновых функций, в сочетании с сильными механизмами диссипации (или дефазировки) означают, что квантово-механическая когерентность, как правило, ограничивается одной цепью или несколькими соседними цепями. Поэтому электронные волновые функции обычно локализованы на одиночных цепочках или на парах цепочек в случае комплексов с возбужденным состоянием. Квазиодномерность также означает,



а *б* *в*

Рис.1. Примеры проводящих полимеров: *а* – полиацетилен; *б* – политиофен; *в* – полианилин
Fig.1. Chemical structures of some conductive polymers: *a* – polyacetylene; *b* – polythiophene; *c* – polyaniline

что электрон-электронные взаимодействия слабо экранированы. Таким образом, электронные корреляции важны для определения характера электронных состояний. Последний фактор, определяющий характер электронных состояний, состоит в том, что электроны и фононы сильно связаны. Эта связь усиливается при уменьшении размеров цепочки.

В ранних теоретических работах по сопряженным олигомерам и полимерам электрон-электронное и электрон-фононное взаимодействия рассматривались независимо. В 1950-х гг. основное внимание уделялось роли электрон-фононного взаимодействия в возникновении перехода металл – полупроводник в одномерных металлах [20, 21] и в определении чередования связей в линейных полиенах [22]. Выяснено, что нарушение симметрии основного состояния и порядка чередования химических связей приводит к появлению электронного состояния в середине запрещенной зоны [23]. Теоретические и экспериментальные исследования возбужденных состояний и связанных с ними дефектов (солитонов) стали активно развиваться после появления упрощенной модели взаимодействия электронов с фононами в транс-полиацетилене [16, 17].

Альтернативная точка зрения, которая заключается в том, что электрон-электронные взаимодействия важны при определении электронных свойств в сопряженных полимерах, развита в работе [24]. В данной работе утверждается, что электронные корреляции в основном ответственны за оптическую щель в линейных полиенах. Так, отсутствие электролюминесценции в линейных полиенах объясняется более низкой энергией диполь-запрещенного сильнокоррелированного синглетного состояния по сравнению с диполь-разрешенным [25]. Другим свидетельством важности электрон-электронных взаимодействий является то, что электролюминесценция от светоизлучающих полимеров происходит из экситона, а не из межзонных переходов. Фактически и электрон-электронное, и электрон-фононное взаимодействия должны рассматриваться вместе для правильного описания возбужденных состояний сопряженных полимеров и их электронных и оптических свойств.

Нелегированные (нейтральные) сопряженные полимеры представляют собой полупроводники с оптической щелью ~ 2–3 эВ, что отражает большие энергии связи экситонов в полимерах. Экранирование электронов электронами в органических системах является слабым (ε ~ 2–3), соответственно, энергии связи экситонов велики (~ 0,5–1,5 эВ), а радиус мал (~ 5–10 Å). Легированные полимеры имеют «металлическую» электропроводность порядка 10^3–10^5 См·см$^{-1}$. Для сравнения: проводимость меди при комнатной температуре составляет 10^6 См·см$^{-1}$. При сравнимых проводимостях металлов и сопряженных полимеров техническому применению последних препятствуют неупорядоченность отдельных цепочек и химическая нестабильность высоколегированных полимеров [1].

Совершенно линейная молекула полимера является идеализированным, редко встречающимся объектом. Большинство полимерных цепей имеют химические и/или структурные дефекты. Когда эти дефекты ограничены несколькими атомами в основной цепи полимера, их лучше всего рассматривать как звенья сополимеризации. Однако, когда длина висячих цепей того же порядка, что и у других цепей в полимере, можно говорить о длинноцепочечном разветвлении. Хотя в ответвлении может быть относительно небольшое количество атомов, это всегда оказывает значительное влияние на глобальные свойства полимера.

При всем разнообразии ветвящихся архитектур их общим структурным элементом является *Y*-разветвитель. В работе [26] показано, что в точке ветвления молекул полиацетилена происходит изменение топологии системы, сопровождающееся локальным выигрышем в кинетической энергии в соответствии с принципом неопределенности. В отличие от связанных состояний на атоме примеси данные состояния образуются парами: одно для электрона и одно для дырки, т.е. имеет место локальное сужение энергетической щели. Наличие дополнительных носителей заряда локально изменяет электростатический потенциал и реакционную способность молекулы, что способствует, например, присоединению новых функциональных групп. Также в фононном спектре цепей, ограниченных разветвителями, могут возникать раман-активные моды, характеризующие локальные колебательные состояния [27]. Отличительная особенность *Y*-разветвителей – более низкая интенсивность спектральных линий по сравнению с линейными молекулами, что связано с уменьшением протяженности молекулы в одном направлении у разветвителей. Таким образом, повышая степень ветвления полимерных цепочек, можно перейти от вырожденной структуры, характеризующейся активным рамановским рассеянием, к невырожденной структуре, характеризующейся активной люминисценцией.

Квантовая интерференция в ветвящихся молекулярных структурах. В последние годы сопряженные ветвящиеся молекулы – полиены с относительно небольшим количеством атомов, обеспечивающим сохранение квантовой когерентности, и ароматические углеводороды – вызывают большой интерес в связи с возможностью реализации квантовой интерференции в транспорте [28–32]. Для возникновения эффектов автолокализации такие структуры недостаточно велики, и транспорт обеспечивается обычными носителями заряда из контактов. Конструктивная квантовая интерференция (ККИ) возникает, когда сдвиг фазы различных гармоник электронной волны равен четному числу π или, что эквивалентно, длины траекторий, по которым распространяются различные компоненты электронной волны, отличаются на целое число длин волн. В туннельной прозрачности и, соответственно, в проводимости при выполнении условия ККИ может возникнуть максимум – резонанс. Резонансное туннелирование – один из

примеров конструктивной интерференции в транспорте, когда многократно отраженные волны формируют максимум распределения электронной плотности, соответствующий метастабильному состоянию, в конфигурации подобной резонатору Фабри – Перро [5]. Отметим, что для формирования выраженного максимума электронной плотности и, соответственно, резонанса коэффициент отражения волн, формирующих резонанс, должен быть велик (близок к единице). Ширина резонанса при этом определяется взаимодействием квазистационарного состояния с непрерывным спектром, характеризующим окружение молекулы или наноструктуры. На рис.2,*а* показан пример ККИ – транспорт через молекулу бензола при пара-соединении с контактами [33, 34]. В этом случае различные интерферирующие компоненты волны распространяются по разнесенным в пространстве траекториям 1 и 2, которые сходятся в точке ветвления, и туннельная прозрачность имеет плавный минимум в интервале энергии между HOMO- и LUMO-орбиталями. Поскольку коэффициент отражения от точки ветвления невелик [35], квазистационарное состояние на участке молекулы между точками ветвления не формируется, а резкие пики соответствуют резонансному туннелированию через локализованные HOMO- и LUMO-орбитали. Если разность фаз равна нечетному числу π (разность хода волн – нечетному числу полуволн), имеет место деструктивная квантовая интерференция (ДКИ), которая проявляется в возникновении резкого минимума на фоне плавного плато в прозрачности (антирезонанса) в интервале между HOMO- и LUMO-орбиталями. Наличие пространственно разнесенных участков траекторий и точек ветвления, в которых эти траектории объединяются, принципиально для существования ДКИ. Примером молекулы, демонстрирующей ДКИ, может служить молекула бензола при мета-соединении (рис.2,*б*).

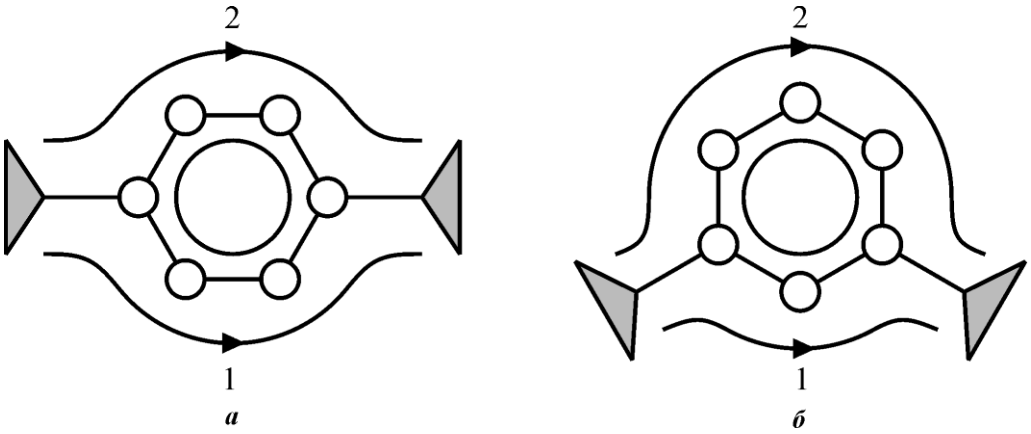


Рис.2. Пара- (*а*) и мета-конфигурации (*б*) бензола: 1 и 2 – интерферирующие траектории носителей заряда
Fig.2. Para- (*a*) and meta (*b*) configurations of benzene: 1 and 2 – the interfering trajectories of charge carriers

В работе [33] исследована ДКИ в аннуленах с различным числом атомов углерода в цикле и показано, что зависимость квантовомеханической прозрачности от положения контактов (пара-, мета-) представляет собой общее свойство циклических молекул. Сдвиг точки контакта молекулы с электродом на одно межатомное расстояние, соответствующее переходу от пара- к мета-конфигурации в бензоле, приводит к появлению нуля в прозрачности при определенной энергии. В работе [33] также показано, что нарушение периодичности в циклической молекуле, например изменением потенциала одного из атомов с помощью локального затвора, приводит к разрушению ДКИ и вос-

становлению конечной величины прозрачности, что может быть использовано для создания управляемого молекулярного ключа (транзистора). Роль воздействия, нарушающего периодичность, могут играть также функциональные группы, присоединенные к ароматическому кольцу [36]. При этом прозрачность молекулы существенно зависит не только от места присоединения контакта, но и от типа молекулярной группы (якорной), соединяющей молекулу с электродом. Тип якорной группы также в значительной степени влияет на жесткость всей структуры [28, 37], что важно для воспроизводимости результатов. Якорная группа, например на основе пиридина, может быть причиной ДКИ, связанной с различными способами подключения к электроду. В случае мета-присоединения как основной молекулы, так и якорной группы ДКИ усиливается [38].

При наличии в молекуле нескольких путей распространения электронных волн, как, например, в полициклических углеводородах, интерференция носит более сложный характер. Тем не менее удалось сформулировать правила для наблюдения конструктивной или деструктивной интерференции в зависимости от структуры молекулярных орбиталей и характера присоединения молекулы к электродам [39–41]. Математическая основа данных правил – общее выражение для квантомеханической прозрачности молекулы на языке функций Грина. Нули функции Грина определяют нули прозрачности. Выражение для функции Грина существенным образом зависит от выбранного базиса: молекулярные орбитали (МО) или атомные орбитали (АО).

Наиболее интуитивно понятный подход связан с использованием МО, которые, как правило, хорошо известны для молекулы, выбранной в качестве объекта исследований. При не слишком высокой температуре и не очень большом приложенном напряжении по сравнению с величиной энергетической щели основной вклад в проводимость вносят только уровни, наиболее близко расположенные к уровню Ферми, т.е. HOMO- и LUMO-орбитали. При этом, поскольку уровень Ферми располагается между ними, энергетические знаменатели в членах, описывающих вклады этих орбиталей в функцию Грина, имеют разный знак. Соответственно, конструктивная интерференция возможна, если числители этих членов, которые определяются амплитудами данной орбитали на узле, контактирующем с электродом, также имеют разный знак. Деструктивная интерференция возможна, если знак одинаковый [40]. В приближении Хюккеля, которое на качественном уровне описывает основные особенности электронной структуры молекул и их транспортных характеристик, эти правила могут быть сформулированы для альтернированных углеводородов. В таких молекулах все атомы углерода могут быть разбиты на две группы: помеченные звездочкой и непомеченные (рис.3). Таким образом, ближайшими соседями атомов одной группы могут быть только атомы другой группы [42]. Альтернированные углеводороды имеют электрон-дырочную симметрию, описываемую теоремой парности: уровни энергии молекулы симметричны относительно уровня энергии атома углерода (в рассматриваемом случае это HOMO- и LUMO-орбитали) и относительные знаки амплитуд волновой функции на атомах для симметрично расположенных уровней энергии противоположны. Для наблюдения ДКИ электроды следует подключать либо к помеченным атомам, либо к непо-

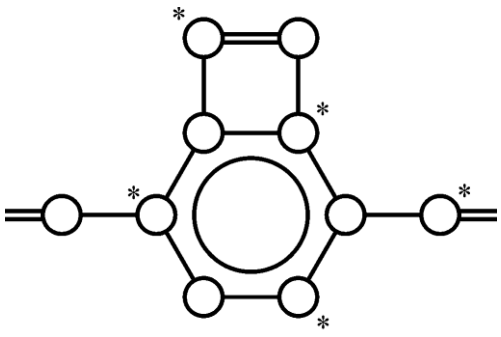


Рис.3. Альтернированный сопряженный углеводород – бензоциклобутадиен
Fig.3. Alternating conjugated hydrocarbons – benzocyclobutadiene

меченным, а ККИ соответствует подключение одного электрода к помеченному узлу, а другого – к непомеченному. Как показано в работе [43] на примере азулена, в неальтернированных углеводородах с несимметричным энергетическим спектром, в которые нельзя ввести две независимые подрешетки, ДКИ также наблюдается, но носит более сложный характер и простыми правилами на языке МО не описывается. Тем не менее для неальтернированных молекул, а также для ветвящихся сопряженных молекул сформулированы в терминах АО диаграммные правила для наблюдения ДКИ и ККИ, исходя из анализа прозрачности [41]. В этом случае выражение для функции Грина представляется в виде дроби, числитель которой P пропорционален минору матрицы гамильтониана молекулы с вычеркнутыми столбцом и строкой, которые соответствуют номерам атомов, соединенных с электродами. Если молекула соединяется с электродом одним атомом, этот минор содержит только параметры молекулы без учета матричных элементов взаимодействия молекулы с электродами. Таким образом, нули числителя $P(\varepsilon)$ как функции энергии ε и, соответственно, нули прозрачности определяются только структурой изолированной молекулы. В диаграммном методе Фейнмана функция $P(\varepsilon)$ представляется в виде суммы следующих диаграмм с весами: замкнутый путь, соединяющий электроды; парные петли, объединяющие два соседних атома; замкнутые петли, содержащие $n > 2$ атомов; изолированные атомы, которые имеют вес, равный энергии ε, отсчитанной от уровня π-электрона. Если функция $P(\varepsilon)$ пропорциональна ненулевой степени ε, то молекула будет демонстрировать ДКИ, в противном случае – нет. Однако, как показывает анализ работы [44], использование только ДКИ в качестве механизма переключения молекулярных транзисторов, даже если при этом имеет место очень высокий контраст прозрачности, не может обеспечить достаточную величину перепада токов в открытом и закрытом состояниях, необходимую для переключения следующих каскадов, т.е. такие транзисторы малопригодны для интеграции с целью создания вычислительных логических устройств.

В случае ККИ абсолютная величина туннельной прозрачности определяется произведением амплитуд молекулярной орбитали на узлах, контактирующих с электродами. В работах [45, 46] сформулированы «магические правила» для относительного отношения прозрачностей молекулы, соответствующих различным геометриям подключения (при неизменной величине матричных элементов, связывающих молекулу с электродами). Данные правила просты в случае, если энергия электрона равна нулю в системе отсчета, связанной с энергией π-орбитали углерода, а связь молекулы с электродом можно считать слабой. Функция Грина молекулы при этом есть просто матрица, обратная матрице гамильтониана. Для альтернированных углеводородов гамильтониан может быть записан через матрицу связности C вдвое меньшей размерности, описывающей взаимодействие помеченных и непомеченных узлов, а функция Грина выражается через матрицу M, обратную матрице C. Отношение прозрачностей определяется отношением квадратов элементов матрицы M, соответствующих различным геометриям присоединения. Для молекулы бензола, например, все элементы матрицы M равны 1 (в относительных единицах). Поэтому прозрачности в пара- и ортосоединениях равны (в приближении Хюккеля). Для молекулы антрантрена минимальное и максимальное значения элементов матрицы M равны уже 1 и 9 соответственно.

В настоящее время π-сопряженные ароматические соединения стали стандартным объектом для исследования ДКИ [28, 31, 36]. Однако в работе [29] на примере молекул на основе кремния теоретически и экспериментально показано, что ДКИ имеет место также в ветвящихся молекулах, содержащих только $sp3$-гибридизованные σ-связи. Этот результат имеет важное значение, поскольку транспорт через σ-орбитали может шун-

тировать проводимость π-орбиталей. В работе [29] показано, что туннельная прозрачность молекулы может быть меньше, чем прозрачность вакуумного промежутка, который молекула заполняет, т.е. продемонстрировано существование одномолекулярных интерференционных диэлектриков.

ДКИ представляет собой внутренне присущее любой циклической молекуле свойство, которое проявляется в конфигурации, содержащей узлы ветвления, обеспечивающие присоединение молекулы к электродам [47]. Вместе с тем наличие ДКИ следует ожидать также и в молекуле, имеющей точку ветвления, соединяющую основную молекулярную цепочку с отростком конечной длины. При этом волна, ответвляющаяся в отросток, отражается обратно и интерферирует с волной в основной цепочке. Простейшей физической моделью, описывающей подобную ситуацию, является модель Фано – Андерсона [48], схематически представленная на рис.4. ДКИ в этой модели возникает при определенной энергии, при которой амплитуды волн, распространяющихся по траекториям 1 и 2, гасят друг друга. В конфигурации рис.4 это происходит при энергии налетающего электрона, равной энергии атома (узла) *b*. Туннельная прозрачность при этом обращается строго в ноль (идеальный антирезонанс) [49]. При изменении энергии электрона разность фаз, соответствующих различным траекториям, также меняется и возможны переход к конструктивной интерференции и возникновение резонанса с идеальной прозрачностью. В модели на рис.4 резонанс имеет место при энергии электрона, равной энергии одного из уровней молекулы, образованной атомами *a* и *b*, с учетом сдвига уровней в результате взаимодействия с контактами. Если резонанс и антирезонанс расположены близко по энергии, то они образуют резонанс Фано [49], впервые описанный для сечения фотоионизации атома при наличии двух каналов: прямой ионизации и автоионизации через уровень квазистационарного состояния. Поскольку интерференция различных каналов при рассеянии носит универсальный характер, под резонансом Фано принято понимать любой резонанс с асимметричным профилем, который обеспечивается близко расположенными резонансом и антирезонансом [49]. Наличие отростка автоматически не означает наличие ДКИ. При сложной структуре отростка интерференция может носить как деструктивный, так и конструктивный характер. При этом правила идентификации типа интерференции в молекуле в терминах АО [39, 41] позволяют учесть влияние структуры бокового отростка на прозрачность. Так, например, ДКИ имеется в структуре, изображенной на рис.3, и отсутствует в структуре на рис.2,*а* [39]. ДКИ в разветвленных сопряженных полимерах продемонстрирована в ряде экспериментов [46, 50, 51].

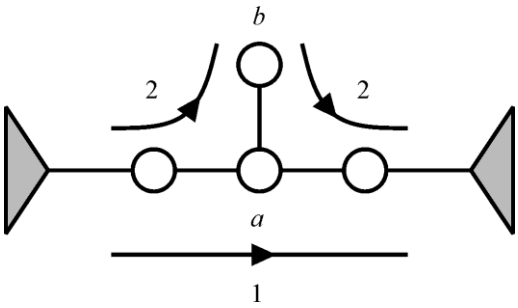


Рис.4. Модель Фано – Андерсена: 1 и 2 – интерферирующие траектории носителей заряда
Fig.4. Fano – Andersen model: 1 and 2 – the interfering trajectories of charge carriers

ДКИ тесно связана с таким физическим явлением, как связанные состояния в континууме (ССК), или непрерывный спектр. Существование ССК было предсказано еще на заре развития квантовой механики [52]. Нетрудно показать, что одно из необходимых условий формирования ССК требует обращения в ноль функции *P*, т.е. совпадает с условием наблюдения ДКИ. Туннельная прозрачность *T* по определению неотрицательна и меньше или равна единице. Ее величина определяется параметром Г, зависящим от квадрата модуля функции Грина и матричных элементов взаимодействия моле-

кулы с электродами. Таким образом, туннельную прозрачность можно представить в виде дроби

$$T = \Gamma^2 P^2 / D^2,$$

где D^2 – положительно определенный знаменатель.

По определению $D^2 \geq \Gamma^2 P^2$, и, следовательно, можно записать

$$D^2 = Q^2 + \Gamma^2 P^2,$$

где $Q(\varepsilon)$ – некоторая функция энергии.

В случае резонанса на квазистационарном уровне ε_0 (формула Брейта – Вигнера [53]) $P = 1$, $Q = \varepsilon - \varepsilon_0$ и $T(\varepsilon_0) = 1$, а параметр Γ определяет ширину квазистационарного уровня ε_0 и резонанса. В общем случае P зависит от энергии и, следовательно, от энергии зависит ширина резонанса. ССК возникает при одновременном обращении в ноль P и Q, т.е. ССК – это резонанс на уровне энергии с нулевой шириной. Поскольку амплитуда туннельной прозрачности представляет собой матрицу рассеяния системы S, то с формально математической точки зрения ССК соответствует полюсу матрицы рассеяния, расположенному на действительной оси энергии. При формировании ССК происходит слияние резонанса и антирезонанса, т.е. коллапс резонанса Фано. В работах [54, 55] в приближении сильной связи построена единая теория резонансов, антирезонансов и связанных состояний в континууме, на ее основе могут быть сформулированы правила дизайна молекулярных структур с заданными резонансными свойствами. Так, в работе [8] предложена новая модель интерференционного молекулярного транзистора, переключение которого происходит в результате спонтанного нарушения симметрии в открытой квантовой системе, связанного со слиянием резонансов и антирезонансов.

Наблюдение ДКИ требует высокого экспериментального искусства. Минимальное сопротивление одиночной молекулы определяется квантом сопротивления, т.е. велико. В высокоомных структурах повышается роль шумов. При этом для снижения сопротивления могут использоваться молекулярные слои, содержащие параллельно соединенные молекулы [56]. Поэтому измерение эффектов ДКИ на фоне шумов в одномолекулярных структурах с низкой проводимостью представляет собой сложную экспериментальную задачу, решить которую удалось лишь в последние годы [28, 30–32].

Оптоэлектронные свойства ветвящихся полимеров. Одно из наиболее широко обсуждаемых приложений разветвленных полимеров – системы для фотохимического преобразования солнечной энергии [57]. Антенна для сбора света представляет собой организованную многокомпонентную систему, в которой множество хромофорных молекулярных единиц поглощает падающий свет и затем направляет энергию возбуждения на общий акцепторный компонент. Большинство искусственных антенн представляет собой древовидные макромолекулы, обычно называемые дендримерами [58], которые характеризуются высокой степенью упорядоченности и возможностью содержать выбранные химические единицы в заранее определенных местах их структуры (рис.5). Улавливание света с помощью дендритного антенного устройства может быть полезно не только для преобразования солнечной энергии, но и для таких целей, как усиление сигнала в датчиках люминесценции, сенсибилизация фотоэлектрических элементов и спектральная концентрация энергии, или «молекулярная линза», [59]. В [60] сообщается, что синтезированы антенные системы из полипиридных комплексов Ru (II) и/или Os (II), содержащих до 22 металлических центров и имеющих дендритные структуры. В таких соединениях характер передачи энергии (например, от периферии к центру или от центра к периферии) можно контролировать с помощью соответствующего выбора различных металлов и лигандов.

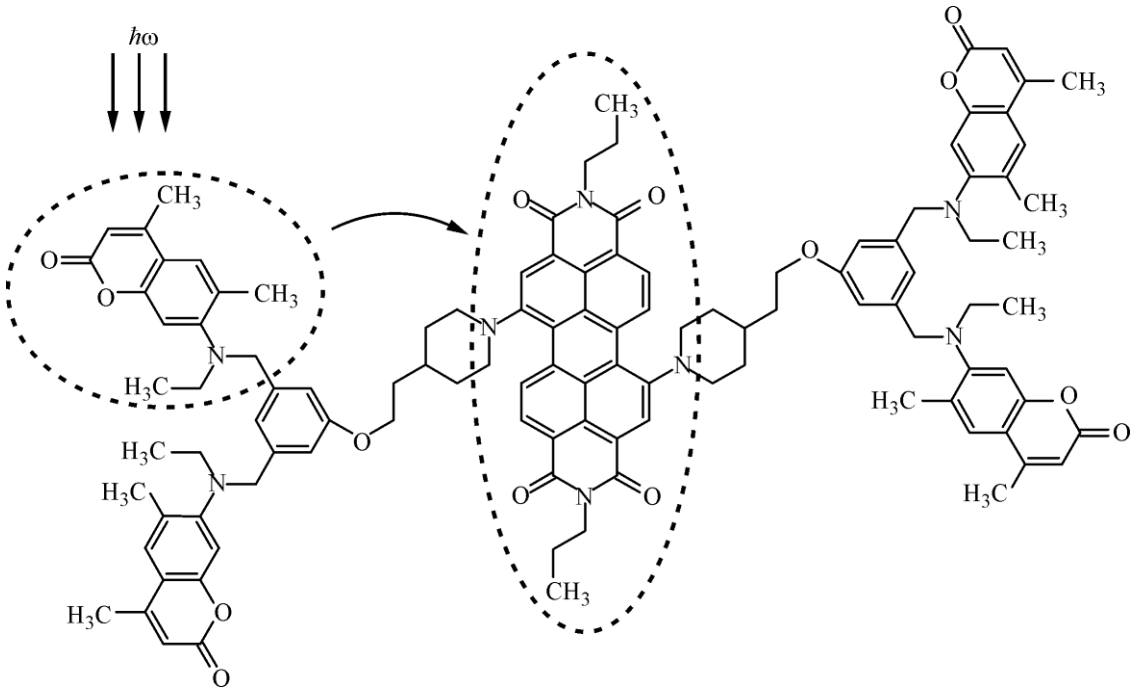


Рис.5. Схема переноса поглощенной световой энергии в дендримере с пириленовым ядром и ветвями, содержащими кумарин-2

Fig.5. Scheme of the absorbed light energy transfer in a dendrimer with a perylene core and branches containing coumarin-2 units

Основное требование к системе сбора света – способность поглощать свет. Если систему необходимо использовать для искусственного преобразования солнечной энергии, спектр поглощения ее компонентов должен охватывать значительную часть видимой спектральной области. Другим существенным свойством светопоглощающих элементов антенной системы является их химическая и фотохимическая стабильность. В антенной системе энергия возбуждения должна доставляться общему акцепторному компоненту, обычно расположенному в ядре дендримера (см. рис.5). Это подразумевает возникновение последовательности шагов передачи энергии вдоль заранее определенных направлений [61]. Чтобы иметь высокую эффективность сбора света, каждый этап переноса энергии должен успешно конкурировать с распадом возбужденного состояния, а также с другими процессами дезактивации возбужденного состояния (например, переносом электрона, образованием эксиплекса и эксимера). Образование эксимеров и эксиплексов обратимо, и эксимеры и эксиплексы иногда имеют широкую полосу излучения, которая всегда смещается к более низкой энергии по сравнению с излучением «мономера».

Возникновение передачи энергии требует электронных взаимодействий, и, следовательно, скорость передачи энергии уменьшается с увеличением расстояния. Из-за своей близости различные составляющие единицы дендримера могут легко взаимодействовать друг с другом. Взаимодействие также может происходить между компонентами и молекулами, расположенными в дендритных полостях или связанными с поверхностью дендримера. Для слабых взаимодействий передача энергии происходит по прыжковому механизму. В зависимости от типа электронного взаимодействия зависимость от расстояния может быть r^{-6} (механизм Форстера) или e^{-r} (механизм Декстера) [62]. В обоих случаях передача энергии происходит, когда спектр излучения донора перекрывает спектр поглощения акцептора. Для сильных электронных взаимодействий

возбуждение может быть делокализовано на несколько единиц, так же как в природных антенных системах.

Преобразование частоты излучения является неотъемлемой характеристикой большинства дендримеров, собирающих свет. Однако в некоторых случаях преобразование частоты света становится важной функцией, выполняемой системой [63]. Это происходит, когда существует большая разница частот между поглощенным и испускаемым излучением и, конечно, когда испускаемый свет имеет более высокую частоту, чем поглощенный (преобразование с повышением частоты). Рассмотрим в качестве примера показанный на рис.5 дендример, содержащий пириленовое ядро, которое имеет полосы поглощения при 685 и 435 нм и полосу излучения при 770 нм. Ветви дендримера содержат звенья кумарина-2, которые показывают полосу поглощения при 345 нм и полосу излучения при 445 нм, перекрывающую полосу поглощения более высокой энергии перилена. В результате возникает эффективный (99 %) резонансный перенос энергии и наблюдается сенсибилизированное излучение перилена. Также в литературе обсуждаются системы, в которых происходят двухфотонные процессы поглощения и преобразования световой энергии.

Среди ветвящихся фотореактивных полимеров особое место занимают фотохромные материалы [64]. Эти полимеры успешно сочетают физико-химические свойства макромолекулярных соединений (способны образовывать пластмассы, эластомеры, пленки и волокна) с мезоморфными свойствами жидких кристаллов и фоточувствительностью хромофоров, химически или нековалентно включенных в состав полимера [65]. Получены разветвленные гребнеобразные макромолекулы, содержащие мезогенные группы, присоединенные к основной цепи, а также дендримеры с мезогенными группами, распределенными по всему объему макромолекул или присоединенными к периферии [66]. Большинство жидкокристаллических полимеров содержит фотоактивные группы, такие как производные фрагментов азобензола, спиропирана и циннамата. Фотохромные группы играют роль эффективных «переключателей», способных резко изменять свою конфигурацию и конформацию при фотоизомеризации, фотоциклизации и других реакциях. Несмотря на большое разнообразие органических фотохромных соединений с низкой молярной массой, количество фотохромных полимеров ограничено. Это, вероятно, связано с трудностями их синтеза и с очевидным отсутствием тесного сотрудничества между учеными, работающими в области фотохимии и науки о полимерах.

Фотохромизм обычно определяется как обратимое преобразование химического вещества, индуцированное электромагнитным излучением, между двумя состояниями *A* и *B*, дающими наблюдаемое поглощение света в различных областях спектра. Фотофизические оптически активные среды характеризуются быстрыми фотоиндуцированными изменениями электронной плотности, а именно заполнением возбужденных электронных состояний молекул. Под действием лазерного излучения можно наблюдать появление дополнительного поглощения, которое обеспечивается триплет-триплетными переходами. Однако из-за кратковременного поглощения в фотофизических средах (до 5 с) их применение в информатике ограничено. Они в основном используются для записи динамических голограмм. В фотохромных фотохимических средах под действием света происходят внутри- и межмолекулярные перегруппировки, приводящие к образованию новых стабильных или нестабильных химических соединений. Среди обратимых фотохимических реакций органических соединений следует выделить цис-транс-изомеризацию, обусловленную затрудненным вращением фрагментов вокруг двойной связи (азосоединения, олефины), изомеризацию валентности, обуслов-

ленную перераспределением *p*- и *s*-электронов в молекулах (фульгиды, фульгимиды), фотоиндуцированные гетеро- и гомолитические разрывы валентных связей (спиропираны), фотодимеризацию, фотоциклизацию и др. Выраженная способность органических соединений к самоорганизации и образованию различных упорядоченных надмолекулярных структур под действием внешних полей позволяет разрабатывать новые материалы с локальными свойствами, контролируемыми оптическими методами. Эти материалы могут быть использованы в качестве эффективных сред для волноводов, лазерных дисков, переключателей света, оптических запоминающих устройств для электроники, электрооптики и голографии.

Заключение. Современная физика электронных свойств полимеров и молекулярных структур представляет собой обширную область науки и техники. Настоящий обзор следует рассматривать как краткое введение в один из разделов этого направления, связанный с электронными свойствами ветвящихся структур, которые являются неотъемлемым элементом молекулярного конструирования – аналога межсоединений в электронике. Так, узел ветвления возникает при соединении ароматичной молекулы с внешней цепью. Вместе с тем, как показано в работе [26], точка ветвления представляет собой нетривиальный топологический объект, который приводит к формированию особого типа локализованных состояний. Таким образом, ветвящиеся структуры интересны как с точки зрения фундаментальных исследований, так и в плане практических приложений в молекулярной электронике.

Квантовые интерференционные эффекты в ветвящихся молекулах – активно формирующееся направление, имеющее своей основной задачей поиск молекулярных структур, реализующих переключающие функции. В обзоре кратко представлены результаты, связанные с транзисторными приложениями, но рассмотрены основные физические идеи и механизмы. Использование квантовых интерференционных эффектов – это качественно новый этап в молекулярной электронике, выходящий за рамки традиционного подхода, описанного в работе Авирама – Ратнера и основанного на воспроизведении классических приборов электроники на молекулярном уровне [6].

За рамками обзора остался наиболее известный класс ветвящихся структур – дендримеры. Они находят все более широкое применение в катализе и технологиях наноматериалов, сенсорике, фармацевтике (адресная доставка лекарств) и др. [67]. Однако электронные свойства дендримеров, особенно связанные с π-π-взаимодействиями, в настоящее время мало исследованы [68]. В связи с этим дизайн электронной структуры в молекулах с древовидной топологией представляет значительный интерес.

Литература

1. ***Heeger A.J.*** Nobel Lecture: Semiconducting and metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials // Rev. Mod. Phys. – 2001. – Vol. 73. – Iss. 3. – P. 681–700.

2. ***Feringa B.L.*** The art of building small: from molecular switches to motors (Nobel Lecture) // Angew. Chem. Int. Ed. – 2017. – Vol. 56. – Iss. 37 – P. 11060–11078.

3. ***Petty M.C.*** Molecular electronics: from principles to practice. – Wiley-Interscience, 2007. – 544 p.

4. Molecular architectonics: The third stage of single molecule electronics (Advances in atom and single molecule machines) / ***Ed. by Ogawa Takuji.*** – Springer, 2017. – 539 p.

5. ***Cuevas J.C., Scheer E.*** Molecular electronics: An introduction to theory and experiment. – World Scientific, 2010. – 724 p.

6. ***Joachim C., Gimzewski J.K., Aviram A.*** Electronics using hybrid-molecular and mono-molecular devices // Nature. – 2000. – Vol. 408. – P. 541–548.

7. ***Li Y., Mol J.A., Benjamin S.C., Briggs G.A.D.*** Interference-based molecular transistors // Sci. Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 33686

8. ***Gorbatsevich A.A., Krasnikov G.Y., Shubin N.M.*** PT-symmetric interference transistor // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – P. 15780.

9. Printable electronics: flexibility for the future / ***M.A. Leenen, V. Arning, H. Thiem et al.*** // Phys. Stat. Sol. A. – 2009. – Vol. 206. – P. 588–597.

10. ***Botiz I., Darling S.B.*** Optoelectronics using block copolymers // Materials Today. – 2010. – Vol. 13. – Iss. 5 – P. 42–51.

11. Large Area and Flexible Electronics / ***Ed. by Caironi M., Noh Y.-Y.*** – 2 ed. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. 592 p.

12. Introduction to organic electronic and optoelectronic materials and devices / ***Ed. by Sun S.-S., Dalton L.R. –*** 2 ed. – CRC Press, 2016. – 1091 p.

13. ***Kandori H., Shichida Y., Yoshizawa T.*** Photoisomerization in rhodopsin // Biochemistry. – 2001. – Vol. 66. – No. 11. – P. 1197–1209.

14. ***Bakhshi A.K., Bhalla G.*** Electrically conducting polymers: Materials of the twentyfirst century // Journal of Scientific & Industrial Research. – 2004. – Vol. 63. – P. 715–728.

15. ***Бразовский С.А.*** Электронные возбуждения в состоянии Пайерлса – Фрелиха // Письма в ЖЭТФ. – 1978. –Т. 28. – № 10. – С. 656–660.

16. ***Su W.P., Schrieffer J.R., Heeger A.J.*** Solitons in polyacetylene // Phys. Rev. Lett. – 1979. – Vol. 42. – Iss. 25. – P. 1698–1701.

17. ***Heeger A.J., Kivelson S., Schrieffer J.R., Su W.-P.*** Solitons in conducting polymers // Rev. Mod. Phys. – Vol. 60. – Iss. 3. – P. 781–850.

18. ***Magoga M., Joachim C.*** Conductance of molecular wires connected or bonded in parallel // Phys. Rev. B. – 1999. – Vol. 59. – No. 24. – P. 16011–16021.

19. ***Bässler H., Köhler A.*** Charge transport in organic semiconductors. In: Metzger R. (eds). Unimolecular and Supramolecular Electronics I. Topics in Current Chemistry. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – 308 p.

20. ***Fröhlich H.*** On the theory of superconductivity: the one-dimensional case // Proc. Roy. Soc. London A. – 1954. – Vol. 223. – P. 296.

21. ***Пайерлс Р.*** Квантовая теория твердых тел: пер. с англ. А.А. Абрикосова. – М.: Иностранная литература, 1956. – 259 с.

22. ***Longuet-Higgins H.C., Salem L.*** The alternation of bond lengths in long conjugated chain molecules // Proc. Roy. Soc. London A. – 1959. – Vol. 251. – P. 172.

23. ***Pople J.A., Walmsley S.H.*** Bond alternation defects in long polyene molecules // Molec. Phys. – 1962. – Vol. 5. – P. 15–20.

24. ***Овчинников А.А., Украинский И.И., Квенцель Г.Ф.*** Теория одномерных моттовских полупроводников и электронная структура длинных молекул с сопряженными связями // УФН. – 1972. – Т. 108. – С. 81–111.

25. ***Hudson B.S., Kohler B.E.*** A low-lying weak transition in the polyene α,ω-diphenyloctatetraene // Chem. Phys. Lett. – 1972. – Vol. 14. – Iss. 3. – P. 299–304.

26. ***Горбацевич А.А., Журавлев М.Н.*** Локализованные электронные состояния в ветвящихся молекулах полиацетилена // Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 100. – №. 9. – С. 654–658.

27. ***Горбацевич А.А., Журавлев М.Н., Катаева Т.С., Кобрянский В.М.*** Локализованные электроны и фононы в ветвящихся молекулах полиацетилена // Российские нанотехнологии. – 2016. – Т. 11. – № 11–12. – С. 121–127.

28. Controlling and observing sharp-valleyed quantum interference effect in single molecular junctions / ***B. Huang, X. Liu, Y. Yuan et al.*** // J. Am. Chem. Soc. – 2018. – Vol. 140. – Iss. 50. – P. 17685–17690.

29. Comprehensive suppression of single-molecule conductance using destructive sigma-interference ***M.H. Garner, H. Li, Y. Chen et al.*** // Nature. – 2018. – Vol. 558. – Iss. 7710. – P. 415–419.

30. Anti-resonance features of destructive quantum interference in single-molecule thiophene junctions achieved by electrochemical gating / ***J. Bails, A. Daaoub, S. Sangtarash et al.*** // Nature Materials. – 2019. – Vol. 18. – Iss. 4 – P. 364–369.

31. ***Liu J., Huang X., Wang F., Hong W.*** Quantum interference effects in charge transport through single-molecule junctions: detection, manipulation, and application // Acc. Chem. Res. – 2019. – Vol. 52. – Iss. 1. – P. 151–160.

32. Gate c ontrolling of quantum interference and direct observation of anti-resonances in single molecule charge transport / ***Y. Li, M. Buerkle, G. Li et al.*** // Nature Materials. – 2019. – Vol. 18. – Iss. 4. – P. 357–363.

33. ***Rincon J., Hallberg K., Aligia A.A., Ramasesha S.*** Quantum interference in coherent molecular conductance // Phys. Rev. Lett. – 2009. – Vol. 103. – P. 266807.

34. ***Lambert C.J.*** Basic concepts of quantum interference and electron transport and in single-molecule electronics // Chem. Soc. Rev. – 2015. – Vol. 44. – Iss. 4. – P. 875–888.

35. ***Горбацевич А.А., Журавлёв М.Н., Капаев В.В.*** Коллапс резонансов в полупроводниковых гетероструктурах как переход с нарушением симметрии в открытой квантовой системе // ЖЭТФ. – 2008. – Т.134. – Вып. 2 (8). – С. 338–353.

36. ***Nozaki D., Schmidt W. G.*** Current density analysis of electron transport through molecular wires in open quantum systems // Journal of Computational Chemistry. – 2017. – Vol. 38. – Iss.19. – P. 1685–1692.

37. Promising anchoring groups for single-molecule conductance measurements / ***V. Kaliginedi, A.V. Rudnev, P. Moreno-García et al.*** // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2014. – Vol. 16. – Iss. 43. – P. 23529–23539.

38. ***Liu J., Huang X., Wang F., Hong W.*** Quantum interference effects in charge transport through single-molecule junctions: detection, manipulation, and application // Acc. Chem. Res. – 2019. – Vol. 52. – Iss. 1. – P. 1151–1160.

39. Illusory Connection between cross-conjugation and quantum interference / ***K.G.L. Pedersen, A. Borges, P.Hedegard et al.*** // J. Phys. Chem. C. – 2015. – Vol. 119. – Iss. 48. – P. 26919–26924.

40. ***Yoshizawa K., Tada T., Staykov A.*** Orbital view of the electron transport in molecular devices // J. Am. Chem. Soc. – 2008. – Vol. 130. – Iss. 29. – P. 9406–9413.

41. ***Markussen T., Stadler R., Thygesen K.S.*** The Relation between structure and quantum interference in single molecule junctions // Nano Lett. – 2010. – Vol. 10. – Iss. 10. – P. 4260-4265.

42. ***Dewar M.J.S.*** The molecular orbital theory of organic chemistry. – N. Y.:, McGraw-Hill, 1969. – 484 p.

43. Breakdown of interference rules in azulene, a nonalternat hydrocarbon / ***J. Xia, B. Capozzi, S. Wei et al.*** // Nano Lett. – 2014. – Vol. 14. – P. 2941–2945.

44. ***Горбацевич А.А., Шубин Н.М.*** Квантовые логические вентили // УФН. – 2018. – Т. 188. – № 11. – С. 1209–1225.

45. Magic ratios for connectivity-driven conductance of graphene-like molecules / ***Y. Geng, S. Sangtarash, C. Huang et al.*** // J. Am. Chem. Soc. – 2015. – Vol. 137. – P. 4469–4476.

46. ***Liu S.-X., Lambert C.J.A.*** Magic ratio rule for beginners: A chemist's guide to quantum interference in molecules // Chem. Eur. J. – 2018. – Vol. 24. – P. 4193–4201.

47. Qunatum interference in acyclic systems: conductance of cross-conjugated molecules / ***G.C. Solomon, D.Q. Andrews, R.H. Goldsmith et al.*** // J. Am. Chem. Soc. – 2008. – Vol. 130. – P. 17301–17308.

48. ***Mahan D.*** Many particle physics. – N. Y., Kluwer Academic, 2000. – 785 p.

49. ***Miroshnichenko F.S., Kivshar Y.S.*** Fano resonances in nanoscale structures // Rev. Mod. Phys. – 2010. – Vol. 82. – P. 2257.

50. Direct observation of large quantum interfference effect in anthraquinone solid-state junctions / ***A. Rabache, J. Chaste, P. Petit et al.*** // J. Am. Chem. Soc. – 2013. – Vol. 135. – P. 10218–10221.

51. Large negative differential conductance in single-molecule break junctions / ***M.L. Perrin, R. Frisenda, M. Koole et al.*** // Nature Nanotechnology. – 2014. – Vol. 9. – P. 830–834.

52. Bound states in the continuum / ***C.W. Hsu, B. Zhen, A.D. Stone et al.*** // Nature Review Materials. – 2016. – Vol.1. – Iss. 9. – P. 1–13.

53. ***Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.*** Квантовая механика (нерелятивистская теория). – 6-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2004. – Т. III. – 800 с.

54. ***Gorbatsevich A.A., Shubin N.M.*** Coalescence of resonances in dissipationless resonant tunneling structures and PT-symmetry breaking // Annals of Physics. – 2017. – Vol. 376. – P. 353–371.

55. ***Gorbatsevich A.A., Shubin N.M.*** Unified theory of resonances and bound states in the continuum in Hermitian tight-binding models // Physical Review B. – 2017. – Vol. 96. – No. 20. – P. 205441.

56. Quantum interference mediated vertical molecular tunneling transistors / ***M. Carlotti, Y. Liu, P. Wang et al.*** // Science Advances. – 2018. – Vol. 4. – No. 10 – P. eaat8237.

57. ***Scholes G.D., Fleming G.R., Olaya-Castro A., van Grondelle R.*** Lessons from nature about solar light harvesting // Nature Chemistry. – 2011. – Vol. 3 – P. 763–774.

58. ***Balzani V., Ceroni P., Maestri M., Vincinelli V.*** Light-harvesting dendrimers // Curr. Opin. Chem. Biol. – 2003. – No. 7. – P. 657–665.

59. ***Hecht S., Fréchet J.M.J.*** Dendritic encapsulation of function: applying nature’s site isolation principle from biomimetics to material science // Angew Chem Int Ed Engl. – 2001. – Vol. 40. – P. 74–91.

60. ***Archut A., Vögtle G.*** Functional cascade molecules // Chem. Soc. Rev. – 1998. – Vol. 27. – P. 233–240.

61. ***Bradshaw D.S., Andrews D.L.*** Mechanisms of light energy harvesting in dendrimers and hyperbranched polymers // Polymers. – 2011. – Vol. 3. – Iss. 4. – P. 2053–2077.

62. ***Olaya-Castro A., Scholes G.D.*** Energy transfer from Förster–Dexter theory to quantum coherent light-harvesting // International Reviews in Physical Chemistry. – 2011. – Vol. 30. – No. 1. – P. 49–77.

63. ***Serin J.M., Brousmiche D.W., Fréchet J.M.J.*** A FRET-based ultraviolet to near-infrared frequency converter // Journal of the American Chemical Society. – 2002. – Vol. 124. – Iss. 40. – P. 11848–11849.

64. ***Marcos M., Martín-Rapún R., Omenat A., Serrano J.L.*** Highly congested liquid crystal structures: dendrimers, dendrons, dendronized and hyperbranched polymers // Chem. Soc. Rev. – 2007. – Vol. 36. – P. 1889-1901.

65. ***Saez I.M., Goodby J.W.*** Supermolecular liquid crystals // J. Mater. Chem. – 2005. – Vol. 15. – P. 26–40.

66. ***Lam J.W.Y., Tang B.Z.*** Liquid-crystalline and light-emitting polyacetylenes // J. Polym. Sci. A Polym. Chem. – 2003. – Vol. 41. – Iss. 17. – P. 2607–2629.

67. Dendrimers and other dendritic polymers / ***Ed. by J.M. Frechet, D.A. Tomalia.*** – N.Y.: Wiley & Sons, 2001. – 688 p.

68. ***Astruc D., Boisselier E., Ornelas C.*** Dendrimers designed for functions: from physical, photophysical, and supramolecular properties to applications in sensing, catalysis, molecular electronics, and nanomedicine // Chem. Rev. – 2010. – Vol. 110. – Iss. 4. – P. 1857–1959.

Поступил в редакцию 27.05.2019 г.; после доработки 27.05.2019 г.; принят к публикации 18.06.2019 г.

Горбацевич Александр Алексеевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 53), заведующий кафедрой квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aagor137@mail.ru

Журавлёв Максим Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), maxim@org.miet.ru

References

1. Heeger Alan J. Nobel Lecture: Semiconducting and metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials. *Rev. Mod. Phys*., 2001, vol. 73, iss. 3, pp. 681–700.

2. Feringa Ben L. The art of building small: from molecular switches to motors (Nobel Lecture). *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017, vol. 56, iss. 37, pp. 11060–11078.

3. Petty Michael C. *Molecular electronics: from principles to practice*. Wiley-Interscience, 2007. 544 p.

4. *Molecular architectonics: the third stage of single molecule electronics (advances in atom and single molecule machines)*. Ed. by Ogawa Takuji. Springer, 2017. 539 p.

5. Cuevas J.C., Scheer E. *Molecular electronics: an introduction to theory and experiment.* World Scientific, 2010. 724 p.

6. Joachim C., Gimzewski J.K., Aviram A. Electronics using hybrid-molecular and mono-molecular devices. *Nature*. 2000, vol. 408, pp. 541–548.

7. Li Y., Mol J.A., Benjamin S.C., Briggs G.A.D. Interference-based molecular transistors. *Sci. Reports*, 2016, vol. 6, p. 33686.

8. Gorbatsevich A.A., Krasnikov G.Y., Shubin N.M. PT-symmetric interference transistor. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, p. 15780.

9. Leenen M. A., Arning V., Thiem H., Steiger J., Anselmann R. Printable electronics: flexibility for the future. *Phys. Stat. Sol. A*, 2009, vol. 206, pp. 588–597.

10. Botiz I., Darling S.B. Optoelectronics using block copolymers. *Materials Today*, 2010, vol. 13, iss. 5, pp. 42–51.

11. *Large area and flexible electronics*. Ed. by Caironi M., Noh Y.-Y. 2 ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. 592 p.

12. *Introduction to organic electronic and optoelectronic materials and devices.* Ed. by Sun S.-S., Dalton L.R. 2 ed. CRC Press, 2016. 1091 p.

13. Kandori H., Shichida Y., Yoshizawa T. Photoisomerization in Rhodopsin. *Biochemistry*, 2001, vol. 66, no. 11, pp. 1197–1209.

14. Bakhshi A.K., Bhalla G. Electrically conducting polymers: Materials of the twentyfirst century. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2004, vol. 63, pp. 715–728.

15.Brazovskii S.A. Electronic excitations in the Peierls – Frohlich state. *JETP Lett.*, 1978, vol. 28, iss. 10, pp. 606–610.

16. Su W.P., Schrieffer J.R., Heeger A.J. Solitons in Polyacetylene. *Phys. Rev. Lett.*, 1979 vol. 42, iss. 25, pp. 1698–1701.

17. Heeger A.J., Kivelson S., Schrieffer J.R., Su W.-P. Solitons in conducting polymers. *Rev. Mod. Phys.*, vol. 60, iss. 3, pp. 781–850.

18. Magoga M., Joachim C. Conductance of molecular wires connected or bonded in parallel. *Phys. Rev. B.*, 1999, vol. 59, no. 24, pp. 16011–16021.

19. Bässler H., Köhler A. *Charge Transport in Organic Semiconductors*. In: Metzger R. (eds). Unimolecular and Supramolecular Electronics I. Topics in Current Chemistry. Berlin, Heidelberg. Springer, 2011. 308 p.

20. Fröhlich H. On the theory of superconductivity: the one-dimensional case. *Proc. Roy. Soc. London A.*, 1954, vol. 223, p. 296.

21.Peierls R.E. *Quantum theory of solids*. Oxford Clarendon Press, 1955. 229 p.

22. Longuet-Higgins H.C., Salem L. The alternation of bond lengths in long conjugated chain molecules. *Proc. Roy. Soc. London A*, 1959, vol. 251, p. 172.

23. Pople J.A., Walmsley S.H. Bond alternation defects in long polyene molecules. *Molec. Phys.*, 1962, vol. 5, pp. 15–20.

24.Ovchinnikov A. A., Ukrainskii I. I., Kventsel' G. V. Theory of one-dimensional mott semiconductors and the electronic structure of long molecules having conjugated bonds. *Sov. Phys. Usp.*, 1973, vol. 15, pp. 575–591.

25. Hudson B.S., Kohler B.E. A low-lying weak transition in the polyene α,ω-diphenyloctatetraene. *Chem. Phys. Lett.*, 1972, vol. 14, iss. 3, pp. 299–304.

26.Gorbatsevich A.A., Zhuravlev M.N. Localized electronic states in branching polyacetylene molecules. *JETP Lett.*, 2014, vol. 100, iss. 9, pp. 576–580.

27.Gorbatsevich A.A., Zhuravlev M.N., Kataeva T.S., Kobryanskii V.M. Localized electrons and phonons in branched polyacetylene molecules. *Nanotechnol. Russ*., 2016, vol. 11, iss. 11-12, pp. 820–829.

28. Huang B., Liu X., Yuan Y., Hong Z.-W., Zheng J.-F., Pei L.-Q., Shao Y., Li J.-F., Zhou X.-S., Chen J.-Z. Controlling and observing sharp-valleyed quantum interference effect in single molecular junctions. J. *Am. Chem. Soc*., 2018, vol. 140, iss. 50, pp. 17685–17690.

29. Garner M.H., Li H., Chen Y., Su T.A., Shangguan Z., Paley D.W., Liu T., Ng F., Li H., Xiao S. Comprehensive suppression of single-molecule conductance using destructive sigma-interference. *Nature*, 2018, vol. 558, iss.7710, pp. 415–419.

30. Bails J., Daaoub A., Sangtarash S., Li X., Tang Y., Zou Q., Sadeghi H., Liu S., Huang X., Tan, Z. Anti-resonance features of destructive quantum interference in single-molecule thiophene junctions achieved by electrochemical gating. *Nature Materials*, 2019, vol. 18, iss. 4, pp. 364–369.

31. Liu J., Huang X., Wang F., Hong W. Quantum Interference Effects in Charge Transport through Single-Molecule Junctions: Detection, Manipulation, and Application. *Acc. Chem. Res.*, 2019, vol. 52, iss. 1, pp. 151–160.

32. Li Y., Buerkle M., Li G., Rostamian A., Wang H., Wang Z., Bowler D. R., Miyazaki T., Xiang L., Asai Y. Gate controlling of quantum interference and direct observation of anti-resonances in single molecule charge transport. *Nature Materials*, 2019, vol. 18, iss. 4, pp. 357–363.

33. Rincon J., Hallberg K., Aligia A.A., Ramasesha S. Quantum interference in Coherent Molecular Conductance. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, vol. 103, p. 266807.

34. Lambert C.J. Basic concepts of quantum interference and electron transport and in single-molecule electronics. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, vol. 44, iss. 4, pp. 875–888.

35.Gorbatsevich A.A., Zhuravlev M.N., Kapaev V.V. Collapse of resonances in semiconductor heterostructures as a transition with symmetry breaking in an open quantum system. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2008, vol. 107, iss. 2, pp. 288–301.

36. Nozaki D., Schmidt W. G. Current density analysis of electron transport through molecular wires in open quantum systems. *Journal of Computational Chemistry*, 2017, vol. 38, iss. 9, pp. 1685–1692.

37. Kaliginedi V., Rudnev A. V., Moreno-García P., Baghernejad M., Huang C., Hong W., Wandlowskia T. Promising anchoring groups for single-molecule conductance measurements. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014, vol. 16, iss. 43, pp. 23529–23539.

38. Liu J., Huang X., Wang F., Hong W. Quantum Interference Effects in Charge Transport through Single-Molecule Junctions: Detection, Manipulation, and Application. *Acc. Chem. Res.*, 2019, vol. 52, iss.1, pp.1151–1160.

39. Pedersen K.G.L., Borges A., Hedegard P., Solomon G.C., Strange M. Illusory connection between cross-conjugation and quantum interference. *J. Phys. Chem. C*, 2015, vol. 119, iss. 48, pp. 26919–26924.

40. Yoshizawa K., Tada T., Staykov A. Orbital view of the electron transport in molecular devices. *J. Am. Chem. Soc.*, 2008, vol. 130, iss. 29, pp. 9406–9413.

41. Markussen T., Stadler R., Thygesen K.S. The Relation between Structure and Quantum Interference in Single Molecule Junctions. *Nano Lett.*, 2010, vol. 10, iss. 10, pp. 4260–4265.

42. Dewar M.J.S. *The molecular orbital theory of organic chemistry*. N.Y., McGraw-Hill, 1969. 484 p.

43. Xia J., Capozzi B., Wei S. et. al. Breakdown of interference rules in azulene, a nonalternat hydrocarbon. *Nano Lett.*, 2014, vol. 14, pp. 2941–2945.

44.Gorbatsevich A. A., Shubin N. M. Quantum logic gates. *Phys. Usp.*, 2018, vol. 61, pp. 1100–1115.

45. Geng Y., Sangtarash S., Huang C. et. al. Magic ratios for connectivity-driven conductance of graphene-like molecules. *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, vol. 137, pp. 4469–4476.

46. Liu S.-X., Lambert C. J. A Magic Ratio Rule for Beginners: A Chemist's Guide to Quantum Interference in Molecules. *Chem. Eur. J.*, 2018, vol. 24, pp. 4193–4201.

47. Solomon G.C., Andrews D.Q., Goldsmith R.H. et. al. Qunatum interference in acyclic systems: conductance of cross-conjugated molecules. *J. Am. Chem. Soc.*, 2008, vol. 130, pp. 17301–17308.

48. Mahan D. *Many particle physics*. N.Y., Kluwer Academic, 2000. 785 p.

49. Miroshnichenko F. S., Kivshar Y. S. Fano resonances in nanoscale structures. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, vol. 82, p. 2257.

50. Rabache A., Chaste J., Petit P. et.al. Direct observation of large quantum interfference effect in anthraquinone solid-state junctions. *J. Am. Chem. Soc.*, 2013, vol. 135, pp. 10218–10221.

51. Perrin M. L., Frisenda R., Koole M. et. al. Large negative differential conductance in single-molecule break junctions. *Nature Nanotechnology*, 2014, vol. 9, pp. 830–834.

52. Hsu C. W., Zhen B., Stone A. D.,Joannopoulos J. D., Soljacic M. Bound states in the continuum. *Nature Review Materials*, 2016, vol.1, iss. 9, pp. 1–13.

53. Landau L.D., Lifshitz L.M. *Quantum mechanics: non-relativistic theory.* 3rd Edition. Butterworth-Heinemann, 1981. 689 p.

54. Gorbatsevich A.A., Shubin N.M. Coalescence of resonances in dissipationless resonant tunneling structures and PT-symmetry breaking. *Annals of Physics*, 2017, vol. 376, pp. 353–371.

55. Gorbatsevich A.A., Shubin N.M. Unified theory of resonances and bound states in the continuum in Hermitian tight-binding models. *Physical Review B,* 2017, vol. 96, no. 20, pp. 205441.

56. Carlotti M., Liu Y., Wang P., Grace I. M., Feng Z., Wang Y., Zhao Z., Ding M., Xu X., Wang C., Lee S.-J., Huang Y., Chiechi R.C., Lambert C.J., Duan X. Quantum interference mediated vertical molecular tunneling transistor. *Science Advances*, 2018, vol. 4, no. 10, p. eaat8237.

57. Scholes G.D., Fleming G R., Olaya-Castro A., van Grondelle R. Lessons from nature about solar light harvesting. *Nature Chemistry*, 2011, vol. 3, pp. 763–774.

58. Balzani V., Ceroni, P., Maestri M., Vincinelli V. Light-harvesting dendrimers. *Curr. Opin. Chem. Biol.*, 2003, no. 7, pp. 657–665.

59. Hecht S., Fréchet J.M.J. Dendritic encapsulation of function: applying nature's site isolation principle from biomimetics to material science. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl*., 2001, vol. 40, pp. 74–91.

60. Archut A., Vögtle G. Functional cascade molecules. *Chem. Soc. Rev.*, 1998, vol. 27, pp. 233–240.

61. Bradshaw D.S., Andrews D.L. Mechanisms of light energy harvesting in dendrimers and hyperbranched polymers. *Polymers*, 2011, vol. 3, iss. 4, pp. 2053–2077.

62. Olaya-Castro A., Scholes G.D. Energy transfer from Förster–Dexter theory to quantum coherent light-harvesting. *International Reviews in Physical Chemistry*. 2011, vol. 30, no. 1, pp. 49–77.

63. Serin J.M., Brousmiche D.W., Fréchet J.M.J. A FRET-based ultraviolet to near-infrared frequency converter. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, vol. 124, iss. 40 pp. 11848–11849.

64. Marcos M., Martín-Rapún R., Omenat A., Serrano J.L. Highly congested liquid crystal structures: dendrimers, dendrons, dendronized and hyperbranched polymers. *Chem. Soc. Rev.*, 2007, vol. 36, pp. 1889–1901.

65. Saez I. M., Goodby J. W. Supermolecular liquid crystals. *J. Mater. Chem.*, 2005, vol. 15, pp. 26–40.

66. Lam J.W.Y., Tang B.Z. Liquid-crystalline and light-emitting polyacetylenes. *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.*, 2003, vol. 41, iss.17, pp. 2607–2629.

67. *Dendrimers and other dendritic polymers*. Ed. by J.M. Frechet, D.A. Tomalia. N.Y., Wiley & Sons, 2001. 688 p.

68. Astruc D., Boisselier E., Ornelas C. Dendrimers designed for functions: from physical, photophysical, and supramolecular properties to applications in sensing, catalysis, molecular electronics, and nanomedicine. *Chem. Rev.*, 2010, vol. 110, iss. 4, pp. 1857–1959.

Received 27.05.2019; Revised 27.05.2019; Accepted 18.06.2019.

Information about the authors:

Alexander A. Gorbatsevich – Correspondent Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Scientist of Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninskiy ave., 53), Head of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aagor137@mail.ru

Maxim N. Zhuravlev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), maxim@org.miet.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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 621.357.7 **DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-459-468**

Исследование процесса электроосаждения сплава олово – свинец с высоким содержанием свинца

А.В. Любимов[1], А.Г. Борисов[2], Е.П. Корчагин[2], А.И. Козлитин[3], Н.Г. Осипенкова[2]

[1]НПП «Оптические и электронные комплексы и системы», г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[3]ФГУП «Научно-исследовательский институт физических проблем имени Ф.В. Лукина», г. Москва, Россия

opteks2008@yandex.ru

В процессе изготовления многокристальных модулей на основе бескорпусных ИС с матричным расположением контактных площадок в связи с большим количеством последовательно проводимых операций пайки температура плавления припоя на первой операции должна быть не ниже 270 °С. При большом количестве контактных площадок малых геометрических размеров и значительном расстоянии между ними формирование слоя припоя заданной толщины возможно в основном только электроосаждением. В работе приведены результаты исследования процесса электроосаждения сплава олово – свинец с высоким содержанием свинца (более 80 % по массе) для формирования слоя припоя с температурой плавления более 270 °С, предназначенного для монтажа кристаллов с матричным расположением контактных площадок в технологии изготовления многокристалльных модулей. Предложен состав фторборатного электролита, обеспечивающий получение заданного химического состава сплава. Установлена зависимость химического состава сплава от плотности тока при его формировании. Определено значение оптимальной плотности тока, равное (1–1,2) А/дм^2. При такой плотности тока формируются плотные мелкозернистые слои с температурой плавления около 290–295 °С.

Ключевые слова: сплав олово – свинец; электроосаждение; фторборатный электролит

Для цитирования: Исследование процесса электроосаждения сплава олово – свинец с высоким содержанием свинца / А.В. Любимов, А.Г. Борисов, Е.П. Корчагин и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 459–468. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-459-468

© А.В. Любимов, А.Г. Борисов, Е.П. Корчагин, А.И. Козлитин, Н.Г. Осипенкова, 2019

Study of the Process of Cathodic Electrodeposition of High-Lead Tin-Lead Alloy

A.V. Lyubimov[1], A.G. Borisov[2], E.P. Korchagin[2], A.I. Kozlitin[3], N.G. Osipenkova[2]

[1]Research and Production Enterprise «Optic and Electronic Complexes and Systems», Moscow, Russia
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[3]FSUE F.V.Lukin Physical Problems Research Institute, Moscow, Russia

opteks2008@yandex.ru

Abstract: In manufacturing of multichip modules based on die ICs, the first-step soldering temperature shall not be higher than 270 °C owing to a large number of successive steps. Besides, due to a large number of contact pads of small geometric size and their short spacings the solder layer of the required thickness can generally be formed on them by electrodeposition only. The paper contains the findings of the research into the process of electrodeposition of a tin-lead alloy characterized by a high lead content (of more than 80 % by mass), run to form a layer of a solder characterized by a melting temperature of more than 270 °C and intended for mounting die chips in the multichip module technology. The formula of a fluoroborate electrolyte delivering the specified chemical composition of the alloy has been proposed, and the relationship existing between the chemical composition of the alloy and current density during alloy formation has been found. The optimum current density has been determined, which is equal to (1–1.2) A/dm^2. This current density produces dense fine-grained layers characterized by a surface melting temperature of about 290–295 °C.

Keywords: tin-lead alloy; electrodeposition; fluoroborate electrolyte

For citation: Lyubimov A.V., Borisov A.G., Korchagin Ye.P., Kozlitin A.I., Osipenkova N.G. Study of the process of cathodic electrodeposition of high-lead tin-head alloy. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 459–468. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-459-468

Введение. Технология современной микроэлектроники обеспечивает получение СБИС с размерами топологических элементов порядка 10 нм. При этом основным методом сборки радиоэлектронной аппаратуры является монтаж корпусной элементной базы на печатные платы, что означает принципиальный отказ от достижений субмикронной технологии. Применение микрокорпусов в сочетании с техникой поверхностного монтажа позволяет несколько уменьшить проблему дезинтеграции при сборке [1, 2]. Однако, по мере того как увеличивается быстродействие СБИС и растет число их выводов, ужесточаются требования к массогабаритным показателям и эксплуатационной надежности, уменьшается уровень допустимых помех при одновременном уменьшении стоимости аппаратуры. Поэтому актуальным становится вопрос о необходимости разработки новых подходов к технологии сборки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Перспективным направлением развития технологии сборки радиоэлектронной аппаратуры представляется разработка многокристальных микромодулей с использованием бескорпусной элементной базы. Данное направление интенсивно развивается как в зарубежных, так и в отечественных исследованиях [1, 3–5]. Кристаллы СБИС помещаются на коммутационную плату на максимально близком расстоянии друг от друга, что сводит к минимуму длину коммутационных соединений и тем самым уменьшает паразитные емкости, индуктивности, переходные сопротивления и, как следствие, повышает помехозащищенность и скорость обработки сигналов.

По мере увеличения степени интеграции и функциональных возможностей СБИС растет и число выводов. При числе выводов свыше 300 расположение их по периферии кристалла становится проблематичным. Поэтому расширяется номенклатура СБИС, контактные площадки которых располагаются в виде матрицы по всей площади кристалла. Такие кристаллы могут монтироваться на поверхность коммутационной платы только методом пайки по технологии flip-chip. Коммутационная плата устанавливается в корпус многокристального модуля, который монтируется в состав РЭА методом пайки [6, 7].

Таким образом, в технологии изготовления многокристальных модулей с использованием современной элементной базы и последующего их монтажа в аппаратуру операция пайки может последовательно использоваться минимум 2–4 раза.

Стандартным припоем для монтажа компонентов на коммутационную плату является ПОС-61, температура плавления которого составляет 183–189 °С. При этом пайку обычно ведут при более высокой температуре (190–200 °С). При использовании бессвинцовых припоев температура пайки компонентов оказывается еще выше. Например, температура пайки припоем SAC305 (сплав $SnAg_3Cu_{0,5}$) составляет от 218 до 220 °С. Поэтому при изготовлении многокристальных модулей на основе бескорпусных ИС с матричным расположением контактных площадок температура плавления припоя на первой операции пайки должна быть не ниже 270 °С. Кроме того, в изделиях специального применения использование оловянных припоев, не содержащих свинца, не допускается из-за возможного образования дендритов в процессе эксплуатации изделия и возникновения вследствие этого короткого замыкания между контактными площадками [8, 9]. При этом при большом количестве контактных площадок малых геометрических размеров формирование слоя припоя заданной толщины на них возможно в основном только гальваническим осаждением [10].

Исходя из диаграммы состояний системы олово – свинец [5], заявленным требованиям удовлетворяют сплавы, содержащие в своем составе более 80 % свинца.

Цель настоящей работы – исследование электроосаждения сплава олово – свинец с высоким содержанием свинца (более 80 %) и температурой плавления 270–290 °С.

Оборудование и реактивы. В настоящее время известен ряд электролитов для электроосаждения сплава олово – свинец: метансульфатный [9, 11], фенолсульфоновый, сульфаматный, пирофосфатный и фторборатный [12]. Широкое применение в электронной технике и технологии печатных плат получил фторборатный электролит [13, 14], так как он достаточно прост в приготовлении и корректировании и обеспечивает получение высококачественных и мелкокристаллических покрытий в широком интервале содержания компонентов сплава. Поэтому в работе за основу взят фторборатный электролит [15], который предназначен для гальванического осаждения ПОС-61. Аналогичный по составу электролит рассматривается в [14]. Для получения сплава олово – свинец с содержанием 90 % свинца по массе состав электролита пересчитан.

Данный сплав по содержанию основных компонентов соответствует припою марки ПОС-10, имеющему температуру плавления от 275 до 302 °С. Состав электролита приведен в таблице.

Состав электролита для гальванического осаждения сплава олово – свинец с содержанием свинца 90 % по массе

Composition of electrolyte to electrodeposit tin – lead alloy containing 90 % Sn by mass

Компонент электролита	$Pb(BF_4)_2$	$Sn(BF_4)_2$	HBF_4	H_3BO_3	Мездровый клей	Гидрохинон
Количество	0,129 моль/л	0,027 моль/л	0,60 моль/л	0,543 моль/л	4,0 г/л	0,009 моль/л

Для приготовления раствора электролита применялись 65 %-ный по массе раствор тетрафторбората свинца, 30 %-ный по массе раствор тетрафторбората олова, 40 %-ный по массе раствор тетрафторбористой кислоты. Борная кислота, мездровый клей и гидрохинон использовались в сухом виде. Все реактивы были марки «ч».

При электроосаждении металлов состав анода не всегда соответствует составу получаемого слоя металла [10, 12, 16]. Это обусловлено тем, что теоретически возможны процессы пассивации сложного по химическому составу анода при растворении одного из компонентов (олова или свинца). Это ведет к разной скорости растворения компонентов анода. В связи с этим возникает необходимость исследования анодов как с избытком свинца (аноды из чистого свинца), так и с его недостатком (аноды эвтектического состава). Предварительные исследования показали, что при использовании чисто свинцового анода электролит достаточно быстро обедняется оловом, что приводит к существенному увеличению содержания свинца в осажденном слое. Применение анода, состав которого соответствует эвтектике на диаграмме состояния [5], наоборот, приводит к увеличению содержания в электролите олова, что, соответственно, сопровождается повышением со временем содержания олова в сплаве (приблизительно на 3 % после 3 ч электролиза). Химический состав осажденного при одних и тех же условиях слоя достаточно хорошо воспроизводился от образца к образцу при использовании анода, изготовленного из сплава олово – свинец с 90 %-ным по массе содержанием свинца. Поэтому в дальнейшем в работе использовался анод именно такого состава.

Гальваническое осаждение проводилось на полоску фольгированного медью полиимида. Перед началом процесса поверхность меди декапировалась в 10 %-ном растворе серной кислоты марки «хч» по стандартной технологии.

Процесс гальванического осаждения проводился на установке PGG 10/3-B, в состав которой входят три гальванические ванны объемом по 3 л. Установка обеспечивает возможность перемешивания электролита в процессе работы, его нагрева и контроля температуры.

Электрохимическое осаждение сплава осуществлялось как в потенциостатическом, так и в гальваностатическом режимах. При проведении исследований в качестве электрода сравнения использовался насыщенный хлоридсеребряный электрод. Толщина и шероховатость сформированного слоя измерялись с помощью микроскопа Contour GT-K 3D Optical Microscope. Морфология и химический состав поверхности изучались на растровом электронном микроскопе CAMSCAN-S4 с приставкой энергодисперсионного спектрометра Inca Energy 350. Все измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кэВ. Пример EDX-спектра одного из образцов приведен на рис.1.

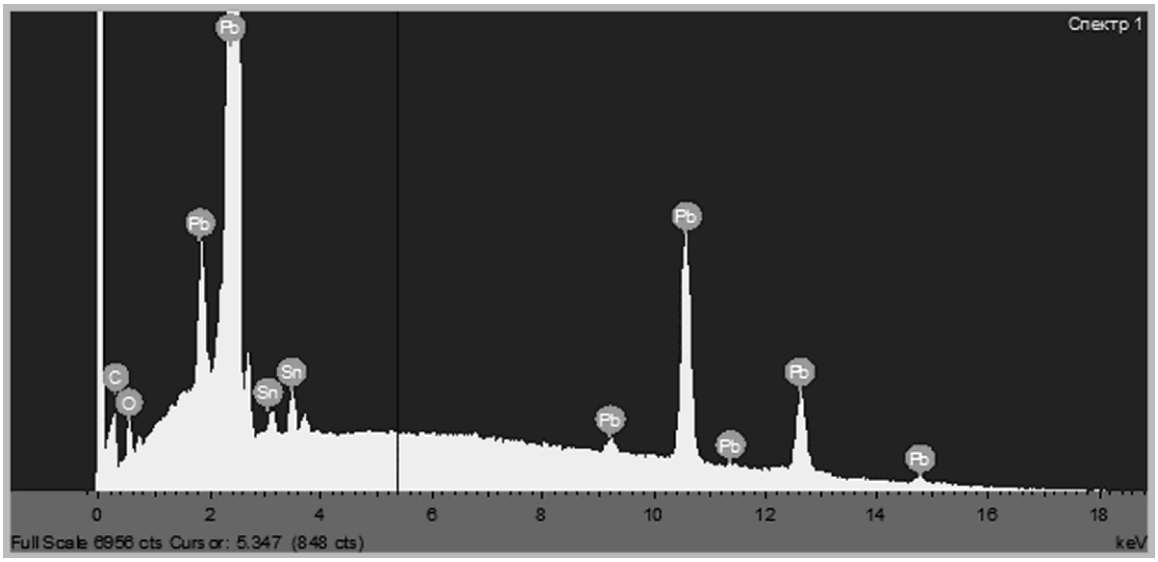


Рис.1. EDX-спектр слоя сплава олово – свинец с содержанием свинца 88,2 % по массе
Fig.1. EDX spectrum of layer of tin – lead alloy containing 88.2 % lead by mass

Результаты и обсуждение. Для определения оптимальных параметров процесса электрохимического осаждения сплава заданного состава проведен теоретический расчет зависимости содержания олова в осадке от плотности тока на катоде. Расчет базируется на законе электролиза Фарадея в формулировке для гальваностатического режима:

$$m = \frac{MIt}{zF},$$

где m – масса осажденного на электроде вещества; M – молярная масса; I – ток электролиза; t – время электролиза; z – заряд иона; F – постоянная Фарадея. Также используется уравнение Гейровского – Ильковича:

$$E = E_{1/2} + \frac{RT}{zF}\ln\frac{I_{\text{пр}} - I}{I},$$

где E – потенциал электрода; $E_{1/2}$ – потенциал полуволны; R – газовая постоянная; T – температура, К; $I_{\text{пр}}$ – предельный ток.

При электрохимическом осаждении металлов на электрод потенциал полуволны связан со стандартным электродным потенциалом E^0 соотношением

$$E_{1/2} = E^0 + \frac{RT}{nF}\ln\frac{C}{2},$$

где C – концентрация электроактивного иона в электролите.

Для рассматриваемого электролита $E_{1/2}(Pb^{2+}/Pb)$ = –204 мВ, $E_{1/2}(Sn^{2+}/Sn)$ = –196 мВ. Предельный ток, согласно уравнению Гейровского – Ильковича, пропорционален концентрации электроактивного иона. Отметим, что коэффициент пропорциональности зависит от параметров среды и самого иона. В силу схожести свойств ионов олова и свинца коэффициент пропорциональности для них в расчетах принимался одинаковым. Массовая доля олова в осадке рассчитывалась по формуле

$$\omega = \frac{m(\text{Sn})}{m(\text{Sn}) + m(\text{Pb})}.$$

При этом в соответствии с экспериментальными данными в [16] выход по току для обоих металлов считается одинаковым и равен 100%. Перенапряжение выделения олова и свинца из известных электролитов составляет 5–6 мВ [17]. Поэтому в первом приближении можно считать перенапряжение выделения этих металлов одинаковым.

Исходя из данных предположений, рассчитана зависимость содержания олова в осажденном слое от плотности тока в режиме гальваностатического осаждения (рис.2). При этом наблюдается значительное расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами, особенно в области малых значений плотности тока. По результатам расчетов при различных величинах разности перенапряжений выделения свинца и олова оптимальный результат получен при 5 мВ. Следует отметить, что в рассматриваемом случае содержание олова в гальваническом осадке с увеличением плотности тока уменьшается в отличие от результатов, полученных в работе [14].

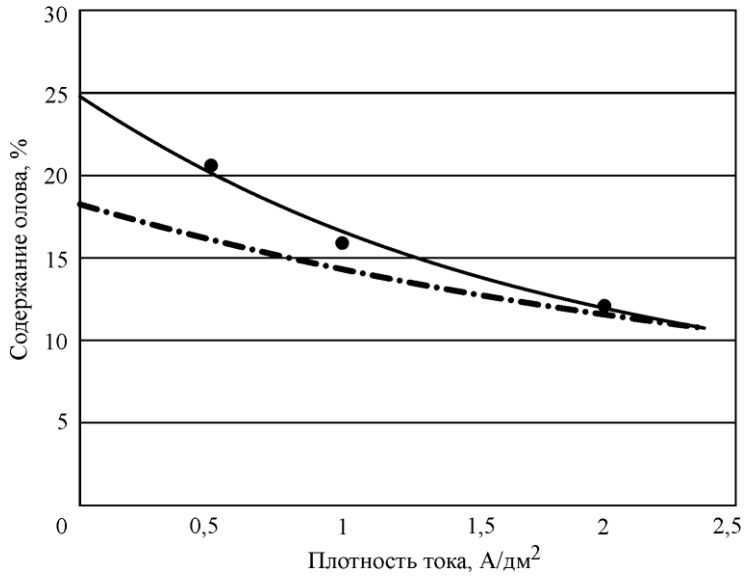


Рис.2. Зависимость содержания олова в слое от плотности тока в режиме гальваностатического осаждения: –·–·– расчет при одинаковом перенапряжении выделения олова и свинца; —— расчет при превышении перенапряжения выделения свинца по сравнению с оловом на 5 мВ; ● – экспериментальные точки

Fig.2. Electrodeposited tin content versus current density during cathodic electrodeposition: –·–·– the curve plotted for the same overpotentials of tin and lead; —— the curve plotted for the lead overpotential exceeding the tin overpotential by 5 mV; ● – test points

Дальнейшие исследования показали, что при увеличении плотности тока увеличивается шероховатость поверхности полученного слоя (рис.3). Слой становится рыхлым и сравнительно легко осыпается с поверхности.

На рис.4 приведена морфология поверхности образцов при разной плотности тока. Изображения получены на растровом электронном микроскопе CAMSCAN - S4 при увеличении $300^{\times}$.

Видно, что при большой плотности тока структура поверхности становится неоднородной, появляются крупные кристаллиты (рис.4), которые, вероятно, слабо связаны с основным объемом металла и поэтому легко осыпаются. Таким образом, оптимальной является плотность тока в диапазоне 1–1,5 А/дм^2.

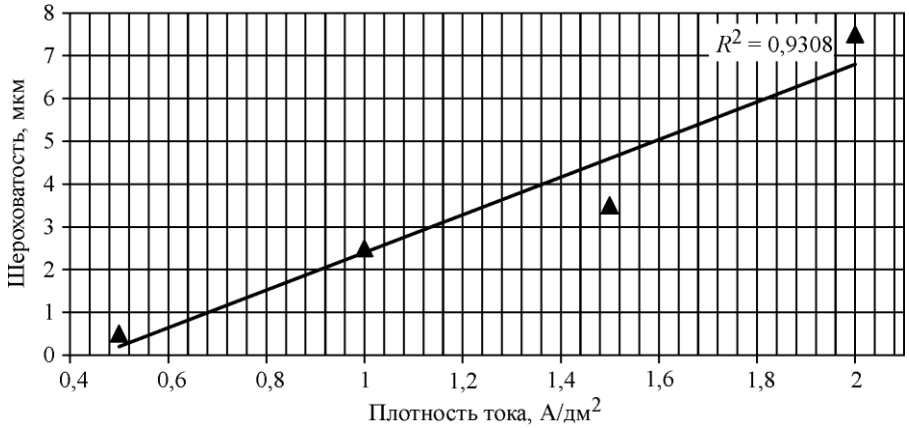
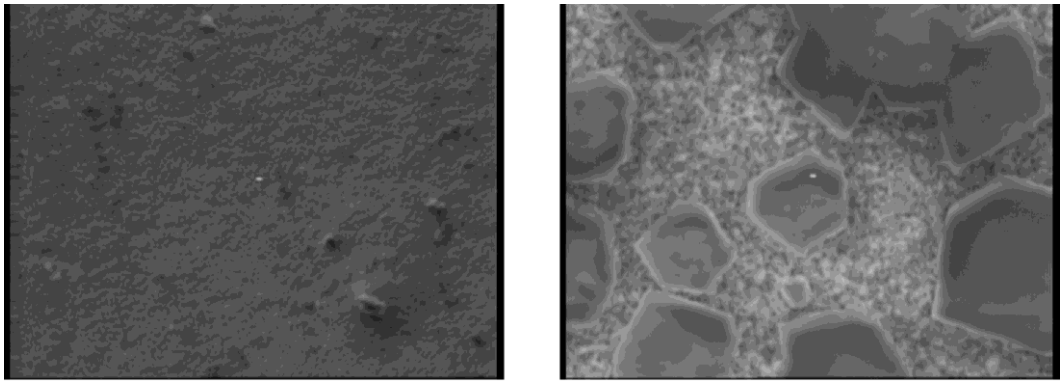


Рис.3. Зависимость шероховатости слоя гальванического осадка олово – свинец от плотности тока (время осаждения 15 мин)
Fig.3. Thickness versus roughness for tin-lead smut coats formed at various current densities (deposition time 15 min)



а ***б***

Рис.4. РЭМ-изображения морфологии поверхности слоев олово – свинец, полученные при плотности тока 0,5 А/дм^2 (*а*) и 2 А/дм^2 (*б*) (300$^\times$)
Fig.4. Morphologies of tin-lead coats formed at various current densities. the image has been obtained by means of the camscan - s4 scanning electron microscope at 300$^\times$ magnification: *a* – current density of 0.5 A/dm^2; *b* – current density of 2 A/dm^2

Нагревание в вакууме образцов, осажденных при плотности тока (1,2 ± 0,1) А/дм^2 в течение 15 мин, показало, что оплавление слоя происходит при температуре 293–295 °С, что соответствует предъявляемым к осадку требованиям.

Заключение. Для проведения процесса электрохимического осаждения сплава олово – свинец, содержащего не менее 90% по массе свинца, оптимальным химическим составом являются аноды из сплава олово – свинец того же состава. Оптимальная плотность тока, при которой формируются плотные мелкозернистые слои с температурой плавления от 290 до 300 °С, равна 1–1,5 А/дм^2.

Литература

1. ***Медведев А.*** Современные компоновки микросхем // Компоненты и технологии. – 2007. – № 2 (67). – С. 152–156.

2. ***Спирин В.Г.*** Проблемы создания микросборок высокой плотности упаковки // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 8 (157). – С. 17–20.

3. Wafer level packaging of a tape flip-chip chip scale packages / ***G. Hotchkiss, G. Amador, D. Edwards et al.*** // Microelectronics Reliability. – 2001. – Vol. 41. – Iss. 5. – P. 705–713.

4. ***Грушевский А.М.*** Сборка и монтаж многокристальных микромодулей: учеб. пособие. – М.: МИЭТ, 2003. – 140 с.

5. ***Медведев А.М.*** Сборка и монтаж электронных устройств. − М.: Техносфера, 2007. – 256 с.

6. Конструктивно-технологические особенности flip-chip монтажа кристаллов в производстве высокоинтегрированных 2,5D и 3D микросборок / ***В.Н. Сидоренко, Д.В. Вертянов, Ю.Г. Долговых и др.*** // Наноиндустрия. – 2018. – № 5 (82). – С. 203–210.

7. ***Стоянов А.А., Побединский В.В., Рогозин Н.В., Рембеза С.И.*** Особенности монтажа кристаллов с использованием технологии «flip-chip» при сборке 3D БИС // Периодический научный сборник по материалам XVIII Междунар. науч.-практ. конф. «Современные тенденции развития науки и технологий» (г. Белгород, 30 сентября 2016 г.). – Белгород: Агентство перспективных научных исследований, 2016. – № 9-1. – С. 62–64.

8. ***Медведев А., Шкундина С.*** Иммерсионное олово. Прошлое и будущее // Технологии в электронной промышленности. – 2010. – №3. – С. 22–27.

9. ГОСТ Р 56427-2015. Пайка электронных модулей радиоэлектронных средств. Автоматизированный смешанный и поверхностный монтаж с применением бессвинцовой и традиционной технологий. Технические требования к выполнению технологических операций. – М.: Стандартинформ, 2015. – 31 с.

10. Modern eletroplating / Ed. by Mordechay Schlesinger, Milan Paunovic. – 5th Edition. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2010. – XIII. – 729 p.

11. ***Данилов Ф.И., Васильева Е.А., Бутырина Т.Е., Проценко В.С.*** Электроосаждение сплава свинец – олово из метансульфатного электролита в присутствии добавок органических ПАВ // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2010. – Т. 46. – № 6. – С. 627–633.

12. ***Пурин Б.А., Цера В.А., Озола Э.А., Витиня И.А.*** Комплексные электролиты в гальванотехнике. – Рига: Лиесма, 1978. – 267 с.

13. ***Байрачный Б. И., Трубникова Л. В., Майзелис А. А.*** Электроосаждение сплава олово – свинец из борфтористоводородного электролита без поверхностно-активных веществ // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – № 3 (3). – С. 31–37.

14. ***Медведев А.*** Печатные платы. Гальваническое осаждение металлорезистов // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 5(65). – С. 34–37.

15. ГОСТ 23770-79. Платы печатные. Типовые технологические процессы химической и гальванической металлизации. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 35 с.

16. ***Вячеславов П.М.*** Электролитическое осаждение сплавов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1986. – 112 с.

17. ***Ваграмян А.Т., Жамаргорцянц М.А.*** Электроосаждение металлов и ингибирующая адсорбция. – М.: Наука, 1969. – 199 с.

Поступила в редакцию 08.02.2019 г.; после доработки 27.03.2019 г.; принята к публикации 18.06.2019 г.

Любимов Андрей Викторович – генеральный директор ЗАО «НПП «ОПТЭКС», (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Гуськова, 6-1), opteks2008@yandex.ru

Борисов Александр Григорьевич – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1), borisov_a.g@mail.ru

Корчагин Егор Павлович – студент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), eg.ad2013@yandex.ru

Козлитин Алексей Иванович – кандидат физико-математических наук, руководитель Центра высоких технологий ФГУП «Научно-исследовательский институт физических проблем имени Ф.В. Лукина» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5), acozlitin@yandex.ru

Осипенкова Наталья Геннадиевна – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), osipenkova@mail.ru

References

1. Medvedev A. Modern integrated circuit configurations. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2007, no. 2. (In Russian).

2. Spirin V.G. Problems of building of high-density microassemblies. *The Nano- and Mikrosistemnaya Tekhnika = Nano- and Microsystem Technology*, 2013, no. 8 (157), pp. 17–20. (In Russian).

3. Hotchkiss G., Amador G., Edwards D., Hundt P., Stark L., Stierman R., Heinen G. Wafer level packaging of a tape flip-chip chip scale packages. *Microelectronics reliability*, 2001, vol. 41, iss. 5, pp. 705–713.

4. Grushevskiy A.M. *Assembly and wiring of multiple-chip modules*: Learning aid. Moscow, MIET Publ., 2003. 140 p. (In Russian).

5. Medvedev A.M. *Assembly and wiring of electronic devices*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007, 256 pp. (In Russian).

6. Sidorenko V.N., Vertyanov D.V., Dolgovykh Yu.G., Kovalev A.A., Zmeyev S.V., Timoshenkov S.P. Engineering peculiarities of flip-chip mounting in manufacture of high-integration 2.5D and 3D microassemblies. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2018, no. 5 (82), pp. 203–210. (In Russian).

7. Stoyanov A.A., Pobedinskiy V.V., Rogozin N.V., Rembeza S.I. Peciliarities of flip-chip mounting in assembly of 3D large-scale integrated circuits. *Present-day trends in development of science and technologies*, 2016, no. 9-1, pp. 62–64. (In Russian).

8. Medvedev A., Shkundina S. Immersion tin. Past and future. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti = Electronic Industry Technologies*, 2010, no. 3, pp. 22–27. (In Russian).

9. GOST R 56427-2015. *Soldering of electronic modules of radio-electronic means. Automated mixed and surface mounting using lead-free and conventional technologies. Technical requirements for the implementation of technological operations*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 31 p. (In Russian).

10. *Modern electroplating*. Ed. by Mordechay Schlesinger, Milan Paunovic. 5th Edition. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2010, XIII. 729 pp.

11. Danilov F.I., Vassilyeva Ye.A., Butyrina T.Ye., Protsenko V.S. Electrodeposition of lead-tin alloy from methane-sulphate electrolyte in the presence of organic surfactant additives. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Surface Physicochemistry and Material Protection*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 627–633. (In Russian).

12. Purin B.A., Tsera V.A., Ozola E.A., Vitinya I.A. *Complex electrolytes in electroplating*. Riga, Liesma Publ., 1978. 267 p. (In Russian).

13. Bairachniy B.I., Trubnikova L.V., Maizelis A.A. Electrodeposition of tin-lead alloy from hydrofluoroboric electrolyte in the absence of surfactants. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy = East European Journal of Advanced Technologies*, 2003, no. 3 (3), pp. 31–37. (In Russian).

14. Medvedev A. Printed Circuit Boards. Cathodic Electrodeposition of Metalloresists. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti = Electronic Industry Technologies*, 2013, no. 5, pp. 34–37. (In Russian).

15. GOST 23770-79. *Printed circuit boards. Standard processes of chemical and galvanic metallization*., Moscow, Izdatel'stvo Standartov Publ., 1995. 35 p. (In Russian).

16. Vyacheslavov P.M. *Electrolytic deposition of alloys*. The 5th Revised and Enlarged Edition. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 112 p. (In Russian).

17. Vagramyan A.T., Zhamargortsyants M.A. *Metal electrodeposition and inhibitory adsorption*. Moscow, Nauka Publ., 1969. 199 p. (In Russian).

Received 08.02.2019; Revised 27.03.2019; Accepted 18.06.2019.

Information about the authors:

Andrey V. Lyubimov – General Director of the Research and Production Enterprise «Optic and Electronic Complexes and Systems» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Konstruktor Guskov st., 6), opteks2008@yandex.ru

Alexandr G. Borisov – Cand. 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), borisov_a.g@mail.ru

Egor P. Korchagin – Student of the National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), eg.ad2013@yandex.ru

Alexey I. Kozlitin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the High-Technology Center, FSUE F.V. Lukin Physical Problems Research Institute (124460, Moscow, Zelenograd, Georgiyevskiy ave., 5), acozlitin@yandex.ru

Natalia G. Osipenkova – Cand. 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), osipenkova@mail.ru

Издательско-полиграфический комплекс Национального исследовательского университета «МИЭТ» информирует

Вышло в свет учебное пособие

Корнеев В.И. Теория излучения и распространения электромагнитных волн: учеб. пособие. - М.: МИЭТ, 2019. - 268 с.: ил.



ISBN 978-5-7256-0916-5

Рассмотрены общие законы электромагнитных полей, свойства статических электрических и магнитных полей, а также переменного электромагнитного поля, законы взаимодействия поля с электрическими зарядами и токами, способы возбуждения электромагнитных волн. Основное внимание уделено изучению распространения электромагнитного излучения в направляющих системах, волноводах, двухпроводных линиях. Подробно описана общая теория излучения антенн, исследованы свойства электромагнитного поля в ближней и дальней зонах излучения.

Для студентов, обучающихся по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», может быть полезно аспирантам кафедр телекоммуникационных систем, а также квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ.

УДК 621.3.049.77 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-469-478

Определение времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика суб-100-нм МОП-транзисторов с помощью ускоренных испытаний

А.С. Сивченко[1], Е.В. Кузнецов[1], А.Н. Сауров[1,2]

[1]НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия
[2]Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва, Россия

asivchenko@yandex.ru

Подзатворный диэлектрик является одним из ключевых элементом конструкции субмикронных МОП-транзисторов, от которого зависит надежность его работы. Пробой диэлектрика приводит к потере функционирования транзистора и выходу из строя всей ИС или сбою в ее работе. Поэтому оценке дефектности подзатворного диэлектрика и времени его наработки до отказа уделяется особое внимание. В работе определяется время наработки до отказа подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов на основе метода времязависимого пробоя диэлектрика с использованием термомеханической модели (*E*-модели). В качестве статистики распределения отказов использовано распределение Вейбулла, полученное для интегрального распределения отказов выборки технологических тестовых структур, измеренных при высоких значениях напряжения и температуры. Исследования выполнены на тестовых структурах, представляющих собой МОП-конденсаторы с толщиной подзатворного диэлектрика 5 нм. Тестовые структуры созданы по серийной технологии 65 нм и размещены в тестовом кристалле совместно с ИС на одной пластине. Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить ускоренные измерения в автоматическом режиме. В результате проведенных исследований определены параметры термомеханической модели отказа, получены зависимости времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика от условий эксплуатации. Установлено, что для исследуемых тестовых структур возможно возникновение как полного, так и частичного пробоя диэлектрика. Данный метод контроля может применяться для прогнозирования долгосрочной надежности подзатворного диэлектрика суб-100-нм МОП-транзисторов, а также для аттестации технологических процессов его производства.

Ключевые слова: подзатворный диэлектрик; МОП-транзистор; надежность; время наработки до отказа; контроль параметров технологического процесса

Для цитирования: 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 // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 469–478. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-469-478

Благодарности: работа выполнена на оборудовании ЦКП «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».

© А.С. Сивченко, Е.В. Кузнецов, А.Н. Сауров, 2019

Time to Failure Determination for sub-100 nm MOS Transistors Gate Dielectric by Means of Accelerated Tests

A.S. Sivchenko[1], E.V. Kuznetsov[1], A.N. Saurov[1,2]

[1]SMC «Technological Center», Moscow, Russia
[2]Institute of Nanotechnologies of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

asivchenko@yandex.ru

Abstract: A gate dielectric is one of the crucial components of submicron MOS transistor structure which greatly affects its operation reliability. Transistor functionality loss, as well as a failure in the IC operation or a complete failure of the entire IC can be a result of dielectric breakdown. Therefore, the assessment of the gate dielectric defectiveness and its time to failure requires special attention. This paper considers a method for time to failure determination for MOS transistor gate dielectrics based on the time-dependent dielectric breakdown method. The time to failure is determined on the basis of the integral distribution of failures obtained by means of sampling of technological test structures measurements. Various parameter values are used that accelerate failure: high voltage and temperature. The Weibull distribution is used as a failure distribution statistic, and time to failure determination is carried out using a thermomechanical model (*E*-model). The research has been performed on test structures represented by MOS capacitors with gate dielectric thickness of 5 nm. The test structures have been developed using the 65 nm technology and placed in a test chip on the same wafer with the integrated circuits. Software has been developed for the research that allows accelerated measurements in automatic mode. As a result of the conducted research, the parameters of the thermomechanical failure model have been determined; the dependencies of the gate dielectric time to failure on the operating conditions have been obtained. It has been found out that both hard and soft dielectric breakdowns can occur for the test structures under study. This method of control can be used to predict the long-term reliability of sub-100 nm MOS transistors gate dielectric, as well as for its production methods assessment.

Keywords: gate dielectric; MOS transistor; reliability; time to failure; process control

For citation: Sivchenko A.S., Kuznetsov E.V., Saurov A.N. Time to failure determination for sub-100 nm MOS transistors gate dielectric by means of accelerated tests. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 469–478. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-469-478

Acknowledgments: the work has been performed on the equipment of the Centre of collective usage «Functional control and diagnostics of micro- and nanosystem technology» based on the SMC «Technological Center».

Введение. Надежность работы МОП-транзисторов во многом зависит от качества подзатворного диэлектрика. Вопросы надежности подзатворного диэлектрика субмикронных МОП-транзисторов становятся особенно актуальными, так как при масштабировании топологических размеров ИС толщина подзатворного диэлектрика снижается и вместе с этим растет совокупный объем факторов, определяющих его дефектность и время наработки до отказа.

При длительном воздействии электрического поля на диэлектрик в нем происходит генерация дефектов, которые приводят к увеличению токов утечки. В дальнейшем это может привести к пробою диэлектрика. Наряду с генерированной дефектностью под действием поля в диэлектрике могут существовать дефекты, привнесенные в процессе производства: металлические и органические загрязнения, механические напряжения, нарушения стехиометрии. Данные дефекты являются причинами ранних отказов МОП-транзисторов. Пробой диэлектрика приводит к потере функционирования транзистора и выходу из строя всей ИС или сбою в ее работе. Поэтому оценке дефектности подзатворного диэлектрика и времени его наработки до отказа уделяется особое внимание при разработке новых и аттестации текущих технологических процессов [1–7]. Так, в работе [4] исследуется надежность КНИ МОП-транзисторов для высокотемпературной электроники, показаны основные механизмы отказов, однако надежность диэлектрика оценивается на основе заряда пробоя без точного определения времени наработки до отказа. В работе [5] показан метод экспресс-контроля надежности подзатворного диэлектрика на основе ступенчато-нарастающего напряжения при разных скоростях развертки. Метод расчета дефектности подзатворного диэлектрика на основе ступенчато-возрастающего тока подробно рассматривается в работах [6, 7]. Данный метод подходит для быстрой оценки дефектности в серийном производстве ИС.

Для расчета времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика обычно используются TDDB-методы измерений (Time Dependent Dielectric Breakdown). В качестве основных TDDB-методов выделяют:

- CVS-метод (Constant Voltage Stress) – воздействие на структуру постоянным напряжением – применяется для точной оценки времени до наступления пробоя t_{bd};

- CCS-метод (Constant Current Stress) – воздействие на структуру постоянным током – применяется для точной оценки заряда пробоя Q_{bd};

- RVS-метод (Ramped Voltage Stress) – воздействие на структуру линейно возрастающим напряжением – применяется для точной оценки напряжения пробоя V_{bd};

- ERCS-метод (Exponentially Ramped Current Stress) – воздействие на структуру экспоненциально возрастающим током – применяется для точной оценки тока I_{bd} и заряда пробоя Q_{bd}.

Цель настоящей работы – определение времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика на основе статистического распределения времени возникновения пробоя диэлектрика при воздействии постоянного напряжения и высокой температуры. Данный метод позволяет получить зависимость времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика в широком диапазоне температур и напряжении и может применяться для исследования диэлектриков, изготовленных по суб-100-нм проектным нормам.

Особенности пробоя тонких диэлектриков. Исследования пробоя диэлектриков, изготовленных по суб-100-нм технологии, – технически сложная задача, так как с уменьшением толщины подзатворного диэлектрика происходит увеличение туннельных токов, протекающих через диэлектрик. Это усложняет момент определения его пробоя, так как ток утечки через диэлектрик во время стресс-теста и ток пробоя становятся практически равными по порядку величины и пробой диэлектрика трудно определить при использовании RVS-, CVS-методов измерений. Если для диэлектриков толщиной более 5 нм характерен пробой с полной потерей диэлектрических свойств (hard breakdown), то в суб-100-нм технологии, когда толщина диэлектрика становится 5 нм и менее, возникает вероятность проявления как полного диэлектрического пробоя, так и частичного пробоя

(soft breakdown) [7, 8]. После частичного пробоя в структуре при низких полях наблюдаются высокие токи утечки, которые могут приводить к сбою в работе ИС, например к уменьшению окна памяти в ячейке ПЗУ (разнице пороговых напряжений в записанном и стертом состоянии). При полном пробое в диэлектрике формируется проводящий путь и происходит полная потеря диэлектрических свойств (рис.1).

Возникновение частичного пробоя диэлектрика носит статистически вероятностный характер, зависит от качества производства диэлектрика и его дефектности. Данный тип пробоя всегда предшествует появлению полного пробоя, однако он может и не возникнуть. Если методика измерения надежности подзатворного диэлектрика не позволяет определять частичные пробои, то существует большая вероятность в переоценке времени наработки на отказ, так как расчет надежности будет проводиться на основе завышенных значений Q_{bd} или V_{bd}, полученных для полного пробоя с помощью TDDB-методов измерений (рис.2) [9]. Из рисунка видно, что если событие возникновения частичного пробоя не определено, то расчет надежности будет проводиться на основе завышенных значений Q_{bd}, тем самым время наработки до отказа будет переоценено.

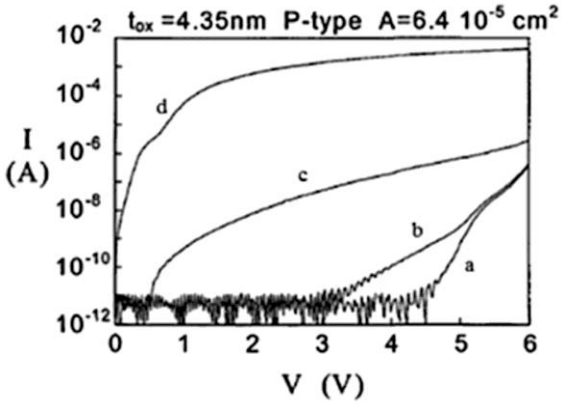


Рис.1. Зависимость тока утечки от приложенного напряжения для диэлектрика: a – до воздействия стрессового напряжения; b – после воздействия стрессового напряжения; c – после воздействия стрессового напряжения и проявления частичного пробоя; d – после воздействия стрессового напряжения и проявления полного пробоя [7]

Fig.1. Dependence of the leakage current on the applied voltage for an dielectric: *a* – before stress; *b* – after stress; *c* – after stress and soft breakdown; *d* – after stress and hard breakdown [7]

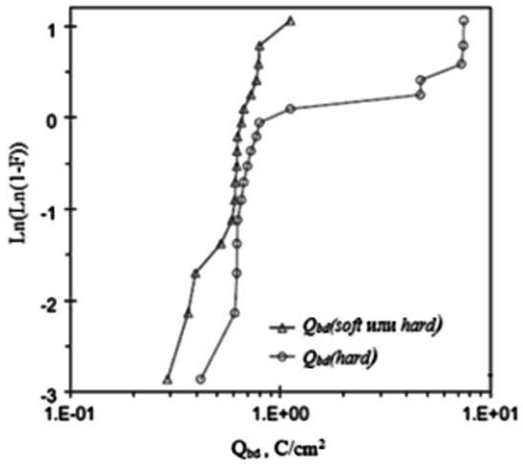


Рис.2. Накопительное распределение Q_{bd}: –Δ– для моментов первого частичного или полного пробоя (какой наступит раньше); –o– для момента полного пробоя [9]

Fig.2. Cumulative distribution Q_{bd}: –Δ– built up for the first breakdown moments (soft or hard whichever comes first) and –o– hard breakdown moment [9]

Модели отказов подзатворного диэлектрика. В настоящие время существует ряд общепринятых моделей для расчета времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика. Наибольшее применение нашли следующие модели: модель инжекции дырок с анода (1/*E*-модель); термомеханическая модель (*E*-модель); модель инжекции водорода с анода (V^n-модель) [10]. Время наработки до отказа *TTF* в данных моделях рассчитывается следующим образом:

- для *E*-модели

$$TTF = A\exp(-\gamma(T)E_{ox})\exp\left(\frac{E_a}{\kappa T}\right), \qquad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от материалов и технологического процесса; $\gamma(T)$ – параметр, связанный с критическим полем, характеризующий электрически прочностные характеристики диэлектрика; E_{ox} – напряженность внешнего электрического поля; E_a – энергия термоактивации, связанная с характеристиками глубоких энергетических центров; κ – константа Больцмана; T – температура, К;

- для 1/*E*-модели

$$TTF = \tau(T)\exp\left(\frac{G(T)}{E_{ox}}\right),$$

где $\tau(T)$ – коэффициент, зависящий от температуры; $G(T)$ – параметр ускорения полем;

- для V^n-модели

$$TTF = B(T)V^{-n},$$

где $B(T)$ – коэффициент, зависящий от температуры; n – показатель напряжения.

Выбор модели для расчета времени наработки до отказа зависит от толщины подзатворного диэлектрика и условий измерения. Экспериментально установлено, что при использовании *E*-модели время наработки до отказа наименьшее. Применение 1/*E*-модели показывает наибольшее время наработки до отказа. Остальные модели характеризуются промежуточным значением времени наработки до отказа, которое ограничено снизу временем, рассчитанным по *E*-модели, а сверху – по 1/*E*-модели.

Расчет параметров модели отказа. В работе в качестве модели для определения времени наработки до отказа использована *E*-модель. Данная модель применима для исследуемой толщины подзатворного диэлектрика и соответствует условиям проведения измерений, а также показывает самый наименьший прогноз относительно значения времени наработки до отказа диэлектрика. Согласно *E*-модели пробой возникает за счет индуцированного полем и температурой разрыва связей на границе раздела $Si–SiO_2$.

В предположении, что $E_{ox} = \text{const}$, уравнение (1) можно преобразовать к виду

$$\ln(TTF) = E_a \frac{1}{\kappa T} + b. \qquad (2)$$

Уравнение (2) носит линейный характер:

$$y = \kappa x + b. \qquad (3)$$

Для нахождения энергии активации E_a необходимо построить зависимость $\ln(TTF)$ от $1/T$ и с помощью линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов рассчитать значение E_a.

В предположении, что $T = \text{const}$, уравнение (1) можно преобразовать к линейному виду (3)

$$\ln(TTF) = -\gamma(T)\cdot E_{ox} + B. \qquad (4)$$

Для нахождения параметра ускорения полем γ необходимо построить зависимость $\ln(TTF)$ от E_{ox}. Затем с помощью линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов рассчитать значение γ. Константа A определяется из уравнения (1) с учетом найденных значений E_a и γ.

Таким образом, для расчета времени наработки до отказа проводится выборка измерений при различных значениях температуры T и напряженности поля E_{ox}. Отказы анализируются в предположении, что значение времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика распределено по закону Вейбулла. Интегральная функция распределения в этом случае имеет вид

$$F(t_{bd}) = 1 - \exp\left(-\frac{t_{bd}^{\beta}}{\alpha}\right), \quad (5)$$

где α, β – параметры масштаба и формы распределения соответственно.

Преобразуем уравнение (5):

$$\ln\{-\ln(1-F(t_{bd}))\} = \beta\ln(t_{bd}) - \ln(\alpha). \quad (6)$$

Для нахождения значений параметров распределения необходимо построить зависимость $\ln\{-\ln(1-F(t_{bd}))\}$ от $\ln(t_{bd})$ и с помощью линейной аппроксимации по методу наименьших квадратов рассчитать значение параметров распределения.

Метод измерения. Для оценки времени наработки до отказа диэлектрика выбран CVC-метод [11]. В данном режиме работы диэлектрик подвергается воздействию постоянного электрического поля, что является наиболее сильным воздействием с точки зрения скорости деградации диэлектрика. Также данный режим измерения приближен к реальному режиму работы транзистора. Ускоренная деградация диэлектрика происходит вследствие воздействия двух ускоряющих факторов: высокого напряжения V_{str} и температуры T_{str}. Для точного определения частичного и полного пробоев CVC-метод модифицирован: через заданные интервалы времени происходит замена напряжения V_{str} на напряжение V_{silc} ($V_{silc} < V_{str}$) и проводится измерение тока утечки I_{silc}.

Момент полного пробоя определяется по резкому увеличению тока утечки I_{str}. Частичные пробои определяются из анализа несмещенной оценки дисперсии $\partial\Delta I_{str}$, взятой для разницы значений последовательных измерений шести токов утечки (рис.3,*а*), или из анализа токов утечки I_{silc} (рис.3,*б*).

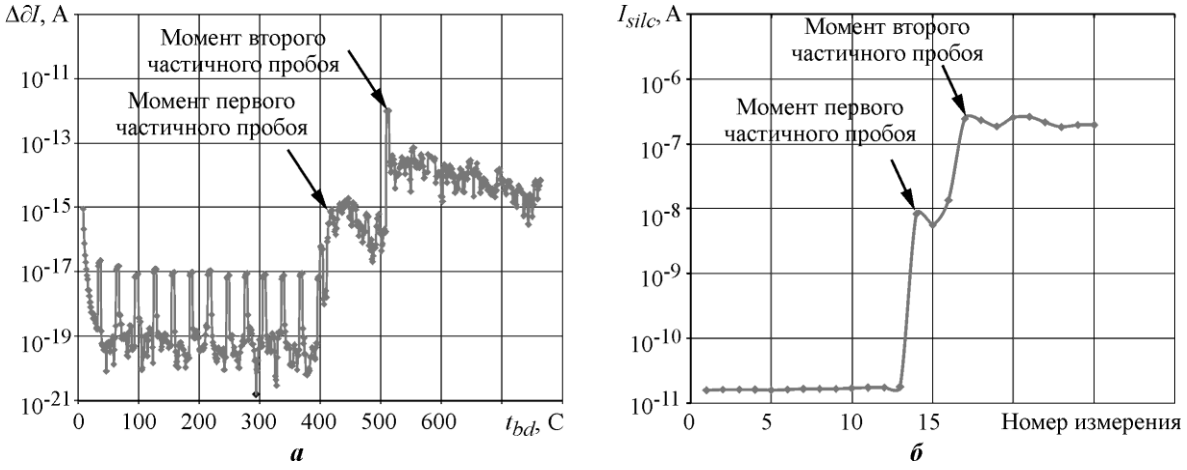


Рис.3. Определение частичного пробоя с помощью анализа несмещенной оценки дисперсии $\partial\Delta I_{str}$ (*а*) и анализа тока утечки I_{silc} (*б*)

Fig.3. Soft breakdown determination by analyzing the unbiased estimated variance $\partial\Delta I_{str}$ (*a*) and by analyzing the leakage current I_{silc} (*b*)

Тестовые структуры и программа измерений. Для проведения исследований по серийной технологии 65 нм спроектированы и изготовлены специальные тестовые структуры, представляющие собой МОП-конденсаторы. Подзатворный диэлектрик тестовых структур применяется в МОП-транзисторах ввода-вывода с напряжением питания 2,5 В. Диэлектрик выполнен из оксинитрида кремния SiON с эквивалентной толщиной EOT = 5 нм, площадь подзатворного диэлектрика тестовых структур составляет 10^{-5} см^2, подложка и поликремневый затвор n-типа проводимости. С помощью данных структур исследуется один доминирующий механизм физического отказа – собственный пробой подзатворного диэлектрика. Уменьшение последовательного сопротивления и равномерное растекание тока в структуре обеспечивается за счет набора большого числа распределенных контактов. Тестовые структуры размещены в тестовом кристалле совместно с ИС на одной пластине, что позволяет автоматизировать процесс контроля ИС.

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить оценку надежности подзатворного диэлектрика в автоматическом режиме с помощью параметрического измерителя Agilent B 1500 и полуавтоматической зондовой станции SUSS PA 300. Программа определяет значения параметров термомеханической модели отказа. Преимуществом программы является возможность одновременного исследования двух структур с возможностью обнаружения частичного и полного пробоев для каждой структуры. Данная реализация измерений позволяет увеличить скорость получения данных, что значительно сокращает время проведения исследований.

Результаты исследования. Для определения параметров термомеханической модели проведены ускоренные измерения времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика для выборки тестовых структур при различных значениях параметров V_{str} и T_{str}, ускоряющих отказ. Для определения значения параметра ускорения полем измерено время наработки до отказа для трех выборок структур при фиксированном значении температуры T_{str} = 100 °С и разных значениях напряжения V_{str} (рис.4,*а*). Для определения значения энергии активации измерено время наработки до отказа для трех выборок структур при фиксированном значении напряжения V_{str} = 6,4 В и разных значениях температуры T_{str} (рис.4,*б*). Объем каждой выборки составляет 16 измеренных значений.

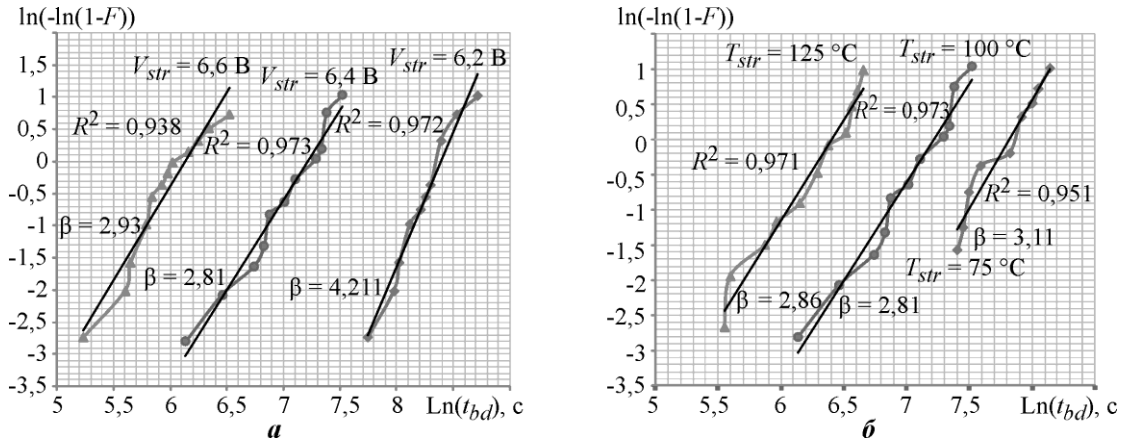


Рис.4. Накопительные распределения времени наработки до отказа t_{bd} для трех выборок структур при T_{str} = 100 °С и разных значениях напряжения V_{str} (*а*); при V_{str} = 6,4 В и разных значениях температуры T_{str} (*б*)

Fig.4. Accumulative time to failure t_{bd} distribution for three structure samples: *a* – measured at a fixed temperature T_{str} = 100 in the V_{str} voltage range: 6.2; 6.4; 6.6 V; *b* – measured at a fixed voltage V_{str} = 6.4 V in the T_{str} temperature range: 75; 100; 125 °C

Параметры термомеханической модели и распределения находятся из уравнений (2), (4) и (3), (6) соответственно (рис.5). Условия измерений и значения всех найденных параметров представлены в таблице.

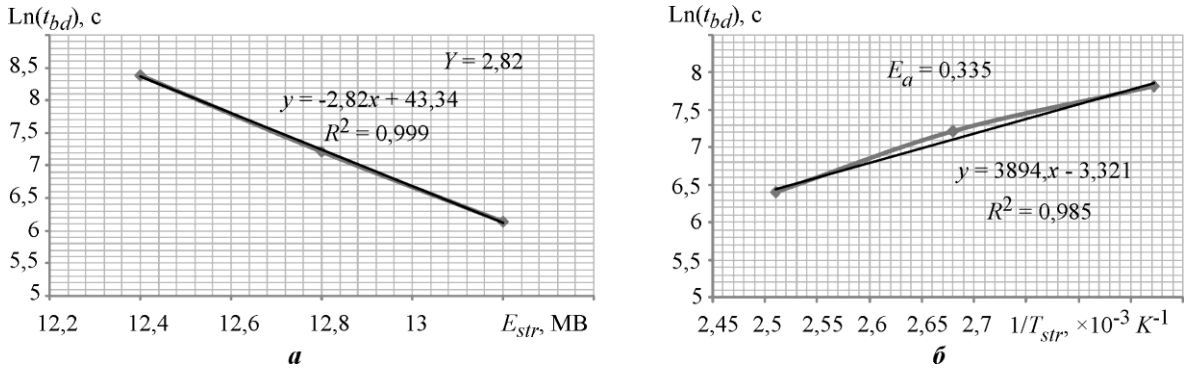


Рис.5. Зависимости времени наработки до отказа $t_{bd}(E_{str})$ при T_{str} = 100 °C (*а*) и времени наработки до отказа $t_{bd}(T_{str})^{-1}$ V_{str} = 6,4 В (*б*)

Fig.5. Time to failure characteristic $t_{bd}(E_{str})$ at a fixed temperature T_{str} = 100 °C (*a*) and time to failure characteristic $t_{bd}(T_{str})^{-1}$ at a fixed voltage V_{str} = 6.4 V (*b*)

Условия измерений и значения параметров распределения и модели
Measurement conditions and values of the parameters found

Условия измерений		Рассчитанные параметры				
		распределения		модели		
V_{str}, В	T_{str},°C	β	$t_{bd\,63}$, с	A, с	γ, см/МВ	E_a, эВ
6,4	75	3,11	2486	$1{,}8\cdot10^{14}$	2,82	0,335
	100	2,81	1362			
	125	2,86	603			
6,2	100	4,21	4414			
6,4		2,81	1362			
6,6		2,93	463			

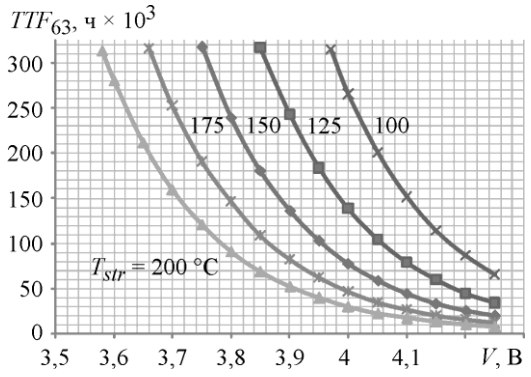


Рис.6. Зависимость времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика от напряжения для 63 % образцов из выборки при разной температуре

Fig.6. Dependences of gate insulator time to failure for 63% of sample pieces in the temperature range from 100 to 200 °C and voltages from 3.6 to 4.25 V

На основе полученных параметров термомеханической модели, представленных в таблице, и уравнения модели (1) можно рассчитать время наработки до отказа подзатворного диэлектрика в широком диапазоне напряжений и температур. Так, на рис.6 представлены рассчитанные зависимости времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика от напряжения для 63 % образцов из выборки при температуре от 100 до 200 °C.

Заключение. С помощью ускоренных испытаний при воздействии повышенных значений напряжения и температуры определено время наработки до отказа подзатворного диэлектрика серийно выпускаемых суб-100-нм МОП-транзисторов. Для иссле-

дуемых тестовых структур рассчитаны значения параметров термомеханической модели отказа: A = 1,8·10^{14} с, $\gamma(T)$ = 2,82 см/МВ, E_a = 0,335 эВ. С использованием данной модели получены зависимости времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика от условий эксплуатации, а также подтверждены целевые показатели надежности диэлектрика. Установлено, что для исследуемых тестовых структур с толщиной подзатворного диэлектрика EOT = 5 нм возможно возникновение как полного, так и частичного пробоя. Для обнаружения пробоя разработано программное обеспечение, позволяющее одновременно исследовать две структуры с возможностью обнаружения частичного и полного пробоя диэлектрика для каждой структуры. Данная реализация измерений дает возможность увеличить скорость получения данных, что значительно сокращает время испытаний.

Представленный метод контроля может применяться для прогнозирования долгосрочной надежности подзатворного диэлектрика суб-100-нм МОП-транзисторов, а также аттестации технологических процессов его производства.

Литература

1. Jedec Standart JEP001–2A. Foundry process qualification guidelines – front end transistor level. – 2018. – September. – 36 p.

2. ***Stathis J.H., Linder B.P., Rodríguez R., Lombardo S.*** Reliability of ultra-thin oxides in CMOS circuits // Microelectronics Reliability. – 2003. – Vol. 43. – No. 9–11. – P. 1353–1360.

3. ***Бенедиктов А.С., Игнатов П.В., Михайлов А.А., Г. Потупчик А.Г.*** Оценка надежности КНИ МОП-транзисторов с нормами 0,18 мкм при повышенных температурах // Микроэлектроника. – 2018. – Т. 47. – № 5.– С. 38–43.

4. Экспрессный контроль надежности подзатворного диэлектрика полупроводниковых приборов / ***В.А. Солодуха, В.А. Пилипенко, Г.Г. Чигирь и др.*** // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 306–313. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-306-313.

5. ***Сивченко А.С.*** Методика определения дефектности подзатворного диэлектрика с использованием ускоренных испытаний тестовых структур // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 3. – С. 304–312.

6. ***Сивченко А.С.*** Разработка методики анализа дефектности подзатворного диэлектрика на тестовых структурах в составе пластин // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем: сб. тр. / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2014. – Ч. II. – С. 145–150.

7. ***Dumin D.J.*** Oxide reliability: A summer of silicon oxide wearout, breakdown and reliability. – World Scientific, 2002. – 270 p.

8. TDDB reliability prediction based on the statistical analysis of hard breakdown including multiple soft breakdown and wear-out / ***S. Sahhaf, R. Degraeve, Ph.J. Roussel et al.*** // Proc. of the 2007 IEEE International Electron Devices Meeting. – 2007. – P. 501–504.

9. ***Andreas Martin, Jochen von Hagen, Glenn B. Alers.*** Ramped current stress for fast and reliable wafer level reliability monitoring of thin gate oxide reliability // Microelectronics Reliability. – 2003. – Vol. 43. – P. 1215–120.

10. ***McPherson J.W.*** Time dependent dielectric breakdown physics – Models revisited // Microelectronics Reliability. – 2012. – Vol. 52. – Iss. 9–10. – P. 1753–1760.

11. Jedec Standart JESD 92. Procedure for characterizing time depend dielectric breakdown of ultra-thin gate dielectrics. – August 2003. – 32 p.

Поступила в редакцию 26.04.2019 г.; после доработки 03.06.2019.; принята к публикации 18.06.2019. г.

Сивченко Александр Сергеевич – научный сотрудник НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), asivchenko@yandex.ru

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

Сауров Александр Николаевич – академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 32А), научный руководитель НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), tc@tcen.ru

References

1. Jedec Standart JEP001–2A. *Foundry process qualification guidelines – front end transistor level.* 2018. September. 36 p.

2. Stathis J.H., Linder B.P., Rodríguez R., and Lombardo S. Reliability of ultra-thin oxides in CMOS circuits. *Microelectronics Reliability*, 2003, vol. 43, no. 9-11, pp. 1353–1360.

3. Benediktov A.S., Ignatov P.V., Mikhailov A.A., Potupchik A.G. Reliability investigation of 0.18-μm SOI MOS transistors at high temperatures. *Mikroelektronika = Microelectronics*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 38–43. (in Russian).

4. Solodukha V.A., Chigir G.G., Pilipenko V.A., Filipenya V.A., Gorushko V.A. Reliability express control of the gate dielectric of semiconductor devices. *Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 306–313. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-306-313. (in Russian).

5. Sivchenko A.S. Methods of determination of defects of gate dielectric using accelerated testing of test structures. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no. 3, pp. 304–312. (in Russian).

6. Sivchenko A.S. Development of defectiveness evaluation method for gate insulators on test structures as part of a wafer. *Problems of advanced micro- and nanoelectronic systems development.* Proceedings. Under the general editorship of a member of the Russian Academy of Sciences A.L. Stempkovskij. Moscow, RAS Publ., 2014, vol. II. Pp. 145–150. (in Russian).

7. Dumin D.J. *Oxide reliability: A summer of silicon oxide wearout, breakdown and reliability.* World Scientific, 2002. 270 p.

8. Sahhaf S. Degraeve R. Roussel Ph.J., Kauerauf T., Kaczer B., Groeseneken G. TDDB reliability prediction based on the statistical analysis of hard breakdown including multiple soft breakdown and wear-out. *Proceedings of the 2007 IEEE International Electron Devices Meeting*, 2007, pp. 501–504.

9. Andreas M., Jochen H., Glenn B., Alers. Ramped current stress for fast and reliable wafer level reliability monitoring of thin gate oxide reliability. *Microelectronics Reliability*, 2003, vol. 43, pp. 1215–120.

10. McPherson J.W. Time dependent dielectric breakdown physics – Models revisited. *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, iss. 9–10, pp. 1753–1760.

11. Jedec Standart JESD 92. *Procedure for characterizing time depend dielectric breakdown of ultra-thin gate dielectrics*. 2003. August. 32 p.

Received 26.04.2019; Revised 03.06.2019; Accepted 18.06.2019.

Alexander S. Sivchenko – Researcher, SMC «Technology Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), asivchenko@yandex.ru

Evgeny V. Kuznetsov – Head of the Laboratory of Advanced Element Base and Technological Routes, SMC «Technology Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), KEV@tcen.ru

Alexander N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Institute of Nanotechnologies of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky ave., 32A), Scientific Head of SMC «Technology Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), tc@tcen.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК [621.382.3:536.37]:681.518.3 **DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-479-488**

Влияние дефектов структуры и конструкции на тепловые характеристики мощных биполярных СВЧ-транзисторов

***В.А. Сергеев*[1,2], *В.И. Смирнов*[1,2], *А.М. Ходаков*[1], *А.А. Куликов*[1], *А.Е. Черняков*[3]**

[1]*Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия*
[2]*Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия*
[3]*Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия*

sva@ulstu.ru

Мощные биполярные СВЧ-транзисторы (МБТ) работают, как правило, в режимах, близких к предельным, что требует контроля качества отвода тепла от активной области кристалла к корпусу транзистора и далее в окружающую среду. Одним из наиболее эффективных является контроль тепловых характеристик МБТ, включая зависимость теплового сопротивления переход – корпус прибора от параметров электрического режима. Однако количественные оценки связи дефектов с измерением тепловых параметров приборов в литературе отсутствуют. В работе представлены результаты моделирования с использованием программной среды COMSOL Multyphisics распределения температуры в структурах МБТ с дефектами электрофизической и теплофизической природы. Получены зависимости максимального перегрева рабочей поверхности кристалла от размера и месторасположения дефектов. Показано, что температурная зависимость плотности мощности, выделяющейся в структуре МБТ, приводит к нелинейной зависимости максимальной и средней температуры поверхности кристалла от полной рассеиваемой в МБТ мощности. Разработанные тепловые модели могут служить основой для создания методик диагностики МБТ по теплоэлектрическим характеристикам и выявления дефектных изделий. Сравнительные измерения тепловых характеристик серийных мощных СВЧ-транзисторов типа КТ920В без дефектов и с искусственно введенным дефектом электрофизического вида в диодном включении на измерителе T3Ster показали, что тепловое сопротивление переход – основание корпуса МБТ с дефектом возросло на 25–40 % по сравнению с тепловым сопротивлением бездефектного прибора. При этом тепловые характеристики

© В.А. Сергеев, В.И. Смирнов, А.М. Ходаков, А.А. Куликов, А.Е. Черняков, 2019

МБТ в диодном включении перехода база – коллектор являются более чувствительными к дефектам структуры, чем в диодном включении перехода эмиттер – база, и соответствуют целям диагностики качества МБТ.

Ключевые слова: мощный биполярный СВЧ-транзистор; тепловая модель; дефекты; тепловые характеристики

Для цитирования: Влияние дефектов структуры и конструкции на тепловые характеристики мощных биполярных СВЧ-транзисторов / В.А. Сергеев, В.И. Смирнов, А.М. Ходаков и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 479–488. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-479-488

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области (проект № 18-47-730024).

Influence of Defects of Structure and Construction on Thermal Characteristics of High-Power Bipolar Microwave Transistors

V.A. Sergeev[1,2], V.I. Smirnov[1,2], A.M. Khodakov[1], A.A. Kulikov[1], A.E. Chernyakov[3]

[1]Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia
[2]Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
[3]Research & Engineering Center of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

sva@ulstu.ru

Abstract: Powerful bipolar microwave transistors (PBT) operate, as a rule, in conditions close to the limiting ones, which requires controlling the release of heat from the active region of the crystal to the transistor body and further to the environment. One of the most efficient is the control of PBT heat characteristics, including the dependence of the heat resistance – the device body on the electrical mode parameters. However, the quantitative evaluations of connection of defects with measuring the heat parameters of devices in literature are absent. In the work the results of modeling using the COMSOL Multiphysics software the temperature distribution in the structures of a power bipolar microwave transistor (PBT), with defects of electrophysical and thermal nature have been presented. The dependences of the maximum overheating of the crystal working surface on the size and location of the defects have been obtained. It has been shown that the temperature dependence of power density released in the structure of PBT leads to a nonlinear dependence of the maximum and average temperature of the crystal surface on the total power dissipated in PBT. The developed thermal models can serve as the basis for creating the methods for diagnosing the PBT of thermoelectric characteristics and identifying the defective products. The comparative measurements of thermal characteristics of the serial high-power microwave transistors of the KT920B type with no defects and with an artificially introduced electrophysical-type defect in a diode switch-on using a T3Ster meter have shown that the thermal resistance

of the body-to-case PBT with the defects has increased by 25–40% compared to the thermal resistance of the defect-free device. In this case, the thermal characteristics of PBT in the diode switching on of the «base-collector» transition are more sensitive to structural defects than in the diode switching on of the emitter-base transition, and more preferable for the purposes of diagnosing the PBT quality.

Keywords: powerful bipolar microwave transistor; thermal model; defects; thermal characteristics; measurement; diagnostics

For citation: Sergeev V.A., Smirnov V.I., Khodakov A.M., Kulikov A.A., Chernyakov A.E. Influence of defects of structure and construction on thermal characteristics of high-power bipolar microwave transistors. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 479–488. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-479-488

Funding: the work has been supported by the RFBR and the government of Ulyanovsk region (project number № 18-47-730024).

Введение. Элементная база современной электроники развивается по нескольким направлениям, среди которых можно выделить силовую электронику (мощные MOSFET- и IGBT-транзисторы) и СВЧ-электронику (HEMT-, MESFET- и HBT-транзисторы). Несмотря на то что мощные биполярные СВЧ-транзисторы (МБТ) по некоторым параметрам уступают перечисленным транзисторам, они активно используются как в силовой электронике, так и в СВЧ-электронике. МБТ работают, как правило, в режимах, близких к предельным, что требует контроля качества отвода тепла от активной области кристалла к корпусу транзистора и далее в окружающую среду. При производстве СВЧ-транзисторов в результате нарушения технологических процессов в структуре и конструкции МБТ возникают макродефекты, приводящие к неоднородному распределению плотности тока и мощности в структуре прибора и, как следствие, к локальным перегревам, теплоэлектрической неустойчивости токораспределения и отказам.

Для контроля качества МБТ используются различные методы. Одним из наиболее эффективных является контроль их тепловых характеристик, включая зависимость теплового сопротивления переход – корпус приборов от параметров электрического режима [1]. Однако количественные оценки связи размеров дефектов с измерением тепловых параметров приборов в литературе не приводятся.

Цель настоящей работы – компьютерное моделирование и экспериментальное исследование изменений тепловых характеристик МБТ при введении в их структуру макродефектов различного вида и размера.

Тепловая модель МБТ с дефектом электрофизического вида. Для исследования тепловых характеристик МБТ с дефектами различного вида в его структуре в работах [2, 3] разработана обобщенная теплоэлектрическая модель с учетом температурной зависимости выделяемой в структуре транзистора плотности тепловой мощности. Геометрия тепловой модели МБТ с дефектом электрофизического вида схематично показана на рис.1.

Слой 1 представляет собой полупроводниковую пластину общей площадью $П_0$ и размерами по соответствующим осям $L_{x1}\times L_{y1}\times L_{z1}$. На рабочей поверхности пластины сформирована приборная (гребенчатая) структура с площадью активной области $П_{ак}$. Полупроводниковая пластина закреплена слоем припоя или теплопроводящего клея на массивном теплоотводе 2 толщиной L_{z2}. Размеры теплоотвода в плоскости *xOy* полага-

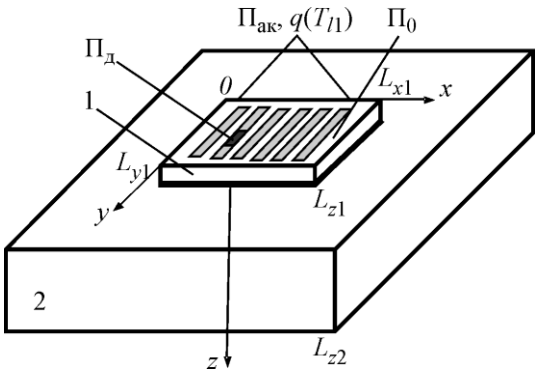


Рис.1. Геометрия тепловой модели МБТ с дефектом электрофизического вида: 1 – полупроводниковая пластина; 2 – теплоотвод

Fig.1. Geometry of the PBT thermal model with defect of an electrophysical look: 1 – semiconductor plate; 2 – heat sink

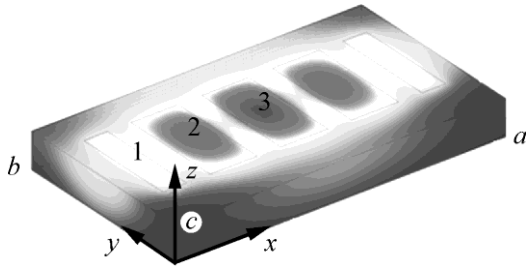


Рис.2. Упрощенная геометрия структуры МБТ типа КТ920В (1–3 – номера групп дорожек металлизации)

Fig.2. The simplified geometry of structure powerful bipolar the microwave oven of the KT920B transistor (1–3 – group numbers of tracks of metallization)

ем неограниченными, поскольку они, как правило, во много раз превосходят соответствующие размеры полупроводниковой пластины. Толщина и глубина залегания активной области приборной структуры малы по сравнению с размерами полупроводниковой пластины, поэтому по аналогии с [3] предполагается, что источники тепла плотностью $q(T_{l1})$ расположены на верхней поверхности пластины в ее активной области $П_{ак}$. Дефект электрофизического вида площадью $П_д$ представляет собой отклонение от номинальных значений электрических (как правило, инжекционных) параметров приборной структуры в некоторой локальной части ее активной области. Наличие дефекта приводит к перераспределению рассеиваемой структурой мощности между дефектной и бездефектной областями структуры даже в изотермическом режиме (до саморазогрева).

Для численного моделирования и сравнения расчетных характеристик с экспериментальными в качестве объекта исследования выбран кремниевый МБТ КТ920В с предельными эксплуатационными параметрами: максимальное напряжение коллектор – эмиттер $U_{КЭmax}$ = 36 В; максимальный ток коллектора I_{Kmax} = 3 А; максимальная мощность P_{max} = 25 Вт; тепловое сопротивление переход – корпус $R_{Tп\text{-}к}$ = 4 К/Вт. Упрощенная конструкция такого МБТ представляет собой закрепленную припоем на массивном медном теплоотводе кремниевую пластину с геометрическими размерами $a \times b \times c$ = 4,4 × 2,5 × 0,48 мм и гребенчатой транзисторной структурой (рис.2).

Рассмотрим частный случай не зависящего от температуры коэффициента теплопроводности полупроводника. Уравнения математической модели и граничные условия для этого случая следующие.

Стационарное уравнение теплопроводности:

$$T_{xx} + T_{yy} + T_{zz} = 0\,. \tag{1}$$

Граничные условия:

$$T_x(0,y,z) = T_x(a,y,z) = 0,\ T_y(x,0,z) = T_y(x,b,z) = 0; \tag{2}$$

$$-\lambda T_z(x,y,c) = \begin{cases} q_{ак}(T_l(x,y,c)),\ \ (x,y) \in (П_{ак} - П_д), \\ q_д(T_l(x,y,c)),\ \ (x,y) \in П_д, \\ 0,\ \ (x,y) \in (П_0 - П_{ак}); \end{cases} \tag{3}$$

$$-\lambda\, T_z(x,y,0) = \alpha_{\text{рас}} T(x,y,0)\,; \tag{4}$$

$$\Pi_0 = \{(x,y): 0 \le x \le a,\ 0 \le y \le b\},$$

где $q_{ак}$, $q_д$ – плотность потоков тепла в бездефектной активной и дефектной областях соответственно; $q_{ак} = U_К J_{ак}$, $q_д = U_К J_д$; $J_{ак}, J_д$ – плотность тока в бездефектной активной и дефектной областях соответственно; $U_К$ – напряжение на коллекторе; $\Pi_{ак}$, $\Pi_д$ – площадь активной области и области дефекта соответственно; λ – коэффициент теплопроводности полупроводниковой структуры; $\alpha_{\text{рас}} = 1/(abR_{\text{рас}})$; $R_{\text{рас}}\left(\lambda_{\text{рас}}\right)$ – тепловое сопротивление растекания [4]; $\lambda_{\text{рас}}$ – коэффициент теплопроводности корпуса транзистора; $T = (T_l - T_0)$; T_l – температура слоя полупроводниковой структуры; T_0 – температура окружающей среды.

При постоянном напряжении на коллекторе ($U_К$ = const) уравнения положительной обратной связи, учитывающие зависимость от температуры плотностей токов в бездефектной активной и дефектной частях области структуры, имеют вид

$$J_{ак}(T_l) = J_{ак0} \exp\left\{-\frac{(E_g - eU_{ЭБ} + r(S_{ак} - S_д)J_{ак}(T_l))}{kT_l}\right\}; \tag{5}$$

$$J_д(T_l) = J_{д0} \exp\left\{-\frac{(E_g - eU_{ЭБ} + r_д S_д J_д(T_l))}{kT_l}\right\}, \tag{6}$$

где E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника; e – заряд электрона; $U_{ЭБ}$ – напряжение эмиттер – база; r и $r_д$ – входное омическое сопротивление бездефектной и дефектной частей транзистора соответственно в схеме с общей базой, $r = r_Э + (1-\alpha) r_Б$; $r_Э$ – сопротивление эмиттера; $r_Б$ – сопротивление базы; α – коэффициент передачи тока в схеме с общей базой; $J_{ак0}$, $J_{д0}$ – слабо зависящие от температуры параметры; k – постоянная Больцмана; $T_l = T_l(x,y,0)$.

Должно выполняться условие включения транзистора в электрическую цепь:

$$\iint\limits_{(S_{ак} - S_д)} J_{ак}(T_l(x,y,0))\,dx\,dy + \iint\limits_{(S_д)} J_д(T_l(x,y,0))\,dx\,dy = I\,. \tag{7}$$

Задача (1) – (7) решалась численным методом с помощью специально разработанной программы с использованием программной среды COMSOL Multiphysics [2]. Теплофизические характеристики кремниевой пластины взяты из базы данных программы COMSOL. Значение коэффициента теплообмена $\alpha_{\text{рас}}$ – подгоночный параметр модели, который выбирался в соответствии с экспериментальными значениями теплового сопротивления переход – корпус транзистора. Сила греющего тока изменялась в пределах I = 0,6...1,25 А, напряжение на коллекторе $U_К$ = 20 В. Имитация электрофизического дефекта проводилась путем последовательного отключения дорожек эмиттера. Исследована зависимость максимальной температуры перегрева p–n-перехода от силы тока I и расположения дефекта в активной области. Наибольшие значения максимального перегрева полупроводниковой структуры транзистора наблюдаются при отключенной второй дорожке (рис.3).

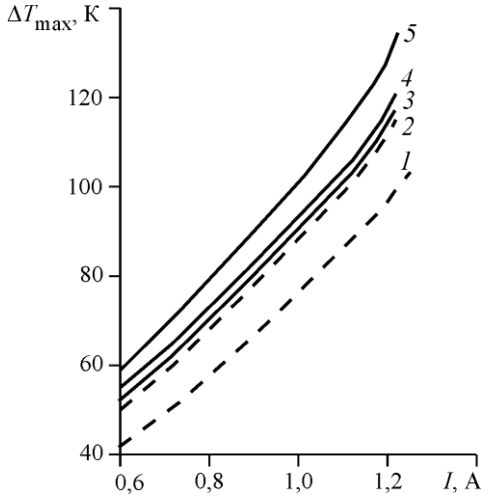


Рис.3. Зависимость максимальной температуры перегрева транзисторной структуры от силы тока и расположения дефекта: пунктир – без дефекта; *1* – $\overline{\Delta T}$; *2* – ΔT_{max}; *3*, *4*, *5* – при отключении первой, третьей и второй групп дорожек соответственно

Fig.3. The maximum overheating of transistor structure depending on arrangement of defect; a dotted line – without defect: *1* – $\overline{\Delta T}$; *2* – ΔT_{max}; at shutdown: *3* – 1 group of tracks; *4* – 3 group of tracks; *5* – 2 group of tracks

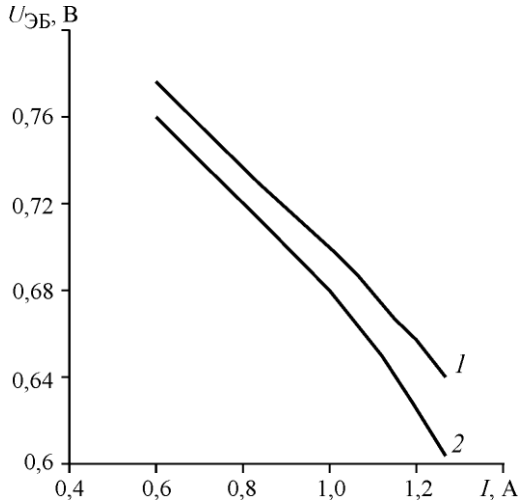


Рис.4. Напряжение эмиттер – база в зависимости от греющего тока при $U_К$ = 20 В: *1* – структура без дефекта; *2* – структура с дефектом

Fig.4. Tension the emitter base depending on size the heating current ($U_К$ = 20 V): *1* – without defect; *2* – with defect

В таблице приведены расчетные значения напряжения на эмиттерном переходе МБТ. На рис.4 показана зависимость напряжения $U_{ЭБ}$ от греющего тока I для бездефектной и дефектной структур при работе транзистора при $U_К$ = 20 В вплоть до предельного режима (P_{max} = 25 Вт). Как видно из графиков, крутизна зависимости $U_{ЭБ}(I)$ МБТ с дефектом больше и может служить косвенным диагностическим параметром при контроле качества МБТ.

Расчетные значения напряжения, В, на эмиттерном переходе МБТ $U_{ЭБ}(I)$
The calculated values of the voltage, V, at the emitter junction $U_{eb}(I)$

МБТ	*I*, А			
	0,6	0,8	1,0	1,25
Без дефекта	0,773	0,738	0,70	0,64
С дефектом	0,762	0,724	0,681	0,61

Теплоэлектрическая модель МБТ с дефектом теплофизического вида. Одним из наиболее распространенных является дефект контактных паяных соединений МБТ – непропаи. Площадь пустот под полупроводниковой пластиной может достигать десятков процентов от площади паяного соединения. Дефекты этого вида приводят не только к ухудшению теплоотвода от кристалла МБТ, но и к перераспределению плотности тока и мощности в транзисторной структуре.

На рис.5 приведена упрощенная конструкция МБТ с дефектом теплофизического вида круглой формы, расположенным в области контакта полупроводникового кристалла и теплоотвода. Занимаемая структурой МБТ пространственная область Ω разделена на четыре подобласти: Ω_1 – полупроводниковая структура; Ω_2, Ω_4 – контактный

слой без дефекта и с дефектом соответственно; Ω_3 – теплоотвод. Неоднородность в контактной области задана модельными параметрами относительного размера дефекта и коэффициента его относительной теплопроводности:

$$K_S = S_д / S_0 < 1, \quad K_d = \lambda_д/\lambda_2 \le 1,$$

где S_0 – площадь верхней поверхности структуры; $\lambda_д$ – коэффициент теплопроводности контактного слоя в области дефекта.

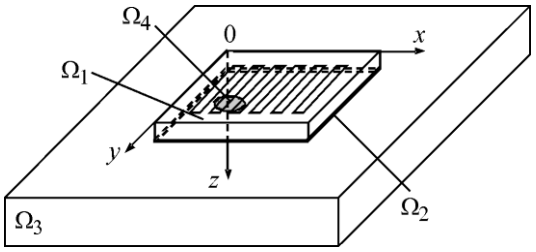


Рис.5. Геометрия тепловой модели МБТ с дефектом теплофизического вида круглой формы
Fig.5. Geometry of the PBT thermal model with circle-shaped defect of thermal nature

Решение задачи теплопроводности с положительной тепловой обратной связью, заданной в виде системы уравнений и граничных условий, получено численным методом в работе [3]. Комплексная программа включала в себя обращение к интерактивной моделирующей среде COMSOL Multiphysics [5]. Расчетные исследования проводились для структуры МБТ, приведенной в качестве примера в работах [2, 3].

На рис.6 представлены распределения температуры верхней поверхности кристалла и области контакта для структур без дефекта и с дефектом, расположенным в геометрическом центре контактной области. Дефект приводит к сильному возрастанию максимальной температуры как на поверхности, так и в области контакта. Средняя температура при этом растет в меньшей степени.

В качестве среды дефектной области с малым коэффициентом теплопроводности выбрана воздушная прослойка ($\lambda_{эф}$ = 0,046 Вт/м·К). В этом расчетном варианте отношения приращений максимальных температур в структурах с дефектом и без него для активной и контактной области составляют 1,5 и 2,0 соответственно. Дефект такого типа может быть внесен в конструкцию МБТ путем просверливания отверстия в корпусе прибора.

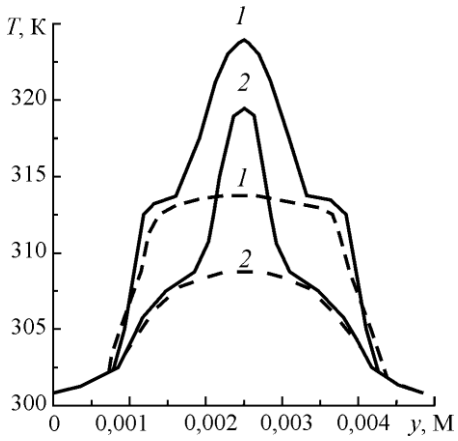


Рис.6. Распределение температуры по поверхности структуры (кривая *1*) и в области контакта (кривая *2*) МБТ без дефекта (пунктир) и с дефектом (сплошная линия) при P = 30 Вт
Fig.6. Distribution of temperature on a surface (curve *1*) of structure and in the field of contact (curve *2*) PBT without defect (the shaped line) and with defect (the continuous line) at the power of 30 W

Тепловые характеристики дефектных и бездефектных МБТ. Для оценки влияния дефектов на тепловые характеристики МБТ проведены сравнительные измерения тепловых характеристик бездефектного и дефектного (с отключенной частью гребенчатой структуры) транзисторов в диодном включении с помощью измерительного комплекса T3Ster [6] Центра коллективного пользования НТЦ микроэлектроники РАН (г. Санкт-Петербург). Результат измерения получен в виде зависимостей куммулятивной структурной функции от теплового сопротивления [6].

На рис.7,*а* приведена данная зависимость для транзисторов типа КТ920В без дефектов и с искусственным дефектом в виде отключенной части гребенчатой структуры

в диодном включении перехода база – коллектор. На начальном участке характеристики, который определяется тепловыми процессами в приборной структуре и контактном соединении, наблюдается общий сдвиг характеристики в сторону больших значений. Пики на характеристике соответствуют тепловому сопротивлению переход – основание корпуса, и у дефектного транзистора компонента теплового сопротивления увеличилась с 2,1 до 2,8 К/Вт (0,33 %). На рис.7,*б* приведена такая же зависимость для транзисторов типа КТ920В без дефектов и с искусственным дефектом в виде отключенной части гребенчатой структуры в диодном включении перехода эмиттер – база. В данном случае также заметно проявляется сдвиг характеристики дефектного прибора вправо (в сторону увеличения тепловых сопротивлений). Однако компонента теплового сопротивления переход – основание корпуса МБТ в этом режиме по абсолютному значению значительно больше, чем в режиме диодного включения перехода база – коллектор, а увеличилась не намного – с 2,8 до 3,2 К/Вт (15%).

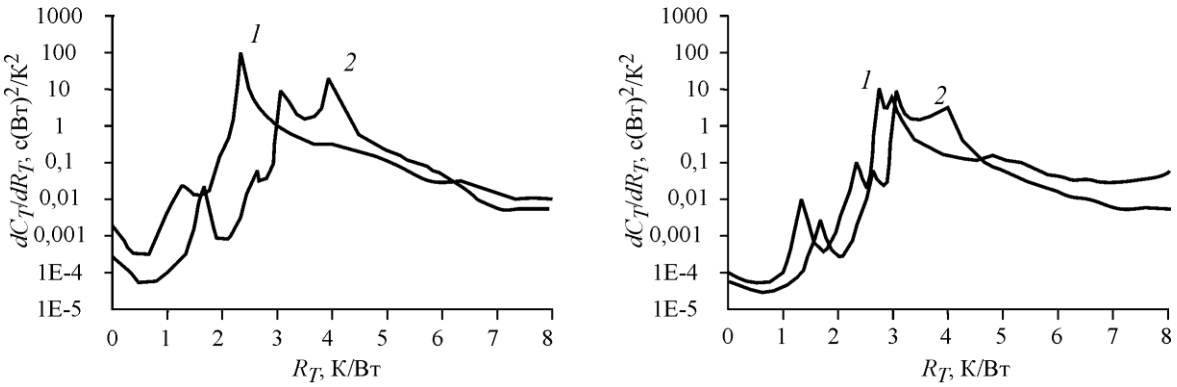


Рис.7. Тепловая характеристика бездефектного (кривая *1*) и дефектного (кривая *2*) МБТ в диодном включении перехода база – коллектор (*а*) и перехода эмиттер – база (*б*) при токе 400 мА
Fig.7. Thermal characteristic faultless (curve *1*) and defective (curve *2*) PBT in diode inclusion of transition «base collector» (*a*) and transition «emitter base» (*b*) at current 400 мА

Заключение. Проведенные расчетные исследования обобщенной математической тепловой модели МБТ с дефектами электрофизического и теплофизического видов показали нелинейный характер зависимостей средней и максимальной температуры активной области структуры от рассеиваемой мощности и позволили оценить влияние размера и местоположения дефекта на максимальный перегрев структуры.

Результаты измерения тепловых характеристик бездефектных и дефектных (с отключенной частью гребенчатой структуры) транзисторов КТ920В в диодном включении с помощью измерительного комплекса T3Ster показали следующее. Тепловые характеристики МБТ в диодном включении перехода база – коллектор более чувствительны к дефектам структуры, чем в диодном включении перехода эмиттер – база, и соответствуют целям диагностики качества МБТ.

Литература

1. ***Сергеев В.А.*** Контроль качества мощных транзисторов по теплофизическим параметрам. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 256 с.

2. ***Сергеев В.А., Ходаков А.М.*** Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 160 с.

3. ***Сергеев В.А., Ходаков А.М.*** Теплоэлектрические модели мощных биполярных полупроводниковых приборов. I. Модель высокочастотного транзистора с дефектами // Радиотехника и электроника. – 2015. – № 10. – С. 1097.

4. ***Sadeghi E., Bahrami M., Djilali N.*** Thermal spreading resistance of arbitrary-shape heat sources on a half-space: a unified approach // IEEE Trans Components Pack Technol. – 2010. – No. 33. – P. 267–277.

5. ***Ходаков А.М., Сергеев В.А.*** Комплексная программа моделирования и расчета температурных полей в биполярных осесимметричных структурах полупроводниковых изделий с температурозависимой плотностью мощности // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. – 2010. – №4. – С. 239.

6. T3Ster. – URL: https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/t3ster/ (дата обращения: 02.03.2019г.)

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.; после доработки 18.03.2019 г.; принята к публикации 18.06.2019 г.

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, профессор, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), sva@ulstu.ru

Смирнов Виталий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и технологии электронных средств Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), smirnov-vi@mail.ru

Ходаков Александр Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), ufire@mv.ru

Куликов Александр Александрович – кандидат технических наук, ведущий инженер Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), kulikovaa36@yandex.ru

Черняков Антон Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, литера 3), chernyakov.anton@yandex.ru

References

1. Sergeev V.A. *Quality control of high-power transistors by thermophysical parameters.* Ulyanovsk, UlSTU Publ., 2000. 256 p. (Russian).

2. Sergeev V.A., Khodakov A.M. *Nonlinear thermal models of semiconductor devices.* Ulyanovsk, UlSTU Publ., 2012. 160 p. (Russian).

3. Sergeev V.A., Khodakov A.M. Thermoelectric models of high-power bipolar semiconductor devices. I. Model high-frequency transistor with defects. *Radiotekhnika i elektronika = Journal of Communications Technology and Electronics,* 2015, no. 10, pp. 1141–1146. (Russian).

4. Sadeghi E., Bahrami M., Djilali N. Thermal spreading resistance of arbitrary-shape heat sources on a half-space: a unified approach. *IEEE Trans. Components Pack Technol*., 2010, no. 33, pp. 267–277.

5. Khodakov A.M., Sergeev V.A. Comprehensive program of modeling and calculation of temperature fields in bipolar axisymmetric structures of semiconductor products with temperature-dependent power density. Bulletin «*Computer Programs, databases, topologies of integrated microcircuits*», 2010, no. 4, p. 239. (Russian).

6. *T3Ster*. Available at: https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/t3ster/ (accessed 02.04.2019).

Received 18.03.2019; Revised 18.03.2019; Accepted 18.06.2019.

Information about the authors:

Vyacheslav A. Sergeev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharova st., 48/2), Head of the Radioengineering, Opto- and Nanolectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), sva@ulstu.ru

Vitaliy I. Smirnov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Senior Scientific Researcher, Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), Prof. of the Electronic Technology and Design Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), smirnov-vi@mail.ru

Alexander M. Khodakov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher, Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), ufire@mv.ru.

Alexander A. Kulikov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), kulikovaa36@yandex.ru

Anton E. Chernyakov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher, Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center of Russian Academy of Sciences (Russia,194021, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 26, litera 3), chernyakov.anton@yandex.ru

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

С тематическими указателями статей за 1996 - 2018 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

http://ivuz-e.ru

УДК 621.377.624.6:004.942 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-489-502

Динамика вектора намагниченности свободного слоя спин-вентильной структуры в магнитном поле, перпендикулярном плоскости слоев

Ю.А. Юсипова

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

linda_nike@mail.ru

Слоистые спин-вентильные структуры применяются в таких микроэлектронных устройствах, как магниторезистивная память с произвольным доступом, различные спин-трансферные наноосцилляторы и бинарный стохастический нейрон, используемый для реализации вероятностной спиновой логики. Выбор базовых режимов работы спинового вентиля для этих микроэлектронных устройств является актуальной задачей. В работе рассмотрена математическая модель спинового вентиля квадратного поперечного сечения с продольной анизотропией, помещенного в магнитное поле, перпендикулярное оси анизотропии и плоскости слоев. С помощью качественного анализа полученной системы уравнений, описывающей динамику вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля, определены равновесные распределения намагниченности свободного слоя для спин-вентильной структуры. Бифуркационный анализ динамической системы уравнений выявил условия смены типа особых точек системы. Проведенное исследование динамики вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля позволило выбрать основные режимы его работы в качестве составляющей магниторезистивной памяти, спин-трансферного наноосциллятора и бинарного стохастического нейрона. Определены диапазоны магнитного поля и тока, соответствующие оптимальным параметрам работы данных устройств, включая частотные и амплитудные характеристики спин-трансферных наноосцилляторов и характеристики быстродействия переключательных элементов.

Ключевые слова: спиновый вентиль; магниторезистивная память с произвольным доступом; бинарный стохастический нейрон; вероятностная спиновая логика; спин-трансферный наноосциллятор; PSL; MRAM; p-bit; STNO

Для цитирования: Юсипова Ю.А. Динамика вектора намагниченности свободного слоя спин-вентильной структуры в магнитном поле, перпендикулярном плоскости слоев // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 489–502. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-489-502

© Ю.А. Юсипова, 2019

Free-Layer Magnetization Vector Dynamics of the Spin-Valve Structure in the Magnetic Field Perpendicular to the Layers Plane

Iu.A. Iusipova

Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow

linda_nike@mail.ru

Abstract: In the years since the discovery of giant magnetoresistance, a layered spin-valve structure has found application in a large number of microelectronic devices such as magnetoresistive random access memory, a variety of spin-transfer nanooscillators and stochastic binary neurons used to implement the probabilistic spin logic. Therefore, the identification of the basic modes of operation of the spin valve for these microelectronic devices is an important task. To solve this problem, a mathematical model of a spin valve, of square cross-section, with longitudinal anisotropy, placed in a magnetic field perpendicular to the anisotropy axis and the plane of the layers has been studied. A qualitative analysis of the obtained system of equations describing the dynamics of the magnetization vector of the free layer of the spin valve has allowed determination of the equilibrium states of the magnetization in the free layer of the spin-valve structure. Bifurcation analysis of the dynamic system of equations revealed conditions for changing the type of singular points of the system. Based on the study of the dynamics of the magnetization vector in the free layer, the most suitable modes for the operation of the magnetoresistive memory, spin-transfer nanooscillator and binary stochastic neuron have been chosen. The ranges of the magnetic field and current corresponding to the optimal performance parameters of these devices including the frequency and amplitude characteristics of spin-transfer nano-oscillators have been determined.

Keywords: spin valve; MRAM; STNO; p-bit; PSL; magnetoresistive random-access memory; probability spin logic; binary stochastic neuron; spin-transfer nanooscillator

For citation: Iusipova Iu.A. Free-layer magnetization vector dynamics of the spin-valve structure in the magnetic field perpendicular to the layers plane. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 489–502. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-489-502

Введение. Современные микроэлектронные устройства, основными элементами которых являются слоистые спин-вентильные структуры, отличаются высокой надежностью, радиационной стойкостью, широким температурным диапазоном и малым временем отклика на электрические и магнитные воздействия. Основу архитектуры таких микроэлектронных устройств, как магниторезистивная память с произвольным доступом (MRAM), считывающие головки жестких дисков, различные спин-трасферные наноосцилляторы (STNO), составляют спиновые вентили. Для реализации вероятностной спиновой логики (PSL) также используются спиновые вентили. MRAM имеет преимущества перед другими видами памяти: энергонезависимость, неограниченное количество циклов перезаписи, широкий температурный диапазон (от –40 до +125 °C), высокая радиационная стойкость и время перезаписи 10–20 нс [1]. STNO

имеют возможность изменять частоту осцилляций в широком диапазоне с помощью приложенного электрического тока и магнитного поля. Поэтому STNO конкурируют с используемыми в настоящее время генераторами микроволнового излучения по частотным и амплитудным характеристикам [2]. PSL, основанная на сетях бинарных стохастических нейронов (p-bit), – новое направление современной наноэлектроники, определяющее архитектуру генераторов случайных чисел, нейронных сетей, использующих байесовский статистический вывод [3] и обратимую булеву логику [4], квантовых компьютеров на базе модели Изинга [5–7], а также устройств распознавания изображений [8].

Теоретическая модель явления переноса спинового момента, которое лежит в основе работы спинового вентиля, предложена Дж. Слончевским в 1996 г. [9]. Динамика вектора намагниченности спинового вентиля с продольной анизотропией при воздействии магнитного поля, приложенного вдоль оси анизотропии, исследована в работах [10–12], а при воздействии магнитного поля, приложенного перпендикулярно оси анизотропии и параллельно плоскости слоев, – в работе [13].

Цель настоящей работы – изучение спинового вентиля с продольной анизотропией при воздействии магнитного поля, перпендикулярного оси анизотропии и плоскости слоев. Динамические режимы работы спинового вентиля, представляющие практическую ценность, – это переключение с одним или двумя исходами и режим прецессии. Основным режимом работы MRAM является переключательный режим из неустойчивого положения равновесия в единственно устойчивое [10]. PSL применяется при создании нейронных сетей, использующих стохастические методы расчетов, которые предполагают несколько вероятных исходов [3]. Прецессия вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля применяется в работе STNO [14].

Основные уравнения. Рассмотрим спиновый вентиль с квадратным поперечным сечением со стороной 11 нм, ферромагнитные слои которого изготовлены из монокристаллического кобальта. Оси *OX* и *OY* системы декартовых координат, связанной со структурой, ориентированы вдоль сторон квадрата. Ось *OZ* перпендикулярна плоскости слоев. Ось легкого намагничивания ферромагнитных слоев параллельна оси *OX*. Направление вектора намагниченности тонкого (свободного) слоя **M** может изменяться, в то время как намагниченность толстого (закрепленного) слоя фиксирована. Толщина свободного слоя d_1 = 2 нм, толщина закрепленного слоя d_2 = 5 нм. Спиновый вентиль помещен в магнитное поле **H**, направленное вдоль оси *OZ*. В противоположном направлении пропускается электрический ток плотностью *J*.

В данной системе макроспиновая динамика вектора намагниченности свободного слоя **M** описывается уравнением Ландау – Лифшица – Гильберта [9]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -|\gamma|\mu_0 \left[\mathbf{M}\times\mathbf{H}_{eff}\right] + \frac{\alpha}{M_s}\left[\mathbf{M}\times\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t}\right], \qquad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение; α – безразмерный коэффициент диссипации; M_s – намагниченность насыщения.

Эффективное магнитное поле $\mathbf{H}_{eff}$ включает в себя следующие виды физических взаимодействий:

- внешнее магнитное поле $\mathbf{H}$, направленное вдоль оси *OZ* $\left(\mathbf{H} = H\mathbf{e}_z\right)$;

- эффективное поле магнитной анизотропии $\mathbf{H}_a$, направленное вдоль оси *OX*, которое определяется соотношением $\mathbf{H}_a = 2K_a\mu_0^{-1}M_s^{-2}(\mathrm{M},\mathbf{e}_x)\mathbf{e}_x = 2K_a\mu_0^{-1}M_s^{-2}M_x\mathbf{e}_x$, где K_a – константа анизотропии;

- эффективное поле размагничивания, возникающее за счет конечных размеров вентильной структуры $\mathbf{H}_f$ в выбранной геометрии, можно считать равным $-M_z\mathbf{e}_z$;

- эффективное поле, созданное спин-поляризованным током инжекции $\mathbf{H}_c = G\dfrac{J\hbar}{d_1 e\mu_0 M_s^{\,2}}[\mathbf{s}\times\mathbf{M}]$, где G – коэффициент токовой поляризации; $\mathbf{s}$ – направление спиновой поляризации тока, совпадающее с направлением намагниченности в толстом слое (в данной геометрии $\mathbf{s}\equiv\mathbf{e}_x$).

Уравнение (1) можно привести к безразмерному виду, используя следующие нормировки: $\mathbf{m}=\dfrac{\mathbf{M}}{M_s}$; $\mathbf{h}_{eff}=\dfrac{\mathbf{H}_{eff}}{M_s}$; $\mathbf{h}=\dfrac{\mathbf{H}}{M_s}$; $\tau=\dfrac{t\gamma\mu_0 M_s}{(1+\alpha^2)}$; $j=\dfrac{J\hbar}{d_1 e\mu_0 M_s^{\,2}}$; $k=\dfrac{2K_a}{\mu_0 M_s^2}$. В результате имеем

$$\frac{\partial\mathbf{m}}{\partial\tau}=-\left[\mathbf{m}\times\mathbf{h}_{eff}\right]+\alpha\mathbf{h}_{eff}-\alpha\mathbf{m}(\mathbf{m},\mathbf{h}_{eff}). \qquad (2)$$

Коэффициент токовой поляризации как скалярная безразмерная функция $G(\mathbf{m})$, согласно [9], определяется выражением

$$G=\frac{4P^{3/2}}{(1+P)^3(3+\mathbf{ms})-16P^{3/2}}=\frac{c}{b+m_x},$$

где $c=\dfrac{4P^{3/2}}{(1+P)^3}$; $b=3-4c$; $P=\dfrac{n_\uparrow-n_\downarrow}{n_\uparrow+n_\downarrow}$ – параметр спиновой поляризации; m_x – проекция вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля на ось OX.

Качественный анализ динамической системы. Для нахождения точек равновесия вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля правую часть системы (2) необходимо приравнять к нулю. Тогда путем последовательного исключения переменных получим выражения для расчета координаты m_x особых точек:

$$A_6 m_x^{\,6}+A_5 m_x^{\,5}+A_4 m_x^{\,4}+A_3 m_x^{\,3}+A_2 m_x^{\,2}+A_1 m_x+A_0=0, \qquad (3а)$$

где

$$A_6=k^2(k+1)^2;$$
$$A_5=4bk^2(k+1)^2;$$
$$A_4=k(kh^2-2k^2-k^3-k+6b^2k+12b^2k^2+6b^2k^3+2c^2j^2+2kc^2j^2);$$
$$A_3=4bk(b^2k-2k^2-k^3-k+2b^2k^2+b^2k^3+kh^2+c^2j^2+kc^2j^2);$$
$$A_2=k^4(b^4-6b^2)+k^3(2b^4-12b^2)+k^2(b^4-6b^2+6h^2b^2-2c^2j^2+2b^2c^2j^2)+$$
$$+k(2b^2c^2j^2-2c^2j^2)+c^4j^4+h^2c^2j^2;$$
$$A_1=-4b^3k^4-8b^3k^3-2bk^2(2b^2-2h^2b^2+2c^2j^2)-4bkc^2j^2+2h^2bc^2j^2;$$
$$A_0=-b^4k^4-2b^4k^3+k^2(h^2b^4-b^4-2b^2c^2j^2)-2kb^2c^2j^2-c^4j^4+b^2c^2j^2h^2;$$

$$m_x=0. \qquad (3б)$$

Уравнение (3а) отвечает двум положениям равновесия, которые при нулевом магнитном поле имеют координаты $T_1(1;0;0)$ и $T_2(-1;0;0)$. Уравнение (3б) отвечает четырем положениям равновесия, которые при нулевом токе и поле имеют координаты: $T_3(0;0;1)$, $T_4(0;0;-1)$, $T_5(0;1;0)$ и $T_6(0;-1;0)$. Это соответствует результатам, полученным в работах [10–13].

На рис.1 показана бифуркационная диаграмма при $|m_x, m_y, m_z|<1$, построенная на плоскости (H, J), где m_y, m_z – проекции вектора **m** на оси *OY* и *OZ* соответственно. Линии p и p' ограничивают области существования точек T_1 и T_2, линии q и q' – точек T_3, T_4, T_5 и T_6. Линии q и q' пересекают ось J в точке $J_{q,q'} = \dfrac{d_1 e \mu_0 M_s^2 b}{2c\hbar}$, а ось H в точках $H_q = M_s$ и $H_{q'} = -M_s$. Линии p и p' пересекают ось H в точках $H_p = \dfrac{2K_a + M_s\mu_0}{\mu_0}$ и $H_{p'} = -\dfrac{2K_a + M_s\mu_0}{\mu_0}$.

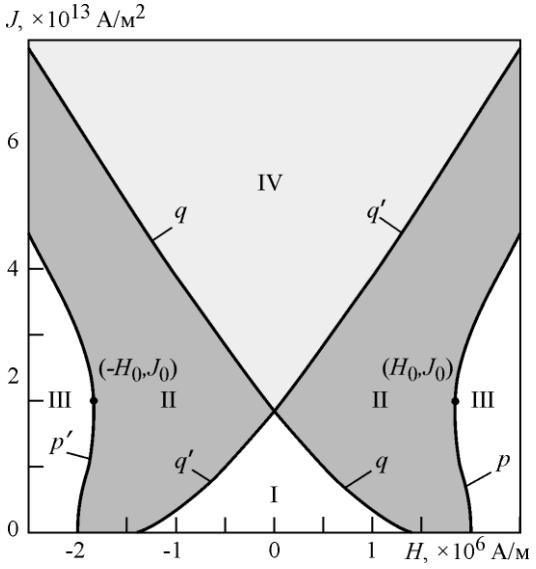


Рис.1. Бифуркационная диаграмма при ($|m_x, m_y, m_z|\leq 1$)
Fig.1. Bifurcation diagram for the number of the singular points ($|m_x, m_y, m_z|\leq 1$)

Таким образом, в каждой точке области I существуют шесть особых точек, в каждой точке областей II – четыре особые точки T_1, T_2 T_4 и T_6. В каждой точке области III существуют две особые точки T_4 и T_6, а в области IV – две особые точки T_1 и T_2.

Рассмотрим траектории смещения координат особых точек T_1 и T_2 при фиксированном магнитном поле и растущем токе, рассчитанные для положительных магнитных полей во второй четверти единичной сферы (рис.2,*а*). В случае приложения отрицательного магнитного поля возникают симметричные относительно оси *OX* траектории в четвертой четверти единичной сферы. При нулевом токе J и $|H| < \dfrac{2K_a + M_s\mu_0}{\mu_0}$ точки T_1 и T_2 имеют координаты $\left(\pm\dfrac{\sqrt{(k+1)^2 - h^2}}{k+1}, 0, \dfrac{h}{k+1}\right)$ соответственно. При $J \to \infty$ точки T_1 и T_2 имеют координаты $(\pm 1, 0, 0)$ соответственно. В случае приложения фиксированного ненулевого магнитного поля $|H| < \sqrt{\dfrac{8K_a M_s}{\mu_0}}$ и растущего тока траектории движения точек T_1 и T_2 имеют непрерывный характер. Выходя из точек на окружности $m_y = 0$, они отклоняются в сторону $(0;-1;0)$ при положительных полях или в сторону $(0;1;0)$ при отрицательных, а затем при больших токах стремятся к координатам $(\pm 1, 0, 0)$. На рис.2,*а* такие траектории показаны пунктирными линиями: *1* – при $H = 7\cdot 10^5$ А/м, *2* – при $H = 1{,}4\cdot 10^6$ А/м, *3* – при $H = 1{,}75\cdot 10^6$ А/м.

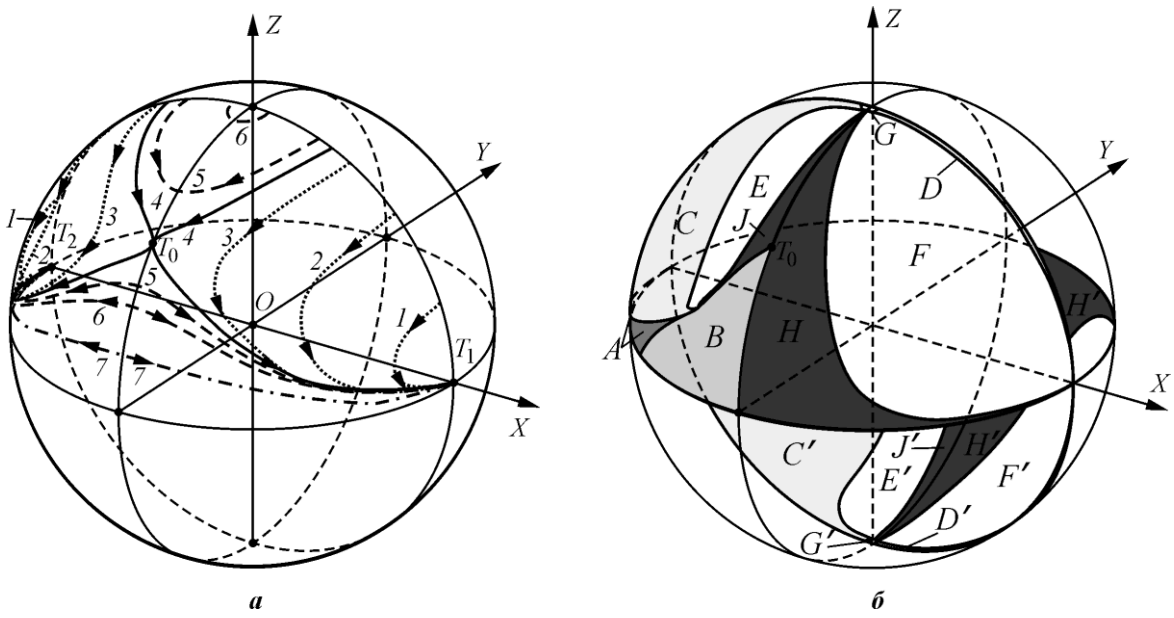


Рис.2. Траектории изменения координат особых точек T_1 и T_2 при фиксированных положительных магнитных полях (*а*) и области смены типа особых точек (*б*)
Fig.2. Tracks of singular points T_1 and T_2 on the unit sphere at the fixed positive magnetic fields (*a*) and change of type of singular points T_1 and T_2 (*b*)

Когда магнитное поле достигает значения $H_0 = \sqrt{\dfrac{8K_aM_s}{\mu_0}}$, траектории точек T_1 и T_2 проходят через точку бифуркации $T_0\left(0;-\sqrt{1-k};\sqrt{k}\right)$ при токе $J_0 = \dfrac{bdeM_s\sqrt{2K_a(\mu_0M_s-2K_a)}}{cH_0}$. Эта траектория показана сплошной черной линией *4* на рис.2,*а* при $H_0 = 1{,}84\cdot10^6$ А/м. На бифуркационной диаграмме (см. рис.1) координаты (H_0, J_0) соответствуют точке поворота линии p, а координаты $(-H_0, J_0)$ – точке поворота линии p'. В последнем случае имеем координаты точки бифуркации $T_0'\left(0;\sqrt{1-k};-\sqrt{k}\right)$.

При фиксированном магнитном поле, когда $\sqrt{\dfrac{8K_aM_s}{\mu_0}} < |H| < \dfrac{2K_a+M_s\mu_0}{\mu_0}$, траектории изменения координат точек T_1 и T_2 имеют разрывный характер. Сначала точки T_1 и T_2 движутся в сторону окружности $m_x = 0$ и при ее достижении аннигилируют. В этот момент значения магнитного поля и тока соответствуют точке на линии p для $H > 0$ или на линии p' для $H < 0$. При последующем увеличении тока и достижении линии p или p' точки T_1 и T_2 вновь возникают на окружности $m_x = 0$ и продолжают движение к координатам (1; 0; 0) и (–1; 0; 0) соответственно. Отметим, что чем больше значение магнитного поля, тем дальше друг от друга координаты точек аннигиляции и возникновения. На рис.2,*а* такие траектории отмечены штриховой линией: *5* – при $H = 1{,}89\cdot10^6$ А/м, *6* – при $H = 2\cdot10^6$ А/м.

При фиксированном магнитном поле и условии $|H| > \frac{2K_a + M_s\mu_0}{\mu_0}$ траектории смещения координат особых точек T_1 и T_2 имеют непрерывный характер. Начало этих траекторий всегда находится в общей точке на окружности $m_x = 0$, координаты которой зависят от значений тока и магнитного поля. Отметим, что при увеличении магнитного поля модуль координаты m_y растет в интервале $\left[\frac{2b\sqrt{1-k}}{bk-k-2+4b},\ 1\right)$, в то время как модуль координаты m_z падает в интервале $\left(0,\ \frac{k+2+bk-2b}{2b}\right]$. При $J \to \infty$ точки T_1 и T_2 стремятся к координатам $(\pm 1, 0, 0)$ (штрихпунктирная линия *7* на рис.2,*а* при $H = 2{,}8 \cdot 10^6$ А/м).

Рассмотрим траектории смещения координат особых точек T_1 и T_2 при фиксированном токе и растущем магнитном поле. В случае когда $J = 0$, а магнитное поле, приложенное вдоль оси OZ, постепенно увеличивается, координаты точек T_1 и T_2 смещаются вдоль окружности $m_y = 0$. Если $H > 0$, то точки смещаются в сторону координаты (0; 0; 1), если $H < 0$ – в сторону (0; 0; –1). При достижении значения магнитного поля $|H| = \frac{2K_a + \mu_0 M_s}{\mu_0}$ точки T_1 и T_2 аннигилируют: в точке (0;0;1) при положительном магнитном поле, в точке (0; 0;–1) при отрицательном. В случае $J \neq 0$ и $H > 0$ траектория движения точек проходит по дуге выше экватора во второй четверти единичной сферы, в обратном случае – по дуге ниже экватора в четвертой четверти единичной сферы. Траектории движения точки T_1 всегда начинаются в координате $(1,0,0)$, а траектории движения точки T_2 – в координате $(-1,0,0)$. При этом обе точки аннигилируют, одновременно достигнув одной и той же точки на окружности $m_x = 0$. Чем больше значение тока, тем ближе координата точки аннигиляции к $(0,-1,0)$ при положительных магнитных полях и к $(0,1,0)$ при отрицательных.

При положительных магнитных полях координаты точек T_1 и T_2 находятся во второй четверти единичной сферы, а при отрицательных – в четвертой (рис.2,*б*). При этом области смены типа особых точек симметричны относительно оси OX. В областях D и D' особая точка T_1 относится к типу устойчивый фокус (УФ), в областях F и F' – неустойчивый фокус (НФ), а в H и H' – неустойчивый узел (НУ). Особая точка T_2 в областях A и A' относится к типу устойчивый узел (УУ), в J и J' – НУ, в областях C и C' – УФ, в B и B' – седло (С), а в E и E' – НФ. Точка T_0 находится на стыке областей J, B и H, а точка T_0' – на стыке областей J', B' и H'.

При изменении тока и поля особые точки T_3, T_4, T_5 и T_6 также меняют свои координаты. Так как согласно выражению (3б) компонента m_x вектора намагниченности в этих точках равна нулю, смещение их координат происходит вдоль окружности, плоскость которой перпендикулярна оси OX. В случае ненулевого тока бóльшим токам со-

ответствует смещение точек T_5 и T_6 против часовой стрелки, а точек T_3 и T_4 по часовой стрелке. Это согласуется с результатами, полученными в работах [10–13]. При приложении магнитного поля вдоль оси OZ точки T_3 и T_5 смещаются против часовой стрелки, а точки T_4 и T_6 – по часовой стрелке.

На рис.3 изображены бифуркационные диаграммы с областями смены типа особых точек для положительных магнитных полей.

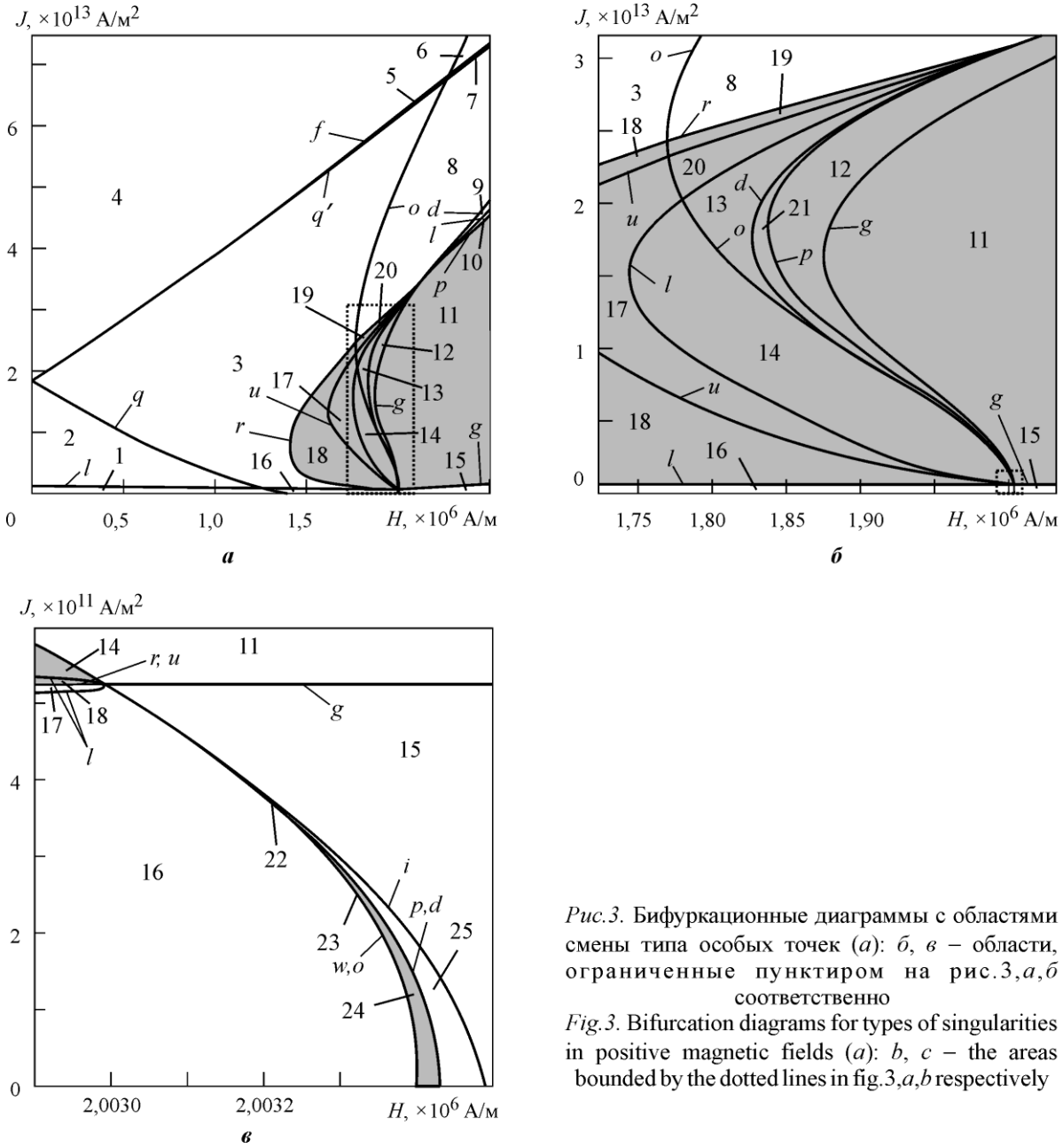


Рис.3. Бифуркационные диаграммы с областями смены типа особых точек (*а*): *б*, *в* – области, ограниченные пунктиром на рис.3,*а*,*б* соответственно

Fig.3. Bifurcation diagrams for types of singularities in positive magnetic fields (*a*): *b*, *c* – the areas bounded by the dotted lines in fig.3,*a*,*b* respectively

Линии бифуркации l, o, w рассчитаны по выражению (3а), а линии f, g, i – по (3б). Линии w и i выходят из точки пересечения линий p, d, o и касания линий l и g (рис.3,*в*). В табл.1 приведены типы особых точек в областях на рис.1 и 3.

Таблица 1

Соответствие между областями и типами особых точек в этих областях

Table 1

The correspondence between the area numbers and the types of special points that exist in these areas

Область		Тип особых точек					
см. рис.1	см. рис.3	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
I	1	УФ	УФ	НФ	НФ	С	С
I	2	НФ	УФ	НФ	НФ	С	С
II	3	НФ	УФ	-	НФ	-	С
II	5	НФ	УФ	-	НУ	-	С
II	7	НУ	УФ	-	НУ	-	С
II	8	НУ	УФ	-	НФ	-	С
II	9	С	УФ	-	НФ	-	НФ
II	10	С	УУ	-	НФ	-	НФ
II	13	НУ	НФ	-	НФ	-	С
II	14	НФ	НФ	-	НФ	-	С
II	16	УФ	УФ	-	НФ	-	С
II	17	НФ	УФ	-	НФ	-	С
II	18	НФ	УФ	-	НФ	-	С
II	21	НУ	НУ	-	С	-	НФ
II	22	НУ	НФ	-	НФ	-	С
II	23	УФ	УУ	-	НФ	-	С
II	24	УУ	УУ	-	НФ	-	С
II	19	НУ	УФ	-	НФ	-	С
II	20	НУ	УФ	-	НФ	-	С
III	11	-	-	-	НФ	-	НФ
III	12	-	-	-	НФ	-	НУ
III	15	-	-	-	УФ	-	НФ
III	25	-	-	-	УУ	-	НФ
IV	4	НФ	УФ	-	-	-	-
IV	6	НУ	УФ	-	-	-	-

Динамика вектора намагниченности в положительных магнитных полях. На рис.4 представлена классификация типов динамики вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля в положительных полях и токах. Траектории конца вектора намагниченности рассчитаны методом Рунге – Кутты четвертого порядка.

На рис.4,*а–г* изображены переключательные режимы спинового вентиля. При малых токах и полях (области 1, 16 на рис.3) имеет место переключение спинового вентиля с двумя вероятными исходами (см. рис.4,*а*). Так как в этом случае точки T_5 и T_6 являются С, а T_3 и T_4 – НФ, то переключение может происходить в один из УФ T_1 и T_2.

На рис.4,*б* показано переключение спинового вентиля из неустойчивых положений равновесия в УФ T_2 (области 2–9 на рис.3,*а*). Тип динамики вектора намагниченности на рис.4,*в*, наблюдаемый в области 10 на рис.3,*а*, отличается от типа динамики вектора на рис.4,*б* отсутствием искривлений траектории при приближении к точке T_2. Это отличие обусловлено тем, что точка T_2 в данном случае является УУ. На рис.4,*г* показано переключение спинового вентиля из неустойчивого положения равновесия в УФ T_3 (области 15, 23, 25 на рис.3).

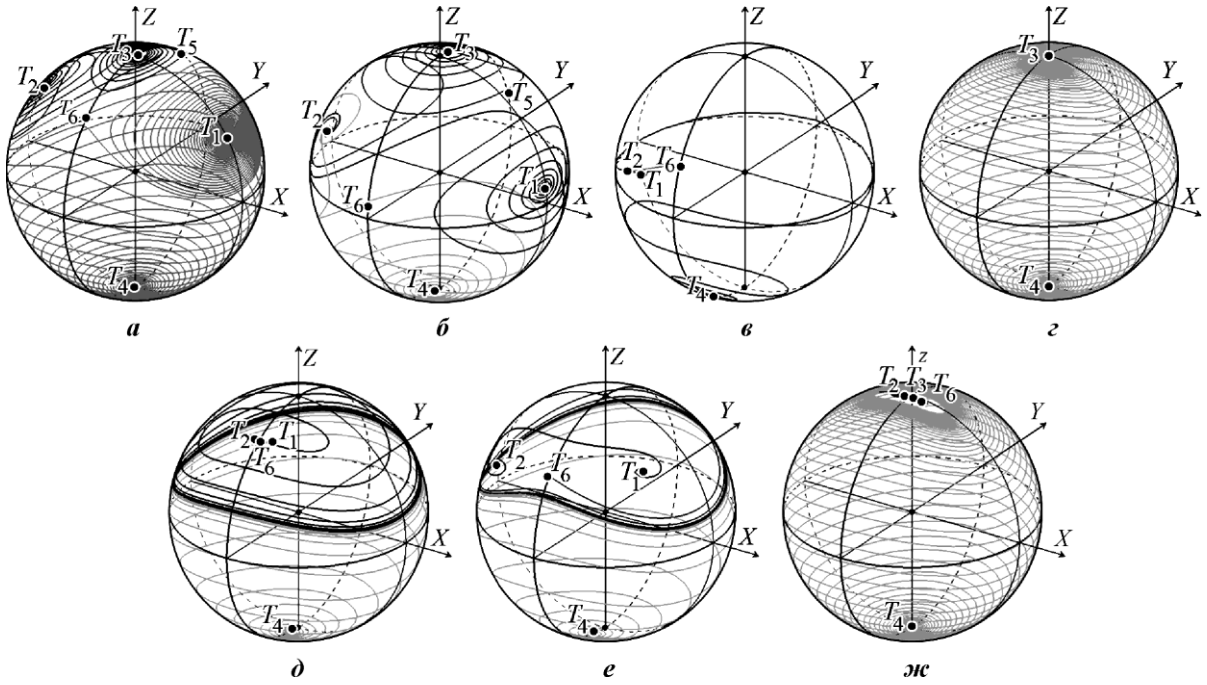


Рис.4. Динамика вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля в положительных полях и токах: *а* – переключение с двумя вероятными исходами; *б* – переключение в УФ T_2; *в* – переключение в УУ T_2; *г* – переключение в УФ T_5; *д* – устойчивый предельный цикл; *е* – режим с двумя вероятными исходами (переключение в УФ T_2 или «наматывание» на устойчивый предельный цикл); *ж* – неустойчивый предельный цикл

Fig.4. Dynamics of the magnetization vector of the free layer of the spin valve in positive fields and currents: *a* – switching dynamics with two probable outcomes; *b* – switching dynamics to the stable focus T_2; *c* – switching dynamics to the stable node T_2; *d* – switching dynamics to the stable focus T_5; *e* – dynamics with the stable limit cycle; *f* – mode with two possible outcomes (switching to steady focus or winding to steady limit cycle); *g* – dynamics with the unstable limit cycle

На рис.4,*д–ж* приведены типы динамики вектора намагниченности с предельными циклами. Области, в которых наблюдаются предельные циклы, на рис.3 показаны серым цветом. В областях 11–14, 21, 22 на рис.3, где нет ни одной устойчивой точки, наблюдается тип динамики вектора намагниченности с устойчивым предельным циклом, показанный на рис.4,*д*. В областях, ограниченных линиями u и l (области 17, 20 на рис.3), где УФ T_2 приближается достаточно близко к С T_1, также наблюдается этот тип динамики вектора намагниченности.

На рис.4,*е* представлены тип динамики намагниченности с двумя вероятными исходами: переключение в УФ T_2 и «наматывание» траектории на предельный цикл. Такой тип динамики намагниченности наблюдается в областях 18 и 20 на рис. 3, ограниченных линиями r, u и l. Линии r и u получены численным методом с помощью моделирования динамики вектора намагниченности. Они выходят из точки касания линий l и o (см. рис.3,*в*), а заканчиваются в точке пересечения l и p (см. рис.3,*а*,*б*).

При малых токах ($J < 5 \cdot 10^{11}$ А / м^2) и положительных магнитных полях, приближенных к $\dfrac{2K_a + M_s\mu_0}{\mu_0}$ (области 22–25 на рис.3,*в*), координаты точек T_1, T_2 и T_6 находятся в трапециевидной области G (см. рис.2,*б*). В этом случае вокруг этих точек возникает неустойчивый предельный цикл, показанный на рис.4,*ж*.

Основным режимом работы спинового вентиля как составляющей ячейки MRAM является переключательный режим, который позволяет перевести вектор намагниченности свободного слоя в антипараллельное положение вектору намагниченности закрепленного слоя, т.е. переключиться из неустойчивого положения T_1 в устойчивое T_2 (см. рис.4,*б*,*в*). При этом следует учитывать критерии наименьшего энергопотребления и наибольшей скорости переключения. В табл.2 представлены значения времени переключения спинового вентиля в разных областях бифуркационной диаграммы на рис.3.

Таблица 2

Значения параметров спинового вентиля в разных областях бифуркационной диаграммы

Table 2

The values of the parameters of the spin valve in different areas of the bifurcation diagrams

Область (см. рис.3)	H, А/м	J, А/м^2	t, нс
2	$1,40\cdot10^5$	$1,50\cdot10^{12}$	19,1
2	$4,20\cdot10^5$	$7,48\cdot10^{12}$	1,48
3	$4,20\cdot10^5$	$1,80\cdot10^{13}$	0,65
3	$9,80\cdot10^5$	$2,24\cdot10^{13}$	0,55
4	$1,40\cdot10^5$	$7,48\cdot10^{13}$	2,35
4	$9,80\cdot10^5$	$7,48\cdot10^{13}$	0,81
5	$1,54\cdot10^6$	$5,09\cdot10^{13}$	0,22
6	$2,38\cdot10^6$	$7,18\cdot10^{13}$	0,13
7	$2,38\cdot10^6$	$7,07\cdot10^{13}$	0,19
8	$2,38\cdot10^6$	$5,24\cdot10^{13}$	0,22
8	$1,82\cdot10^5$	$2,69\cdot10^{13}$	0,71
9	$2,66\cdot10^6$	$5,24\cdot10^{13}$	0,41
10	$2,66\cdot10^6$	$5,09\cdot10^{13}$	3,96

Критерию наименьшего энергопотребления больше всего отвечает область 2 на рис.3,*а*. Однако при тех же значениях поля переключательный ток в рассматриваемом случае больше, чем когда поле направлено параллельно оси анизотропии [10–12]. Отметим, что при магнитном поле, направленном перпендикулярно плоскости слоев, время переключения спинового вентиля меньше, чем при таких же значениях тока и поля, направленного вдоль оси анизотропии. С учетом этих факторов для переключательного режима спинового вентиля выбраны следующие диапазоны поля и тока: $H\in\left([-0,7;-0,2]\cup[0,2;0,7]\right)\cdot10^6$ А/м; $J\in[1,5;7,5]\cdot10^{12}$ А/м.

Для STNO важны те режимы с прецессией, в которых проекция вектора намагниченности на ось анизотропии периодически существенно изменяется, что приводит к периодическому изменению магнетосопротивления структуры. Тип динамики намагниченности с устойчивым предельным циклом (см. рис.4,*д*) хорошо отвечает этому критерию.

Частота прецессии ν_T вокруг особой точки T выражается мнимой частью $\mathrm{Im}\,\lambda_T$ собственных чисел матрицы линеаризации динамической системы вблизи этой особой точки. В табл.3 приведены частоты и амплитуды осцилляций для областей, в которых имеются устойчивые предельные циклы. Наибольшие значения синхронизированной частоты ν на предельных циклах наблюдаются в областях 11, 12 и 21 при относительно небольших токах.

Таблица 3

Значения параметров осцилляции для областей с устойчивыми предельными циклами

Table 3

Values of oscillation parameters for areas with stable limiting cycles

Область (см. рис.3)	H, А/м	J, А/м^2	Частота, Ггц						$M_{x\max}/M_s$	ν, Ггц
			ν_{T_1}	ν_{T_2}	ν_{T_3}	ν_{T_4}	ν_{T_5}	ν_{T_6}		
11	$2{,}45\cdot10^6$	$1{,}50\cdot10^{13}$	-	-	-	142,92	-	27,85	0,978	10,72
11	$2{,}24\cdot10^6$	$3{,}74\cdot10^{13}$	-	-	-	117,75	-	9,13	0,963	3,59
11	$2{,}24\cdot10^6$	$4{,}49\cdot10^{12}$	-	-	-	138,09	-	16,64	0,891	7,50
12	$1{,}89\cdot10^6$	$1{,}10\cdot10^{13}$	-	-	-	124,05	-	0	0,977	7,25
13	$1{,}82\cdot10^6$	$1{,}87\cdot10^{13}$	0	4,79	-	117,69	-	0	0,985	6,16
13	$1{,}89\cdot10^6$	$2{,}58\cdot10^{13}$	0	6,58	-	115,01	-	0	0,983	4,74
14	$1{,}82\cdot10^6$	$1{,}41\cdot10^{13}$	3,82	6,60	-	120,18	-	0	0,981	6,85
14	$1{,}96\cdot10^6$	$4{,}49\cdot10^{12}$	4,30	3,97	-	128,17	-	0	0,918	6,28
17	$1{,}75\cdot10^6$	$7{,}48\cdot10^{12}$	16,62	16,73	-	120,1	-	0	0,965	6,16
17	$1{,}68\cdot10^6$	$1{,}94\cdot10^{13}$	12,74	20,418	-	111,8	-	0	0,973	4,27
20	$1{,}96\cdot10^6$	$2{,}99\cdot10^{13}$	0	13,003	-	113,94	-	0	0,947	2,91
21	$1{,}89\cdot10^6$	$2{,}54\cdot10^{13}$	0	0	-	0		115,35	0,983	4,83
21	$1{,}89\cdot10^6$	$1{,}02\cdot10^{13}$	0	0	-	0	-	124,31	0,973	7,25

Наибольшей амплитуде осцилляций намагниченности $M_{x\max}$ соответствует режим работы спинового вентиля с предельным циклом, максимально растянутым по оси OX. С учетом этого можно выбрать оптимальные диапазоны токов и полей, соответствующие наименьшему энергопотреблению и наибольшим значениям частоты ν и амплитуды $M_{x\max}$: $J\in[0{,}38;1{,}72]\cdot10^{13}$ А/м^2; $H\in[-2{,}1;-1{,}9]\cup[1{,}9;2{,}1]\cdot10^6$ А/м. При этом диапазоны частоты ν и амплитуды $M_{x\max}$ будут следующими: $\nu\in[5{,}9;8{,}2]$ ГГц; $M_{x\max}\in[0{,}885;0{,}983]\cdot M_s$ А/м. Значения поля и тока, полученные для рассматриваемого направления магнитного поля, значительно выше значений, полученных для магнитного поля, направленного вдоль оси OY. При этом амплитудная и частотная характеристики в рассматриваемой конфигурации лучше на 10–20 %.

Для реализации PSL лучше применять режим с несколькими вероятными переключениями (см. рис.4,*а*). Данный тип динамики намагниченности спинового вентиля характерен для диапазонов магнитного поля и тока $H\in[-1{,}5;0)\cap(0{,}1{,}5]\cdot10^6$ А/м, $J\in(0;5{,}0]\cdot10^{11}$ А/м^2.

Заключение. В результате проведенного бифуркационного анализа динамической системы, описывающей динамику вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля, проведена классификация типов динамики вектора намагниченности.

Среди возможных динамических режимов можно выделить режим переключения вектора намагниченности с двумя вероятными исходами, режим переключения из нескольких неустойчивых положений в единственно устойчивое и режимы с устойчивым и неустойчивым предельными циклами, а также тип динамики вектора намагниченности с двумя вероятными исходами – переключение в УФ T_2 или наматывание на предельный цикл.

Оптимальным режимом работы спинового вентиля как части ячейки MRAM является переключательный режим в УФ T_2. Однако значения магнитных полей и токов, соответствующих режиму переключения спинового вентиля в магнитном поле, параллельном оси анизотропии [10–12], существенно ниже, чем полученные для данного переключательного режима. При этом в рассматриваемой конфигурации время переключения спинового вентиля на 15–25 % меньше, чем при тех же значениях магнитного поля, направленного вдоль оси анизотропии.

Основным режимом работы спинового вентиля в качестве стохастического нейрона, используемого для реализации вероятностной спиновой логики PSL, является режим переключения с двумя вероятными исходами. Рассчитаны диапазоны токов и полей, соответствующие этому режиму. Наилучший тип динамики вектора намагниченности для спин-трансферного STNO – намагниченность с устойчивым предельным циклом. Соответствующие этому режиму диапазоны токов и магнитных полей в 1,5–2 раза выше, чем полученные для магнитного поля, направленного вдоль оси, перпендикулярной оси анизотропии и параллельной плоскости слоев [13]. Однако в рассматриваемой конфигурации частота на 10–15 % выше, а амплитуда практически равна намагниченности насыщения, что недостижимо в случае, описываемом в работе [13].

Литература

1. Dependence of voltage and size on write error rates in spin-transfer torque magnetic random-access memory / ***J.J. Nowak, R.P. Robertazzi, J.Z. Sun et al.*** // IEEE Magnetics Letters. – 2016. – Vol. 7. – P. 3102604-1–3102604-4.

2. ***You Ch.Y.*** Spin torque nano-oscillator with an exchange-biased free rotating layer // Journal of Magnetics. – 2009. – No. 14(4). – P. 168–171.

3. ***Behin-Aein B., Diep V., Datta S.*** A building block for hardware belief networks // Scientific Reports. – 2016. – No. 6(1). – P. 1–10.

4. ***Camsari K.Y., Faria R., Sutton B.M., Datta S.*** Stochastic p-bits for invertible logic // Physical Review X. – 2017. – No. 7(3). – P. 031014-1–031014-19.

5. ***Sutton B., Camsari K.Y., Behin-Aein B., Datta S.*** Intrinsic optimization using stochastic nanomagnets // Scientific Reports. – 2017. – No. 7(1). – P. 1–9.

6. ***Shim Y., Jaiswal A., Roy K.*** Ising computation based combinatorial optimization using spin-Hall effect (SHE) induced stochastic magnetization reversal // Journal of Applied Physics. – 2017. – No. 121. – P. 193902-1–193902-8.

7. ***Faria R., Camsari K.Y., Datta S.*** Low barrier nanomagnets as p-bits for spin logic // IEEE Magnetics Letters. – 2017. – Vol. 8. – P. 2685358-1–2685358-5.

8. Low-energy deep belief networks using intrinsic sigmoidal spintronic-based probabilistic neurons / ***R. Zand, K.Y. Camsari, S.D. Pyle et al.*** // Proc. of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI (Chicago, Illinois, May 23–25, 2018). – 2018. – P. 15–20.

9. ***Slonczewski J.C.*** Current-driven excitation of magnetic multilayers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1996. – Vol. 159. – P. L1–L7.

10. ***Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., Iusipova Iu.A.*** Bifurcations in the dynamical system for three-layered magnetic valve // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 233–234. – P. 431–434.

11. ***Островская Н.В., Скиданов В.А., Юсипова Ю.А.*** Классификация динамических режимов переключения намагниченности в трехслойной ферромагнитной структуре в зависимости от спин-поляризованного тока инжекции и внешнего магнитного поля. I. Продольная анизотропия // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8. – №4. – С. 605–620.

12. ***Iusipova Iu.A.*** Analysis of the switching characteristics of MRAM cells based on materials with uniaxial anisotropy // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52. – No. 15. – P. 1982–1988.

13. ***Юсипова Ю.А.*** Прецессия намагниченности свободного слоя спинового вентиля и его переключение при воздействии магнитного поля, перпендикулярного оси анизотропии // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – №2. – С. 160–173.

14. Spin transport and microwave self-oscillations in magnetic heterostructures with giant magnetoresistance / ***V.I. Korneev, A.F. Popkov, G.D. Demin et al.*** // Semiconductors. – 2012. – Vol. 46. – No. 13. – P. 1553–1561.

Поступила в редакцию 29.01.2019 г.; после доработки 29.01.2019 г.; принята к публикации 18.06.2019 г.

Юсипова Юлия Александровна – младший научный сотрудник отдела проектирования микроэлектронных компонентов для нанотехнологий Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), linda_nike@mail.ru

References

1. Nowak J.J., Robertazzi R.P., Sun J.Z. et al., Dependence of voltage and size on write error rates in spin-transfer torque magnetic random-access memory. *IEEE Magnetics Letters*, 2016, vol.7, p. 3102604-1–3102604-4.

2. You Ch.Y. Spin torque nano-oscillator with an exchange-biased free rotating layer. *Journal of Magnetics*, 2009, vol. 14, no. 4, pp. 168–171.

3. Behin-Aein B., Diep V., Datta S. A building block for hardware belief networks. *Scientific reports*, 2016, vol. 6, no.1, pp. 1–10.

4. Camsari K.Y., Faria R., Sutton B.M., Datta S. Stochastic p-bits for invertible logic. *Physical Review X*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 031014-1–031014-19.

5. Sutton B., Camsari K.Y., Behin-Aein B., Datta S. Intrinsic optimization using stochastic nanomagnets. *Scientific Reports*, 2017, no. 1, pp. 1–9.

6. Shim Y., Jaiswal A., Roy K., Ising computation based combinatorial optimization using spin-Hall effect (SHE) induced stochastic magnetization reversal. *Journal of Applied Physics*, 2017, no. 121, pp. 193902-1–193902-8.

7. Faria R., Camsari K.Y., Datta S., Low barrier nanomagnets as p-bits for spin logic. *IEEE Magnetics Letters*, 2017, vol. 8, pp. 2685358-1–2685358-5.

8. Zand R., Camsari K.Y., Pyle S.D. et al. Low-energy deep belief networks using intrinsic sigmoidal spintronic-based probabilistic neurons. *Proc. of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI*, 2018, pp.15–20.

9. Slonczewski J.C. Current-driven excitation of magnetic multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, vol.159, pp.L1–L7.

10. Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., Iusipova Iu.A. Bifurcations in the dynamical system for three-layered magnetic valve. *Solid State Phenomena*, 2015, vol. 233–234, pp. 431–434.

11. Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., Iusipova Iu.A. Classification of dynamical switching regimes in a three-layered ferromagnetic nanopillar governed by spin-polarized injection current and external magnetic field I – Longitudinal anisotropy. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye = Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 605–620. (In Russian).

12. Iusipova Iu.A. Analysis of the switching characteristics of MRAM cells based on materials with uniaxial anisotropy. Semiconductors, 2018, vol.52, no. 15, pp. 1982–1988.

13. Iusipova Iu.A. Precession of the spin-valve free layer magnetization and its switching under the influence of a magnetic field perpendicular to the axis of anisotropy. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 160–173. (In Russian).

14. Korneev V.I., Popkov A.F., Demin G.D. et al. Spin transport and microwave self-oscillations in magnetic heterostructures with giant magnetoresistance. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, no. 13, pp.1553–1561.

Received 29.01.2019; Revised 29.01.2019; Accepted 18.06.2019.

Information about the author:

Iuliya A. Iusipova – Junior Researcher of the Design of Microelectronic Components for Nanotechnology Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), linda_nike@mail.ru

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 621.382.049.771:621.394.6:53.089.62 **DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-503-510**

Crystal Area Reduction Method for Impedance Matching Systems in High-Speed Data Links

V.Sh. Melikyan[1], K.T. Khachikyan[1,2], H.V. Gumroyan[1,2], A.V. Babayan[1,2], S.A. Avushyan[1,2], K.T. Hakobyan[2]

[1]*«Synopsys Armenia» CJSC, Yerevan, Armenia*
[2]*National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia*

Abstract: The well known solution of the signal reflection is the transmission line matching method usage, where the resistance calibration problem comes forward. The transmission line matching occurs in I/O circuits, the number of which per IC can be more than 40, therefore, the area reduction of those is critical. In existing transmission line matching systems the multiple functional nodes, such as the current source, multiplexer, comparator, etc., have been used. Replacing those by other functional nodes can result in a significant area reduction, but can affect the resistance calibration accuracy. In the work the method for calibration of resistances, where the input signal feeds through a voltage follower, which output is connected to the «decision-making system», determining whether the controlled resistance value should be increased or decreased, has been proposed. Usage of the given method 1.6 times reduces the occupied area, with the resistance calibration accuracy reduction of 1%.

Keywords: integrated circuit; transmitter; receiver; transmission line; reflections; impedance matching

For citation: 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. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 503–510. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-503-510

© V.Sh. Melikyan, K.T. Khachikyan, H.V. Gumroyan, A.V. Babayan, S.A. Avushyan, K.T. Hakobyan, 2019

Метод уменьшения площади кристалла для систем согласования импедансов в высокоскоростных каналах передач

В.Ш. Меликян[1], К.Т. Хачикян[1,2], Р.В. Гумроян[1,2], А.В. Бабаян[1,2], С.А. Авушян[1,2], К.Т. Акопян[2]

[1]ЗАО «Синопсис Армения», г. Ереван, Армения
[2]Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван, Армения

vazgenm@synopsys.com

В узлах ввода-вывода данные передаются из передатчика к приемнику через каналы (линии) передач, в которых происходит отражение передаваемого сигнала. В свою очередь, быстрое уменьшение размеров транзисторов современных ИС делает системы, основанные на КМОП-технологии, более чувствительными к отклонениям напряжения, температуры и технологического процесса. Все перечисленное увеличивает чувствительность систем ввода-вывода к отражениям сигнала. Известное решение проблем отражения – метод согласования линии передач, при использовании которого возникает проблема калибровки сопротивлений. Согласование линий передач происходит в системах ввода-вывода, количество которых в одной ИС может быть более 40. Таким образом, уменьшение занимаемой площади в подобных схемах является критическим. В существующих системах согласования линий передач используется множество функциональных узлов, таких как источник тока, мультиплексор, компаратор и т.д., замена которых может привести к уменьшению занимаемой площади, а также к потере точности калибровки. В работе предлагается метод калибровки сопротивлений, когда входной сигнал проходит через повторитель напряжения, подключенный к «системе принятия решений», которая «решает», должно ли «контролируемое сопротивление» увеличиться или уменьшиться. Данный метод предоставляет возможность сократить занимаемую системой калибровки площадь в 1,6 раза, при этом точность калибровки уменьшается на 1%.

Ключевые слова: интегральная микросхема; передатчик; приемник; линия передач; отражения; согласование импедансов

Для цитирования: Метод уменьшения площади кристалла для систем согласования импедансов в высокоскоростных каналах передач / В.Ш. Меликян, К.Т. Хачикян, Р.В. Гумроян и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 503–510. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-503-510

Introduction: CMOS technology continuous shrinking has immense influence on modern integrated circuits (IC). It makes ICs more sensitive to devices mismatches and post-layout effects, which makes the system more unstable and less accurate [1]. On the other hand, fabrication process of ICs becomes more arduous and has enormous impact on IC components quality. PVT variations have significant impact on system accuracy, as well. Due to PVT variations devices' parameters can deviate from their nominal values. Moreover, transmission lines are very important in high speed systems and interfaces as they significantly affect signal timing and shape [2]. Channels are one of the main factors limiting the operating

frequency of high-speed devices since they can act as low-pass filters and induce signal reflections (fig. 1) [3].

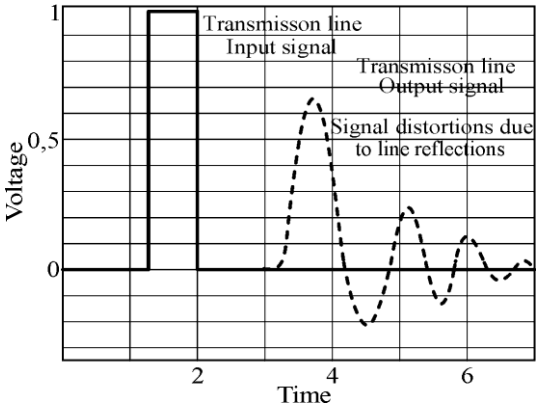


Fig.1. Signal distortion due to transmission line negative effects

Proper Signal termination at the end of line is required to reduce voltage reflections. The latter can lead to a loss of a data information and impair timing margins. As a result, the system can fail to function under some operating conditions such as over-voltages or high temperature. The reflected voltage value at the end of the channel depends on termination resistance and transmission line impedances matching. Each end of transmission line has its own reflection coefficient ρ. However, even a correctly terminated line is limiting the signal bandwidth damping its high-speed harmonics, which manifests itself in reduced slew rates and decreased eye opening as a result [4].

The amount of reflected signal ($V_{reflected}$), which is a portion of the transmitted signal ($V_{transmitted}$), will be determined with the proportion of transmission line impedance (Z_0) and source's impedance (Z_t) (fig.2).

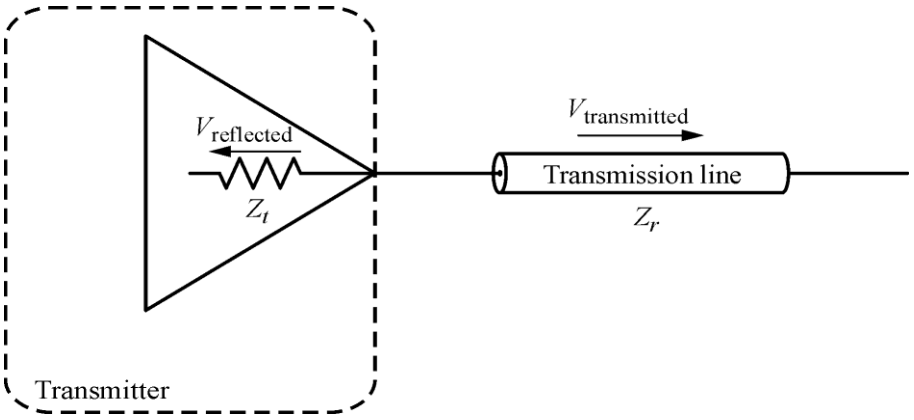


Fig.2. Transmission line model

The equation below represents the method of determining the amount of reflections of the transmitted signal [5], where ρ is reflection coefficient, V_t is transmitted and V_r is reflected voltages, Z_t is transmitter output impedance and Z_r is the transmission line impedance

$$\rho = \frac{V_r}{V_t} = \frac{Z_t - Z_r}{Z_t + Z_r}.$$

The equation proves, that reflections can be avoided if transmitter output and line impedances are matched, otherwise transmitted signal can be reflected and therefore be distorted.

For high-speed signals analysis data-eye methodology is common [6]. The eye-diagram shows all the data collected and concentrated in one period of signal. The vertical axis stands for data amplitude and the horizontal for data period.

Aforementioned phenomena reduce eye-diagram opening of the received signal in both directions (fig.3), which makes data loss unavoidable.

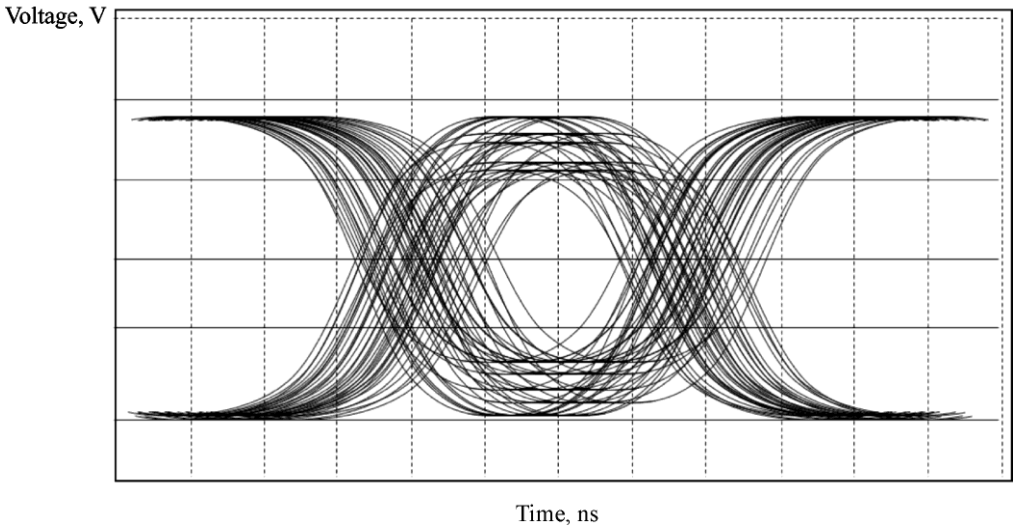


Fig.3. Signal's eye-diagram distortion due to transmission lines reflections

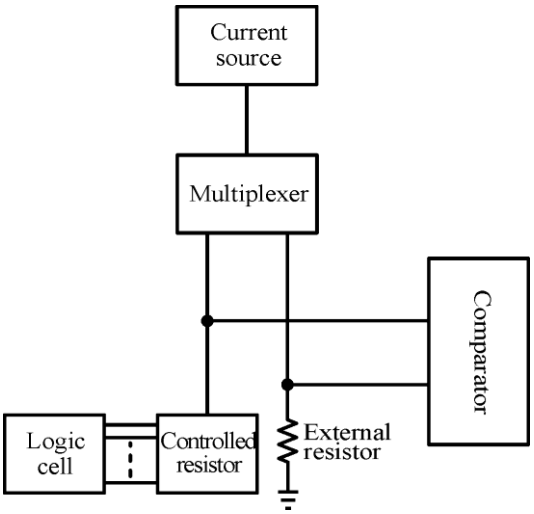


Fig.4. Impedance matching system block diagram

Impedance matching existing methodology architecture is based on comparison with an external resistance. An external resistance has high precision and its value is independent from process variations, temperature, and supply voltage changes. In modern ICs, the external resistnace value precision is close to 2 %. This implementation makes possible transmitter and receiver nodes impedance matching. Impedance matching system consists of the following blocks: current source, multiplexer, controlled resistor, comparator and a logic cell (fig.4) [7].

Current source allows to provide high output current. Output current flows through the multiplexer to the external and then to the controlled resistances. The current drops on the external and controlled resistor and forms comparator input voltages. Afterwards, the result of comparison is being provided to the logic cell, which generates the control signals of the parallel resistors. Described sequence repeats until the voltages formed on the resistors are equal, which means that the resistances are equal too, since the current is the same for both.

Mentioned architecture provides high accuracy but occupies large area.

Proposed impedance matching system architecture: Proposed impedance matching method is based on the exteranal and high accurate resistance although it uses mixed-signal nodes (voltage follower, ADC, etc.) therefore it occupies small area (fig. 5). The proposed architecture's main blocks are an amplifiers operating as input voltage follower, analog to digital converter (ADC), RTL logic block and controlled resitor array. To gain linearity and minimize PVT sensitivity in each leg additional resistors were inserted [8]. ADC and RTL logic blocks are responsible for deciding whether to increase or decrease the number of controlled resistors in the array. The controlled resistor reaches its target value when the mid-point voltage (V_{ref}) of the resistors becomes equal to a voltage on a VP_half pin.

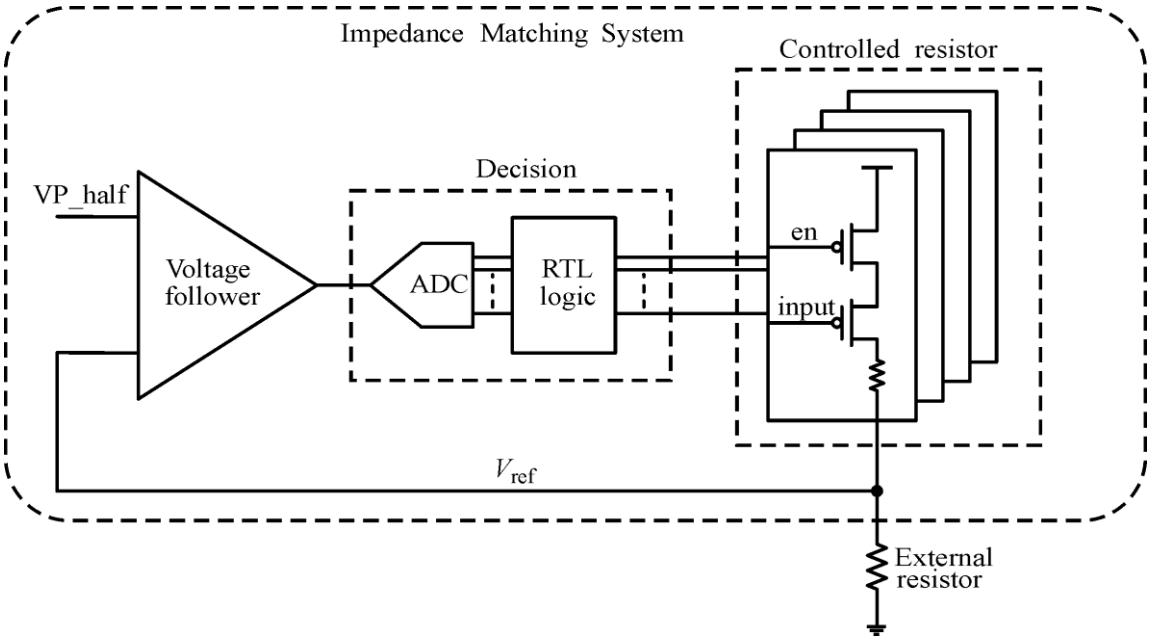


Fig.5. Proposed Impedance matching system

Input voltage follower contains two stages, the first one is an operational amplifier, and the second one is common source amplifier. A negative feedback loop brings voltage difference on the voltage follower inputs to a zero. ADC converts the analog output of the voltage follower to a digital code.

Digital code proceeds to the «RTL Logic» block, which calculates the difference between VP_half and Vref voltage values. RTL block diagram is presented (fig.6). In RTL block digital comparator compares «current ADC code» with the «Ref code». RTL block changes «sel» value, until the «Ref code» value and «Current ADC code» are not equal. Since the comparator is digital after the synthesis it will occupy small area.

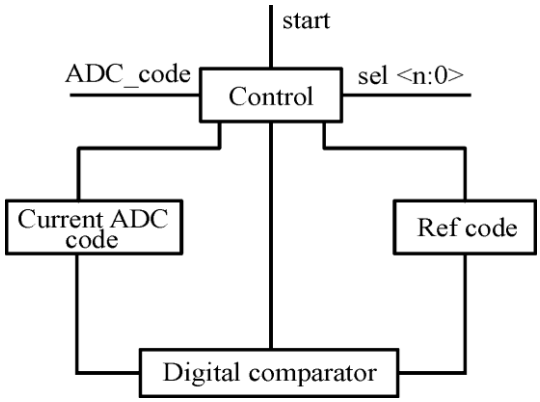


Fig.6. RTL block diagram

During operation the voltage follower's output will be simultaneously changed, until the input voltages become equal. The RTL block generates binary code, which is further being applied to the controlled resistor. The calibration process finishes, when the input voltages of the voltage follower are equal, and since the half of the source voltage is being applied to the voltage follower positive input, then the same voltage is being formed on external and controlled resistors as well. This is possible only when external and controlled resistors are equal.

Simulation results: Simulations have been performed using Synopsys circuit level simulator HSPICE [9] for 27 PVT corners, including SS (slow-slow), TT (typical-typical), FF (fast-fast), SF (slow-fast), FS (fast-slow) with supply voltage ±10 % and temperature from –40 ^{o}C to 125 ^{o}C variations using 28 nm CMOS technology node. During the simulations 50 Ohm external resistor was selected. For occupied area evaluation physical design for both methods was done [10].

Simulation results are presented in table.

Resistors values comparison

Parameter	Existing Method			Proposed Method		
	min	typ	max	min	typ	max
Resistance (Ohm)	48.53	50.03	51.43	48.62	49.95	52.04
Area (um^2)	1540			960		

Table shows that the resistance value deviates from 48,62 to 52,04. That means, matching accuracy has dropped approximately for 1 % compared to the existing method, on the other hand proposed impedance matching method optimizes occupied area to 1.6 times.

Physical designs of current source, multiplexers and comparator of the existing method are presented below (fig. 7).

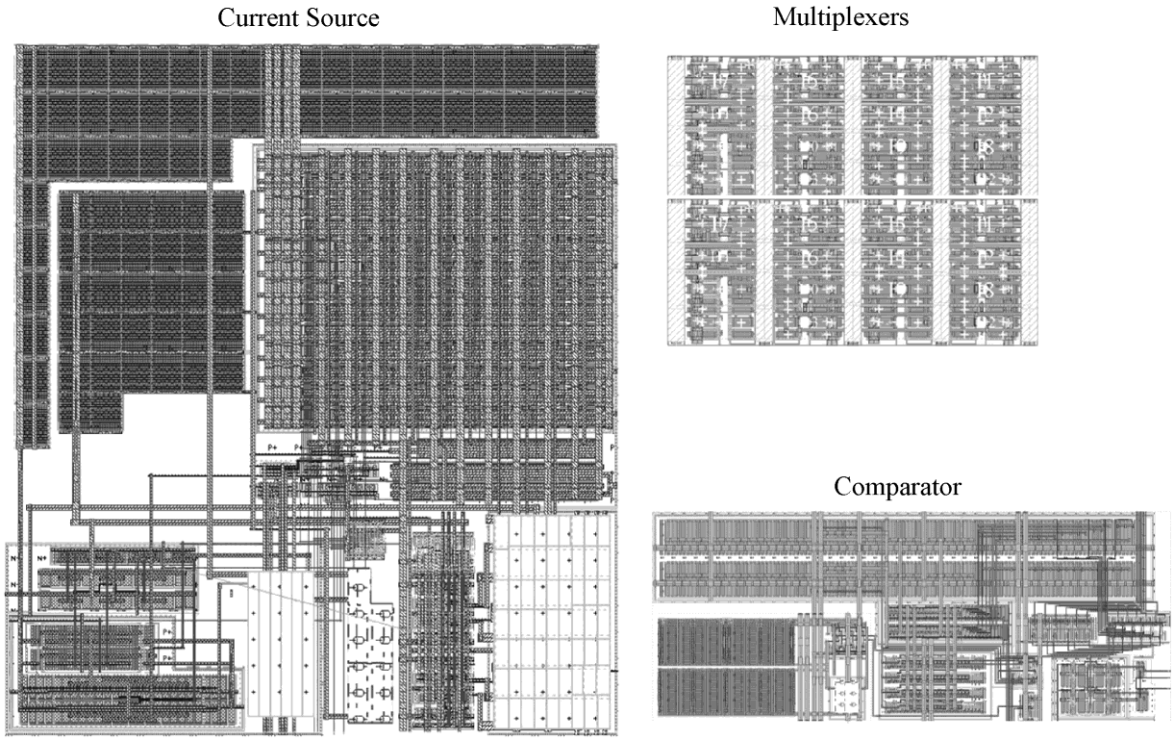


Fig.7. Layout view of additional blocks used in existing method

In the proposed architecture «Decision» making area (ADC and RTL logic) is comparative to the existing method Logic Cell area and occupies 7 % – 9 % of the entire system, therefore during system area calculation it can be ignored.

Compared to the existing method architecture, in the proposed method there is no current source, multiplexer, and comparator, but there is an additional input voltage follower. The area of the excluded nodes is approximately 1400 μm^2, while the area of the included nodes is approximately 860 μm^2 (fig. 8).

The proposed system architecture occupied area is 1.6 times less than the existing methods causing 1% accuracy degradation.

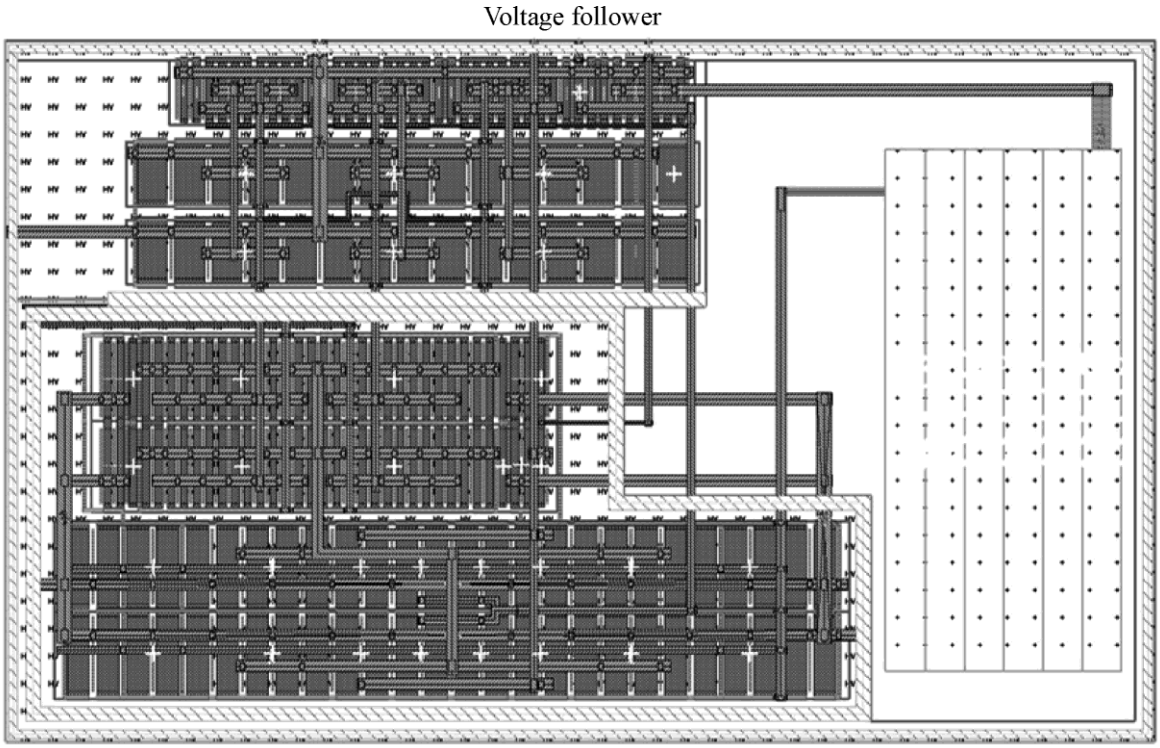


Fig.8. Layout view of added Voltage Follower

Conclusion: An impedance matching method implemented in 28nm CMOS technology node, is presented. The impedance matching proposed method improves occupied area for 1.6 times compared to the existing common calibration method. Proposed method occupies 860 μm^2. 1 % calibration accuracy loss keeps the methodology applicable for different high-speed data transfer protocols.

The most challenging part of proposed method implementation is the physical design, since it contains both, digital (RTL Logic) and analog (Voltage Follower, Current source, etc.) blocks. In physical design perspective, all analog blocks should be properly designed to keep the system accuracy at the desired level.

This method can be used for sensitive systems to compensate transmission line adverse influence on system performance.

References

1. Monica Zolog, Dan Pitic. Analysis of the effect of nonlinear input/output characteristics of digital integrated circuits on signal integrity. *IEEE 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*. Budapest, 2008, pp. 604–609.

2. Samuel P**.** *High-speed serial I/O design for channel-limited and power-constrained systems*. Texas A&M University, 2010, pp. 57.

3. Nitsch J., Rambousky R., Tkachenko S. Introduction of reflection and transmission coefficients for nonuniform radiating transmission. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, pp. 1703–1713.

4. Haibo He, Shijie Cheng, Youbing Zhang, Nguimbis J. Analysis of reflection of signal transmitted in low-voltage powerline with complex wavelet. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, pp. 86–91.

5. Johnson H., Graham M. *High-speed digital design: A handbook of black magic*. Prentice Hall. Second Edition, 2003, pp. 31–48.

6. Jeonghyeon Ch., Eakhwan S., Jongjoo Sh. A precise analytical eye-diagram estimation method for non-ideal high-speed channels. *IEEE Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*, 2009, pp. 159–162.

7. Melikyan V., Balabanyan A., Hayrapetyan A., Melikyan N. Receiver/transmitter input/output termination resistance calibration method. *IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kiev, 2013, pp. 126–130.

8. Esch G., Chen T. Design of CMOS IO drivers with less sensitivity to process, voltage, and temperature variations. *IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications*. Perth, 2004, pp. 312–317.

9. *Hspice Reference Manual*. Synopsys Inc., 2017, pp. 375–381.

10. Baker R.J. *CMOS circuit design, layout, and simulation*. Second Edition, 2008, 1045 p.

Received 05.04.2019; Revised 05.04.2019; Accepted 18.06.2019.

Information about the authors:

Vazgen Sh. Melikyan – Corresponding Member of NAS RA, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Educational Department of «Synopsys Armenia» CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), vazgenm@synopsys.com

Karen T. Khachikyan – PhD Student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Analog and Mixed Signal Circuit Design Engineer, Engr. II OOO «Synopsys Armenia» CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), karenkh@synopsys.com

Hrachya V. Gumroyan – Masters Student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Applications Engineer, Engr. I OOO «Synopsys Armenia» CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), gumroyan@synopsys.com

Armen V. Babayan – Student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), ASIC Digital Design Engineer, Engr. I OOO «Synopsys Armenia» CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), ababaya@synopsys.com

Suren A. Avushyan – Masters Student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Analog and Mixed Signal Layout Design Engineer, Engr. I OOO «Synopsys Armenia» CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), avushyan@synopsys.com

Kimik T. Hakobyan – Masters Student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), kim.hakobyan@polytechnic.am

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

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2018 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

МИКРО- И НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА
MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNOLOGY

УДК 623.4.084.2:620.178.53 **DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-511-520**

Исследование воздействия случайной вибрации на характеристики микромеханических акселерометров

Аунг Тхура, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенков

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

serborsel@mail.ru

Для современных информационных, измерительных и оптико-электронных систем на основе микро- и наномеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения актуальным является обеспечение их устойчивого функционирования при наличии внешних воздействующих факторов. В работе представлены результаты исследования воздействия случайной вибрации на характеристики микромеханических акселерометров (ММА), полученные с использованием вибростенда LDS V455. Зависимость спектральной плотности виброускорения от частоты одного из образцов, предназначенного для измерений ускорения в диапазоне до ±1,2 g, имеет заметное смещение от заданного ее профиля. Для установления причин такого несоответствия исследована конструкция чувствительного элемента (ЧЭ) ММА при воздействии случайной вибрации. Расчеты и моделирование выполнены в программе ANSYS. Определены деформации ЧЭ ММА по оси чувствительности Z и изменения емкости при воздействии ускорения и случайной вибрации по осям X, Y и Z с учетом кристаллографической ориентации материала ЧЭ – кремния. Рассмотрено влияние кристаллографической ориентации кремния, используемого для изготовления ЧЭ ММА, на деформацию (отклонение) ротора. Приведенные результаты теоретического и экспериментального исследований, а также компьютерного моделирования совпадают, что позволяет совершенствовать конструкцию ЧЭ ММА.

Ключевые слова: случайная вибрация; профиль спектральной плотности виброускорения сигнала; чувствительный элемент; кристаллографическая ориентация кремния

Для цитирования: Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенков С.П. Исследование воздействия случайной вибрации на характеристики микромеханических акселерометров // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 511–520. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-511-520

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 9/1251/2019).

© Аунг Тхура, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенков, 2019

Research of Influence of Random Vibrations on MEMS Samples

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

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

serborsel@mail.ru

Abstract: For modern information, measuring and optoelectronic systems based on micro-and nanomechanical sensors of angular velocity and linear acceleration it is important to ensure their stable operation in presence of external factors. In the work the results of the study on the effect of random vibration on the characteristics experimental samples of micromechanical accelerometers (MMA), obtained using the LDS V455 vibration stand, have been presented. The dependence of the vibroacceleration on the frequency of one of the samples, intended for measurement of the acceleration in the range of up to ±1.2 g, has a noticeable shift from its given profile. Therefore, to determine the causes of the discrepancy, the design of the sensing element (CHE) MMA, the effect of random vibration on it, the calculations and simulation in the ANSYS program have been performed. The calculations and simulation have been executed in the ANSYS program. The deformation e of this MMA along the z axis of sensitivity and capacitance changes under the influence of acceleration and random vibration along the *X*, *Y* and *Z* axes have been determined taking into account the crystallographic orientation of the silicon-CHE material. When performing the calculations and modeling, the influence of the crystallographic orientation, used for manufacturing CHE MMA as a structural material of silicon, has been considered, since it affects the deformation (deviation) of the rotor, which should be taken into account by designers-developers of MEMS sensors. The results of the theoretical and experimental research and computer modeling have been presented.

Keywords: random vibration; spectral density profile; sensing element; crystallographic orientation of silicon

For citation: Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov S.P. Research of influence of random vibrations on MEMS samples. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 511–520. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-511-520

Funding: the work has been financial supported by Russian scientific foundation (project № 9/1251/2019).

Введение. Обеспечение устойчивого функционирования информационных, измерительных и оптико-электронных систем на основе микро- и наномеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения при наличии внешних воздействующих факторов является актуальной задачей [1]. Учет воздействия случайной вибрации и ударов на приборы и системы, контролирующие параметры движения различных объектов, необходим для их надежной работы. Для контроля параметров движения применяются микромеханические акселерометры (ММА), подвергающиеся воздействию случайной вибрации [2, 3]. Анализ надежности ММА при случайной вибрации дан в работах [4–6], деформация оптического элемента при тех же условиях исследована с использованием программного обеспечения ANSYS в работе [5].

Цель настоящей работы – исследование воздействия случайной вибрации на характеристики ММА, полученные при использовании вибростенда LDS V455. Представлены результаты испытаний экспериментальных образцов.

Случайная и синусоидальная вибрация. Случайная вибрация в отличие от синусоидальной характерна для реальных условий эксплуатации ММА. Она включает в себя широкий спектр частот принуждения и может одновременно возбуждать все резонансы прибора [7]. В случае одновременного возбуждения нескольких резонансных частот при разных модах колебаний повышается вероятность возникновения отказа. Например, синусоидальная вибрация возникает при работе двигателя самолета, а случайная вибрация может быть вызвана непредсказуемыми параметрами воздушного потока, воздействующего на крылья самолета (рис.1) [8].

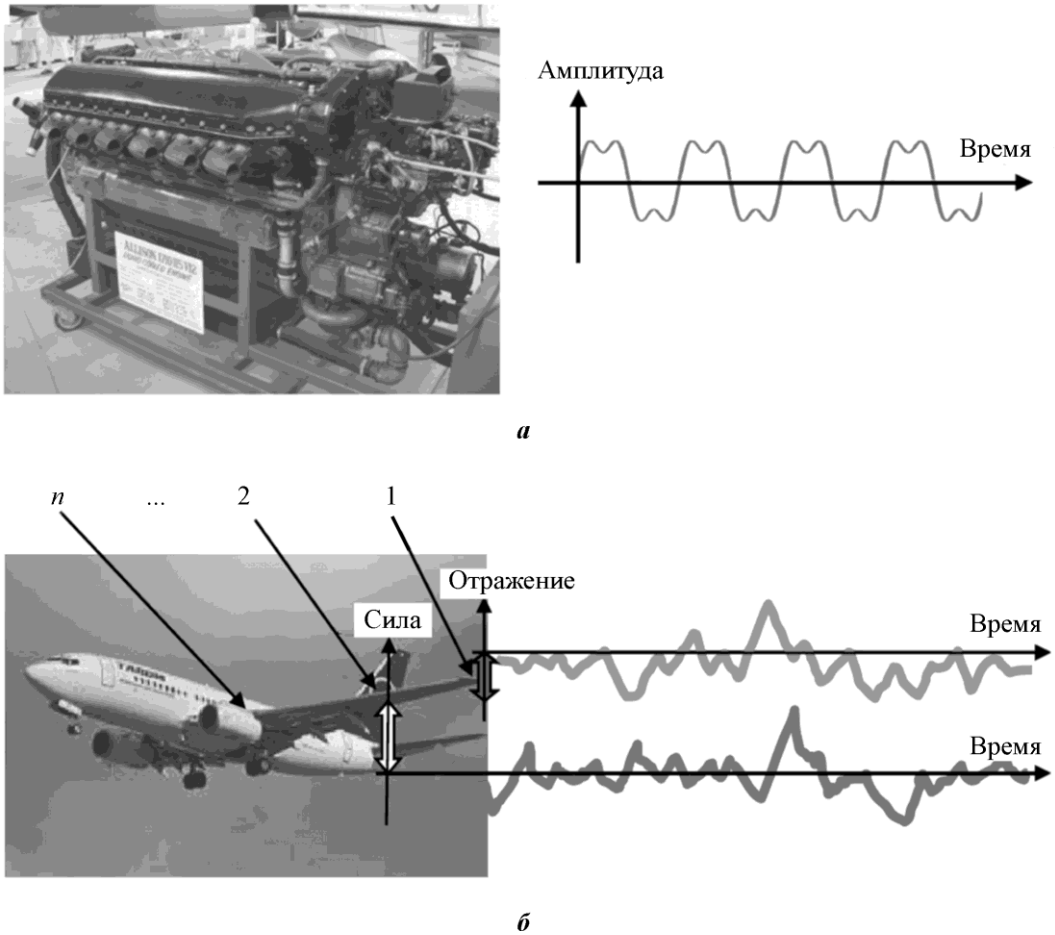


Рис.1. Примеры синусоидальной вибрации двигателя самолета (*а*) и случайной вибрации (1–*n* – точки воздействия), воздействующей на крылья самолета (*б*)
Fig.1. Examples of aircraft engine sinusoidal vibration (*a*) and random (1–*n* – the points of impact) vibration affecting aircraft wings (*b*)

Известны различные методы испытаний микромеханических датчиков и приборов [9]. В работе для испытаний и измерений характеристик образцов ММА при воздействии случайной вибрации использован программно-аппаратный комплекс на вибростенде LDS V455, структурная схема которого показана на рис.2. На шейкере устанавливаются

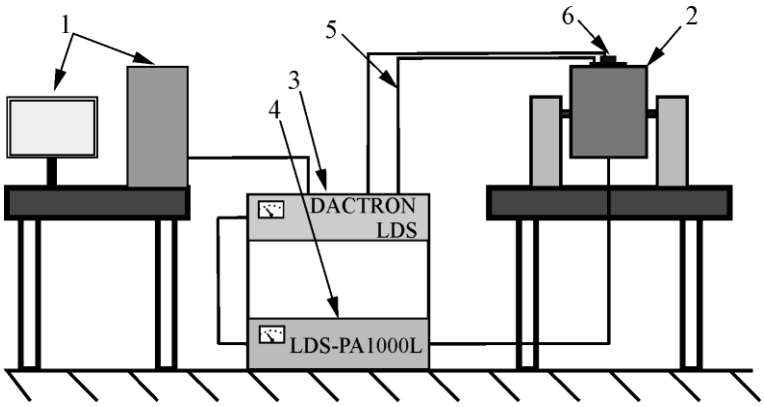


Рис.2. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для измерений характеристик образцов ММА: 1 – компьютер; 2 – шейкер вибростенда; 3 – управляющий блок; 4 – усилитель мощности; 5 – обратная связь; 6 – акселерометр

Fig.2. Block diagram of the hardware-software complex for measuring the characteristics of MMA samples: 1 – computer; 2 – shaker vibrating table LDS V455; 3 – control unit; 4 – power amplifier; 5 – feedback; 6 – accelerometer

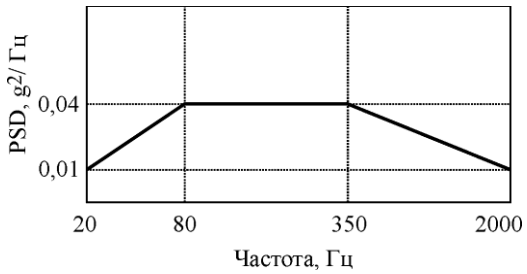


Рис.3. Профиль спектральной плотности виброускорения, имитирующий случайный вибрационный спектр

Fig.3. Profile of the spectral density vibration acceleration (PSD) simulating random vibration spectrum

тестируемые образцы акселерометров. Управляющий сигнал подается к шейкеру через усилитель мощности (LDS-PA1000L). Обратная связь между управляющим блоком и вибростендом обеспечивает контроль параметров движения шейкера. Для проведения испытаний на воздействие случайной вибрации должен быть определен случайный тестовый спектральный диапазон частот. Профиль случайного вибрационного спектра отображается в виде зависимости спектральной плотности виброускорения (PSD) от частоты [10], которая влияет на стойкость и прочность приборов и аппаратуры (рис.3).

Проведено исследование экспериментальных образцов ММА, предназначенных для измерения линейных ускорений в разных диапазонах. Образцы отличаются конструкцией чувствительных элементов (ЧЭ) и корпуса. Принципиальным является разная жесткость элементов подвеса инерционной массы – торсионов, используемых в конструкциях ЧЭ, которая зависит от геометрических размеров и кристаллографической ориентации кремниевых элементов. Кроме того, используются разные типы корпусов ММА, в которых применяются идентичные электронные схемы обработки сигналов. Образцы условно разбиты на следующие группы: для измерения в диапазоне значений ускорения до 1,2g; 5g; 50g. В каждой группе исследовано не менее пяти образцов. Выходные сигналы образцов ММА получены при вибрационных воздействиях по рабочей оси *Z* в диапазоне 20–2000 Гц. На рис.4 показаны выходные сигналы от датчиков (фактические отклики), а также эталонный сигнал, создаваемый вибростендом и воздействующий на испытуемый датчик, и обозначены границы воздействующего сигнала, определяемые величиной допуска.

Выходной сигнал образца 801МСУ1Л-1,2-А-1 при ±1,2g не находится в профиле PSD (рис.4,*а*). Выходной сигнал образца 801МСУ1Л-5-А-1 при ±5g имеет хорошее соответствие профилю PSD (рис.4,*б*). Выходной сигнал образца ПЛУ 5-17 при ±5g находится в профиле (low-alarm), его форма такая же, как и у PSD (рис.5,*в*). Выходной сигнал 201МСУ1Л50А при ±50g характеризуется хорошим профилем PSD, но имеет незначительные отклонения в области низких частот (рис.5,*г*).

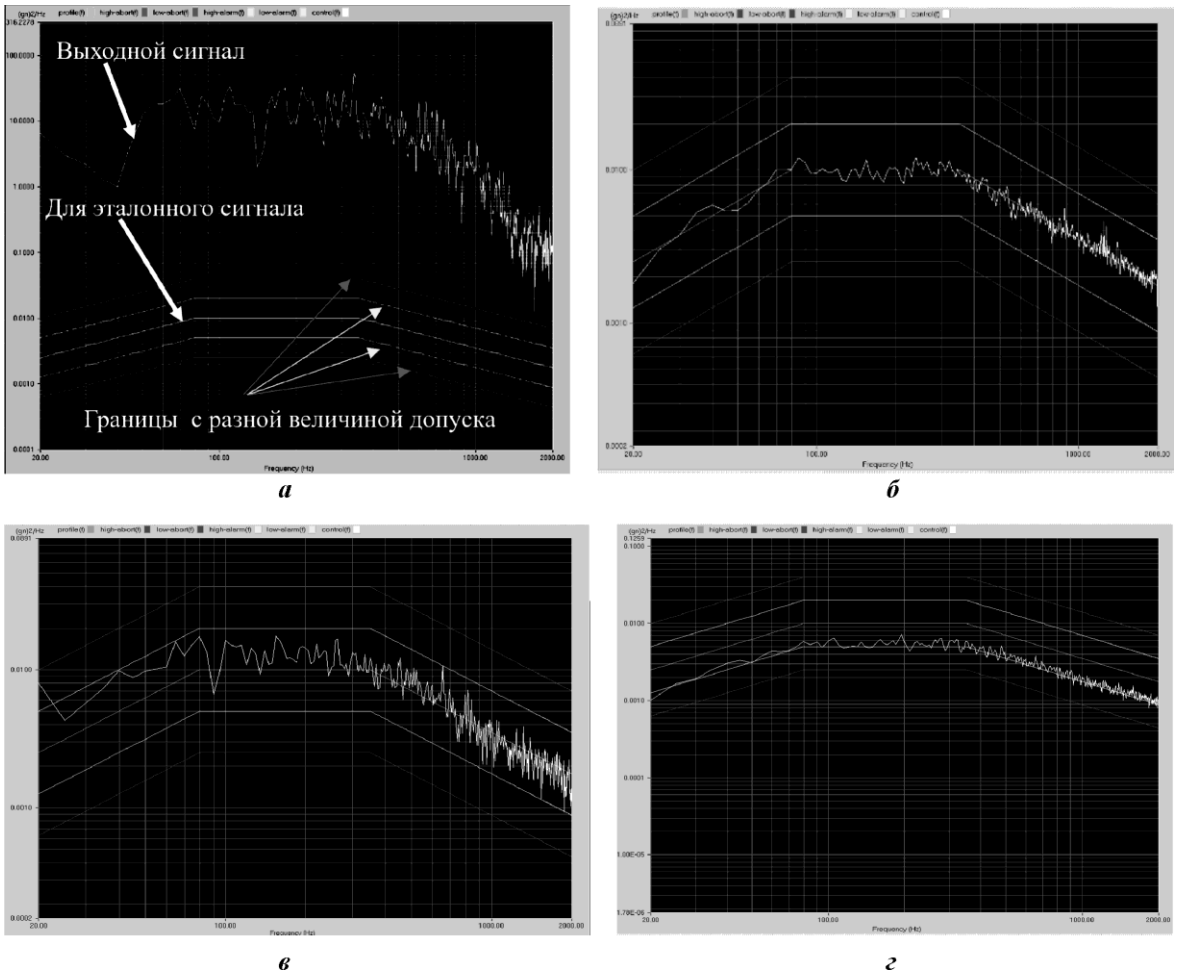
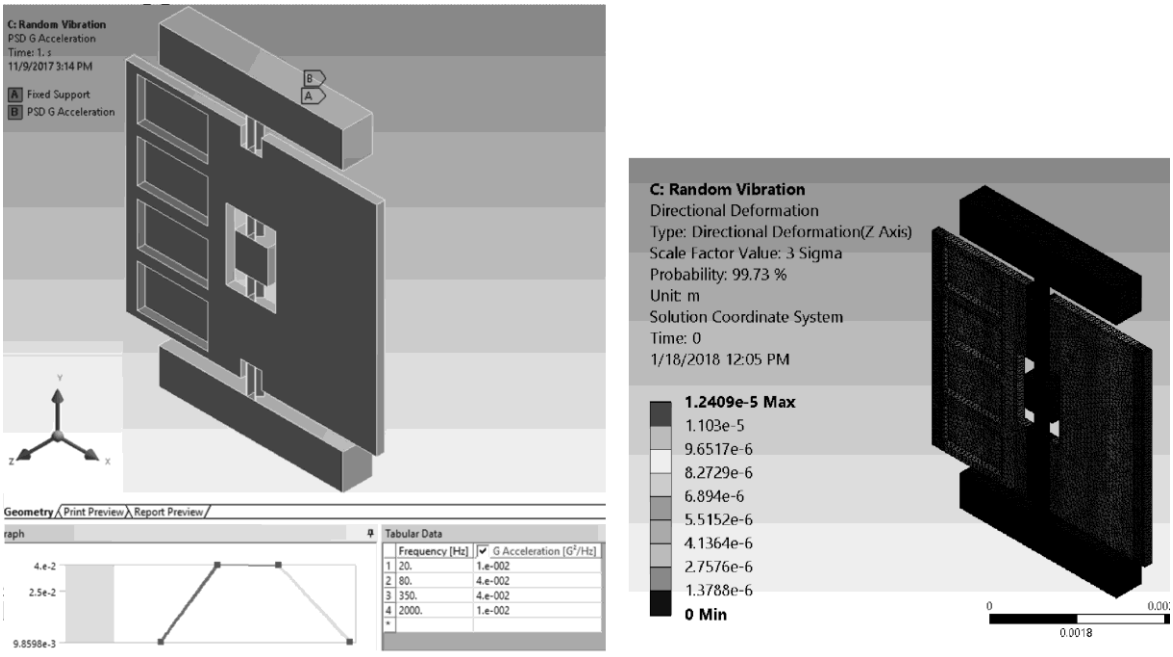


Рис.4. Выходные сигналы образцов ММА: 801МСУ1Л-1,2-А-1 (*а*); 801МСУ1Л-5-А-1 (*б*); ПЛУ 5-17 (*в*); 201МСУ1Л50А (*г*)
Fig.4. Sample Output signals: 801МСУ1Л-1,2-А-1 (*a*); 801МСУ1Л-5-А-1 (*b*); ПЛУ 5-17 (*c*); 201МСУ1Л50А (*d*)

Анализ принципа работы ММА и моделирование механических свойств элементов конструкции. Для выяснения причины искажений сигналов при воздействии случайной вибрации на образец ММА 801МСУ1Л-1,2-А-1 проанализирована механическая конструкция его ЧЭ. На рис.5,*а* представлена конструкция роторной части ММА. Место закрепления А и место приложения случайной вибрации В совпадают. В программе ANSYS создан профиль сигнала PSD, воздействующего на чувствительный элемент (см. рис.5,*а*). Рабочей осью исследуемого ММА является ось *Z*. Результат моделирования воздействия на ЧЭ ММА случайной вибрации ±5g по основной оси представлен на рис.5,*б*. Как и следовало ожидать, значение отклонения ротора из кремния ориентации <100> максимально для наиболее отдаленной от оси вращения части конструкции.



а *б*

Рис.5. Конструкция роторной части ММА (*а*) и результат моделирования отклонения ротора ЧЭ экспериментального образца при воздействии случайной вибрации (*б*)

Fig.5. The Design of the rotor part of the MMA (*a*) and the result of modeling is the deviation of the rotor of the sensing element of the experimental sample under the influence of random vibration (*b*)

Рассчитаны деформации ЧЭ ММА, изготовленного из монокристаллического кремния с различной кристаллографической ориентацией, по оси *Z* под влиянием случайных вибраций по трем осям (*X*, *Y* и *Z*). В табл.1 представлены полученные результаты. При моделировании в программе ANSYS принят уровень напряженности 3σ для анализа влияния случайной вибрации [5]. Это значит, что максимальное отклонение, которое допускается при случайной вибрации, в три раза больше, чем среднеквадратичное отклонение ротора.

Таблица 1

Отклонение ротора ЧЭ ММА, мкм, по оси *Z* при воздействии случайной вибрации

Table 1

Deflections of the sensitive element of MMA of rotor, μm, axis of sensitivity *Z* under the influence of random vibration

Ось направления действия случайной вибрации	Кристаллографическая ориентация кремния		
	<100>	<110>	<111>
Z	12,41	8,71	8,73
X	0,38	0,26	0,27
Y	$11{,}74\cdot10^{-4}$	$0{,}78\cdot10^{-4}$	$0{,}81\cdot10^{-4}$

Полученные результаты показывают, что наиболее значительные отклонения ротора ЧЭ наблюдаются по оси чувствительности *Z*, причем для кристаллографической ориентации поверхности кремния <100> эти отклонения максимальны (почти 1,5 раза

больше, чем для двух других кристаллографических ориентаций). Таким образом, влияние случайной вибрации максимально для кристаллографической ориентации поверхности <100>.

Отметим, что на отклонение ротора ЧЭ ММА существенно влияют жесткость торсионов, определяемая их геометрическими размерами и формой сечения, а также разница масс двух частей асимметричного подвеса (роторной части) ЧЭ. С увеличением жесткости торсионов амплитуда колебаний ротора ЧЭ уменьшается. Тот факт, что выходной сигнал образца ММА не вписывается в заданный профиль PSD при воздействии случайной вибрации, возможно, объясняется слишком большой амплитудой колебаний ротора ЧЭ. В табл.2 приведены результаты расчета отклонения ротора ЧЭ при воздействии ускорения.

Таблица 2

Отклонение ротора ЧЭ ММА, мкм, по оси Z при воздействии ускорения

Table 2

The deflection values of the sensitive element of MMA of rotor, μm, under the effect of acceleration along the *Z* axis

Ускорение	Кристаллографическая ориентация кремния		
	<100>	<110>	<111>
5 g по оси *Z*	0,59	0,40	0,41
100 g по оси *X*	0,36	0,25	0,25
100 g по оси *Y*	$6{,}1\cdot10^{-4}$	$4{,}1\cdot10^{-4}$	$4{,}2\cdot10^{-4}$

Из сравнения данных табл.1 и 2 видно, что отклонения ротора по оси чувствительности *Z* под влиянием воздействия случайной вибрации и ускорения заметно отличаются. В то же время отклонения при воздействиях по другим (нерабочим) осям значительно меньше (даже при воздействии виброускорения 100 g).

Емкость между ротором и статором ЧЭ ММЭ можно определить по формуле для емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_o A}{d},$$

где C – емкость; ε_r – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика; $\varepsilon_0 \sim 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; A, d – площадь и расстояние между двумя обкладками соответственно.

На рис.6 приведено схематическое изображение ротора и статора ЧЭ ММА при отклонении ротора под воздействием ускорения. Изменение емкости ЧЭ можно определить, используя следующую формулу:

$$dC = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{bdx}{D},$$

где b – ширина обкладки; $D = d_0 \pm x \operatorname{tg}\theta$; $x = x_1 + L$, $\theta = (d_0 \pm D)/x$.

Таким образом, имеем [6]

$$C = \int_{x_1}^{x_1+L} \varepsilon\varepsilon_0 \frac{bdx}{d_0 \pm x\operatorname{tg}\theta}. \qquad (1)$$

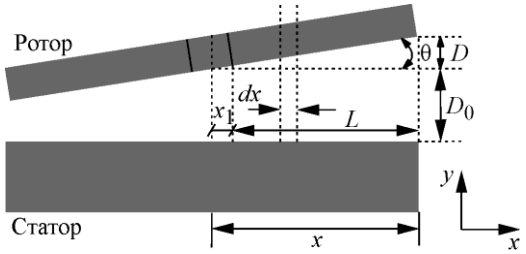


Рис.6. Схематическое изображение ротора и статора ЧЭ ММА при отклонении ротора под воздействием ускорения
Fig.6. Schematic illustration of the rotor and stator elements of the sensing element of the MMA at the rotor deflection under the influence of acceleration

В табл.3 приведены результаты расчета емкости по формуле (1) при воздействии на ЧЭ ММА случайной вибрации. В табл.4 представлены аналогичные результаты при воздействии на ЧЭ ММА ускорения. Емкость ЧЭ до перемещения по оси *Z* равна 5,83 пФ. Из сравнения данных табл.3 и 4 следует, что при воздействии ускорения 5g по основной оси *Z* изменение емкости для ЧЭ из кремния с кристаллографической ориентацией <100> составило 6,07 пФ. При воздействии случайной вибрации это изменение равно 33,76 пФ.

Таблица 3

Расчетные значения изменения емкости ЧЭ ММА, пФ, при воздействии случайной вибрации

Table 3

Calculated values of capacity change of sensitive element of MMA, pF, due to random vibration

Кристаллографическая ориентация кремния	Ось направления действия случайной вибрации		
	Z	*X*	*Y*
<100>	33,76	5,98	5,83
<110>	13,90	5,93	5,83
<111>	13,94	5,94	5,83

Таблица 4

Расчетные значения изменения емкости ЧЭ ММА, пФ, при действии ускорения 5g

Table 4

Calculated values of capacity change of sensitive element of MMA, pF, due to acceleration 5g

Кристаллографическая ориентация кремния	Ось направления действия ускорения		
	Z	*X*	*Y*
<100>	6,07	5,97	5,83
<110>	5,98	5,93	5,83
<111>	5,99	5,93	5,83

Если при моделировании в программе ANSYS для случайных вибраций взять уровни напряженности 2σ и 1σ, то емкости для одного отклоняющегося электрода-ротора будут составлять 22,50 и 11,25 пФ соответственно за счет уменьшения отклонения. Емкость из-за воздействия напряженности 1 σ при случайной вибрации (11,25 пФ) больше емкости при воздействии ускорения 5g (6,07 пФ). Поэтому выходной сигнал образца ММА 801МСУ1Л-1,2-А-1, предназначенного для измерений ускорения в диапазоне до ±1,2g, не находится в профиле случайной вибрации в тестовой ситуации (см. рис.4,*а*). Коэффициент жесткости торсионов зависит от их геометрических размеров и механических свойств (модуля Юнга). Он определяет частотные характеристики ММА и может обеспечивать или не обеспечивать устойчивость к воздействию случайной и

синусоидальной (широкополосной) вибрации. По этой причине в спектральном профиле случайной вибрации может происходить потеря или искажение выходного сигнала при измерении ускорения в малом диапазоне (от 0 до ±1,2g). Отметим, что если выходной сигнал образца не находится в заданном профиле воздействия случайной вибрации, то не исключается возможность его применения в менее жестких условиях воздействия. Это можно подтвердить дополнительными испытаниями с использованием другого профиля PSD, имитирующего случайный вибрационный спектр механического воздействия.

Заключение. Результаты моделирования воздействия случайной вибрации на характеристики ММА совпадают с результатами расчета и измерений и дают возможность совершенствовать конструкции образцов ММА. Полученные данные для монокристаллического кремния с ориентацией <100>, <110>, <111> позволят разрабатывать и изготавливать МЭМС-приборы с использованием кремния с разной кристаллографической ориентацией поверхности.

Выяснено, что выходной сигнал образца 801МСУ1Л-1,2-А-1 не вписывается в заданный профиль PSD. Коэффициент жесткости торсионов зависит от геометрических размеров и механических свойств образца, определяет частотные характеристики ММА и может обеспечивать или не обеспечивать устойчивость к воздействию случайной вибрации. При воздействии случайной вибрации возникают различные резонансные частоты одновременно с разными амплитудами колебаний. Некоторые частоты действуют на ЧЭ ММА, некоторые – на плату. Поэтому при проектировании МЭМС-датчиков необходимо рассчитывать коэффициент жесткости торсионов ЧЭ, а также коэффициент передачи, который определяет отношение передаваемой силы к приложенной к подвижной части ЧЭ силе через пружину и демпфер.

Литература

1. ***Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А.*** Информационные измерительные и оптико-электронные системы на основе микро- и наномеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 260 с.

2. ***Аунг Тхура, Симонов Б.М, Тимошенков А.С.*** Исследование воздействия случайной вибрации на образцы микромеханического акселерометра // Сб. тр. Юбилейной XX конф. молодых ученых «Навигация и управление движением» (20–23 марта 2018 г., Санкт-Петербург). – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. – 364 с.

3. ***Вавилов В.Д., Тимошенков С.П., Тимошенков А.С.*** Микросистемные датчики физических величин: монография: в 2 ч. – М.: Техносфера, 2018. – 550 с.

4. ***Zach L., Gorge C.L.*** Random vibration: mechanical, structural, and earth-quake engineering applications. – CRC Book. – 2015. – P. 1–661.

5. ***Xihong M., Changlong L.*** Test of reliability of micro-accelerometer in vibration environment // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 588–589.– P. 1881–1884.

6. ***Ahmet L.A.*** Dynamic modeling and analysis of vibration effects on performance in optical systems: Dis. for the degree of Master Science. – 2008. – P. 1–129.

7. ***John V.B.*** What is random vibration testing? // Journal for Sound and Vibration. – 2012. – Vol. 46. – No. 2. – P. 9–12.

8. An introduction to random vibration revision by Tom Irvine. – URL: http://www.vibrationdata.com/tutorials2/random.pdf (дата обращения: 10.07.2018).

9. ***Челпанов И.Б., Евстифеев М.И., Кочетков А.В.*** Методы испытаний микромеханических датчиков и приборов // Приборы. – 2014. – № 4(166). – С. 16–20.

10. ***Ефремов А.К.*** Об эквивалентности испытаний на воздействие случайной вибрации // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. – №2 (28). – Р. 22–38.

Поступила в редакцию 15.07.2018 г.; после доработки 21.01.2019 г.; принята к публикации 18.06.2019 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

Тимошенков 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. Achildiev V.M., Gruzevich I.K., Soldatenkov V.A. *Information measuring and opto-electronic systems based on micro-and nano-mechanical sensors of angular velocity and linear acceleration.* Moscow, MGTU im. N. Bauman Publ., 2016, 260 p. (in Russian).

2. Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov A.S. Research of influence of random vibration on samples of the MEMS accelerometer. *Proc. of the XX Jubilee conference of young scientists* «*Navigation and motion control*», Saint-Petersburg, JSC «Concern» CRI «Electropribor» Publ., 2018. 364 p. (in Russian).

3. Vavilov V.D., Timoshenkov S.P., Timoshenkov A.S. *Microsystem sensors of physical quantities*: a Monograph in two parts. Moscow, Technosphera Publ., 2018. 550 p. (in Russian).

4. Zach L., Gorge C.L. *Random vibration: mechanical, structural, and earth-quake engineering applications*. CRC book, 2015, pp. 1–661.

5. Xihong M., Changlong L. Test of reliability of micro-accelerometer in vibration environment. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 588–589, pp. 1881–1884.

6. Ahmet A.L. *Dynamic modeling and analysis of vibration effects on performance in optical systems.* Degree of Master Science diss., 2008. 129 p.

7. John V. B. What is random vibration testing? *Journal for Sound and Vibration*, 2012, pp. 9–12.

8. *An introduction to random vibration revision by Tom Irvine*. Available at: http://www.vibrationdata.com/tutorials2/random.pdf (accessed 22.04. 2019).

9. Chelpanov I.B. Evstifeev M.I., Kochetkov A.V. Methods of testing of micromechanical sensors and devices. *Pribory = Devices*, 2014, no. 4(166), pp. 16–20. (in Russian).

10. Efremov A.K. On the equivalence of tests for the effect of random vibration. *Vestnik MGTU im. Baumana = Herald of Bauman Moscow state technical University*, 2012, no. 2 (27), pp. 22–38. (in Russian).

Received 15.07.2018; Revised 21.01.2019; Accepted 18.06.2019.

Information about the 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), spt@miee.ru

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

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 504.064 **DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-521-529**

Имитационное моделирование системы мониторинга окружающей среды

Е.А. Севрюкова, Е.А. Волкова, А.В. Угроватов, М.Д. Копылова

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

kopylovoy.m@gmail.com

Согласно данным ВОЗ влияние экологических факторов на здоровье и продолжительность жизни человека составляет 25 %. Системы, отслеживающие состояние окружающей среды, основанные на технологиях Интернета вещей, позволяют избежать этого негативного воздействия. В работе представлена имитационная модель автоматизированной системы мониторинга окружающей среды с применением технологии LoRa, представляющая собой многофункциональный программно-аппаратный комплекс технических средств для обмена, сбора, обработки, хранения и передачи данных, отражающих широкий спектр метеорологических величин. Результаты имитационного моделирования позволили выявить влияние соотношения высот антенн базовых станций и измерительных постов, на которых расположены сенсоры, агрегатор (модуль структуризации полученных данных) и модуль передачи данных, работающий по стандарту LoRa. Получена зависимость коэффициента доставки пакетов с измерительных постов на базовые станции и их количества от высот антенн; определен минимальный интервал до повторной отправки пакета без коллизий для проверки бесперебойного сбора и передачи данных с учетом использования минимума вычислительных ресурсов. Данная модель рассматривается для дальнейшего интегрирования в городской проект «Умная Москва».

Финансирование работы: работа выполнена в рамках проекта НТИ «Сенсорика» НИУ МИЭТ.

Ключевые слова: моделирование; системы мониторинга; Интернет вещей; энергоэффективность; «Штормовое кольцо»; окружающая среда; параметры; экология; большие данные

Для цитирования: Севрюкова Е.А., Волкова Е.А., Угроватов А.В., Копылова М.Д. Имитационное моделирование системы мониторинга окружающей среды // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 521–529. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-521-529

© Е.А. Севрюкова, Е.А. Волкова, А.В. Угроватов, М.Д. Копылова, 2019

Imitation Simulation of Environment Monitoring System

E.A. Sevryukova, E.A. Volkova, A.V. Ugrovatov, M.D. Kopylova

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

kopylovoy.m@gmail.com

Abstract: In order to avoid the negative impacts of ecology, the need in the systems, monitoring the states of the ecology, based on the Internet of Things technology arises. In the work the imitation model of the automated system of environment using the LoRa technology has been presented. The imitation model represents the multifunctional hardware and software complex of technical means for the exchange, collection, processing, storage and transmission of the data, reflecting a wide range of the meteorological parameters. Using the results of the imitation simulation the influence of the ratio of the heights of the antennas of the base stations and measuring posts, where the sensors, the structurization module of the received data and the data transmission module operating according to the LoRa standard are located, has been revealed. The dependence of the packet delivery rate from the measuring stations to the base stations and their quantity have been displayed. The minimum interval before re-sending a packet without collisions has been detected to ensure the verification, the uninterrupted data collection and the transmission, taking into account the use of a minimum of computing resources. This solution has been considered for further integration into the city project «Smart Moscow».

Funding: the work has been carried out in the framework NTI «Sensorika» MIET.

Keywords: simulation; monitoring system; IoT; energy efficiency; environment; parameters; ecology; Big Data

For citation: Sevryukova E.A., Volkova E.A., Ugrovatov A.V., Kopylova M.D. Imitation simulation of environment monitoring system. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 521–529. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-521-529

Введение. Современные информационные технологии позволяют разработать автоматизированную систему мониторинга окружающей среды (АСМОС) для оценки негативного влияния как отдельного локального источника антропогенного воздействия, так и предприятия в целом с перспективой объединения и интеграции всей экологической и метеорологической информации.

В настоящее время существуют два основных способа реализации систем экологического мониторинга: аналитический, основанный на применении аналитического и измерительного оборудования для определения концентраций и расхода с дальнейшим расчетом величины выброса, и параметрический, основанный на математическом моделировании процессов распространения примесей и на физико-химических основах этих процессов. Ни одна из систем не позволяет в режиме реального времени с достаточной точностью отслеживать все необходимые факторы наружного воздуха, подлежащие мониторингу.

Концепция Интернета вещей представляет собой совокупность сенсоров, обеспечивающих преобразование сведений от внешней среды в машиночитаемые данные, которые передаются на базовые станции (БС) и в центр обработки данных (ЦОД). Ин-

формационное взаимодействие устройств контроля параметров с системой получения и анализа информации могут быть организованы по проводным и беспроводным каналам [1, 2]. Снижение энергопотребления системы возможно за счет применения технологии LoRa, работающей по стандарту LoRa, который не является сотовым стандартом и не требует получения лицензии на использование частот в отличие от NB-IoT, также являющегося энергоэффективной сетью дальнего радиуса действия. Стандарт LoRa обеспечивает межмашинное взаимодействие на низких скоростях до 50 кбит/с и большой радиус действия 5 км при плотной застройке и до 15 км на открытой местности. Достигается это при минимальном энергопотреблении – до 10 лет работы устройства от аккумулятора емкостью 2500 мА·ч [3].

Цель настоящей работы – разработка унифицированного комплекса, состоящего из методологии построения автоматизированных систем экологического и метеорологического мониторинга и их инструментального обеспечения.

Описание имитационной модели. На платформе LoRa разработана имитационная модель АСМОС, которая осуществляет сбор, обработку, хранение и передачу данных, отражающих широкий спектр метеорологических величин, таких как температура T, относительная влажность RH, давление P, скорость V и направление ветра V_n, и экологических величин CO, NO, NO_2, SO_2, O_3, концентрация пыли PM, свет, шум [4, 5]. На основе полученных в режиме реального времени данных автоматизированных метеорологических комплексов на сервере осуществляется обнаружение неблагоприятных и опасных явлений конвективного происхождения по выявленным критериям.

Предлагаемая имитационная модель АСМОС включает в себя сервис сбора и обработки данных с сенсоров. Составные части модели АСМОС: стационарные и мобильные измерительные посты (ИП); шлюзы, передающие данные с БС приемопередающей аппаратуры и осуществляющие централизованное обслуживание группы ИП; беспроводные каналы связи для взаимодействия ИП и БС; ЦОД; концентратор данных (сервис обработки, хранения и представления данных); проводные и беспроводные каналы связи, организованные поверх сети Интернет между шлюзом и ЦОД.

Структура системы АСМОС с использованием технологии LoRa. Для построения глобальных территориально распределенных систем АСМОС целесообразно использовать «радиально-узловую» топологию, которая позволяет обеспечить высокие показатели надежности системы. Все ИП сети LoRa способны использовать несколько схем модуляции [6]. Максимальный размер полезной нагрузки пакета зависит от коэффициента распределения и изменяется от 51 до 222 байт (чем выше коэффициент, тем больше размер полезной нагрузки). Полоса пропускания может быть 125, 250 и 500 кГц.

Синхронизация приемника и передатчика. Технология LoRa использует асинхронный режим приема-передачи, при котором устройство способно передавать сигнал в любой момент времени. Спецификацией LoRa определены специфические значения Sync Word: 0×34 для публичных сетей (public networks); 0×12 для частных сетей (private networks); 0×C194C1 для каналов с FSK-модуляцией.

Детектирование CSS-сигнала. Принцип передачи символов информации блока данных физического уровня (PHY DATA UNIT) посредством широкополосного радиосигнала LoRa заключается в частотном смещении $e^{j\Delta\omega kt}$ относительно опорного ЛЧМ-радиосигнала $e^{j(\omega_H t+\mu t^2)}$, k = 0, 1, 2,…, 2^{SF} – информационный символ размерностью SF бит (коэффициент расширения спектра изменяется в диапазоне 7–12):

$$x(t)=\begin{cases} A_0\cos(\omega_н t+\Delta\omega kt+\frac{\mu}{2}t^2), & 0\le t<T_0,\\ A_0\cos(\omega_н t+\Delta\omega kt-BWt+\frac{\mu}{2}t^2), & T_0\le t<T_{sym}, \end{cases}$$

где A_0 – амплитуда сигнала; $\omega_н$ – частота несущей; $\mu = BW/T_{sym}$ – скорость изменения частоты радиосигнала; BW – ширина спектра радиосигнала; $T_{sym} = 2^{SF}/BW$ – длительность радиосигнала.

Имитационное моделирование сети LoRa в NS-3. Для поддержания связи с ИП по окружности с меньшим радиусом расставлены БС, которые через Ethernet соединялись с сетевым сервером и сервером приложений (рис.1) [7].

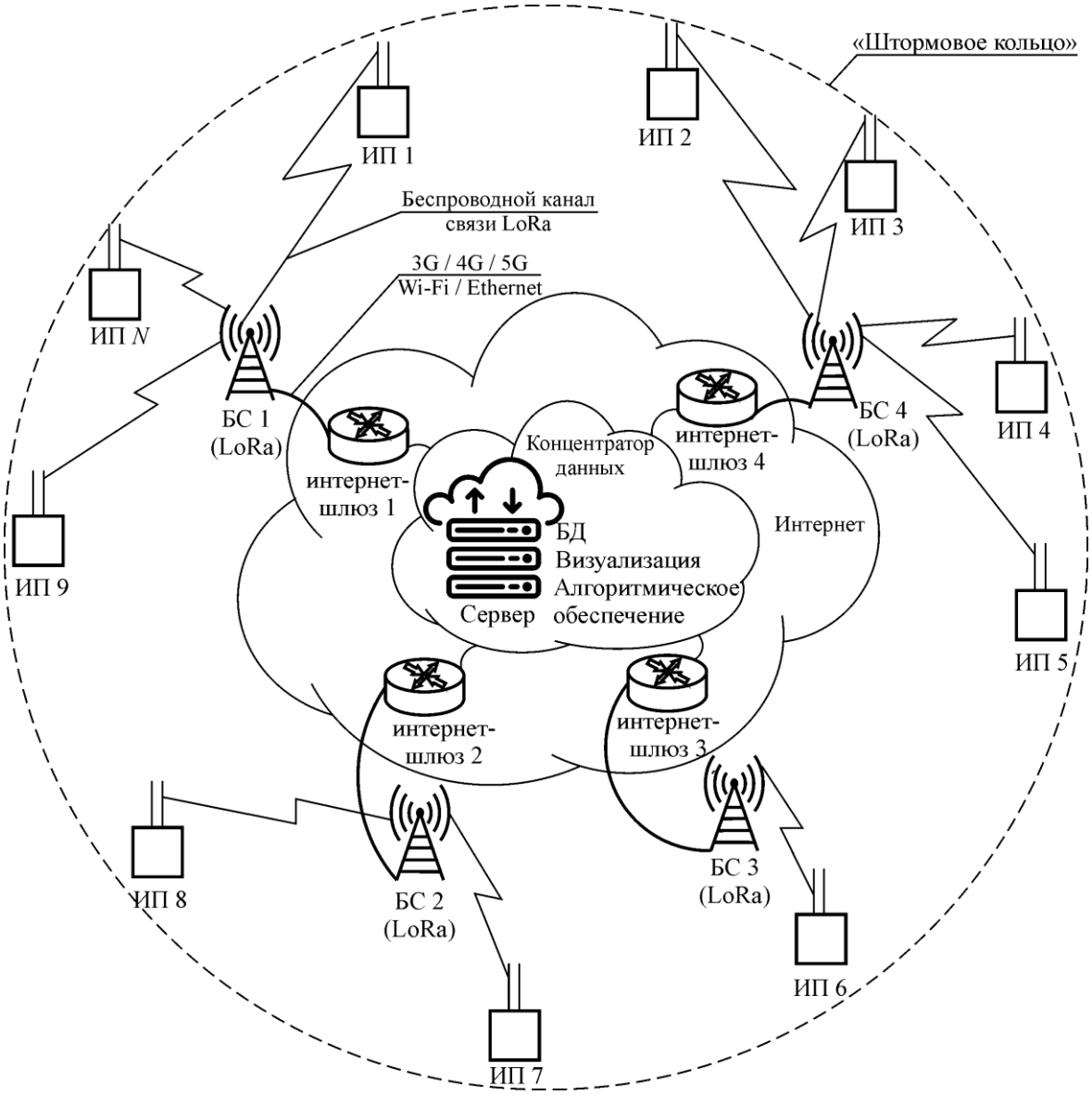


Рис.1. Имитационная схема АСМОС
Fig.1. ASMOS simulation model diagram

Сервер приложений контролирует работу сенсоров, сетевой сервер агрегирует сырые данные, получаемые с нескольких БС, хранит и производит их первоначальную обработку: аутентифицирует и фильтрует, управляет канальным уровнем конечных устройств – задает канал связи и скорость передачи данных [8]. Моделирование выполнено в среде имитационного моделирования NS-3. Данные, собираемые с сенсоров, отправляются через БС и шлюзы на сервер, где происходит их последующая обработка (рис.2).

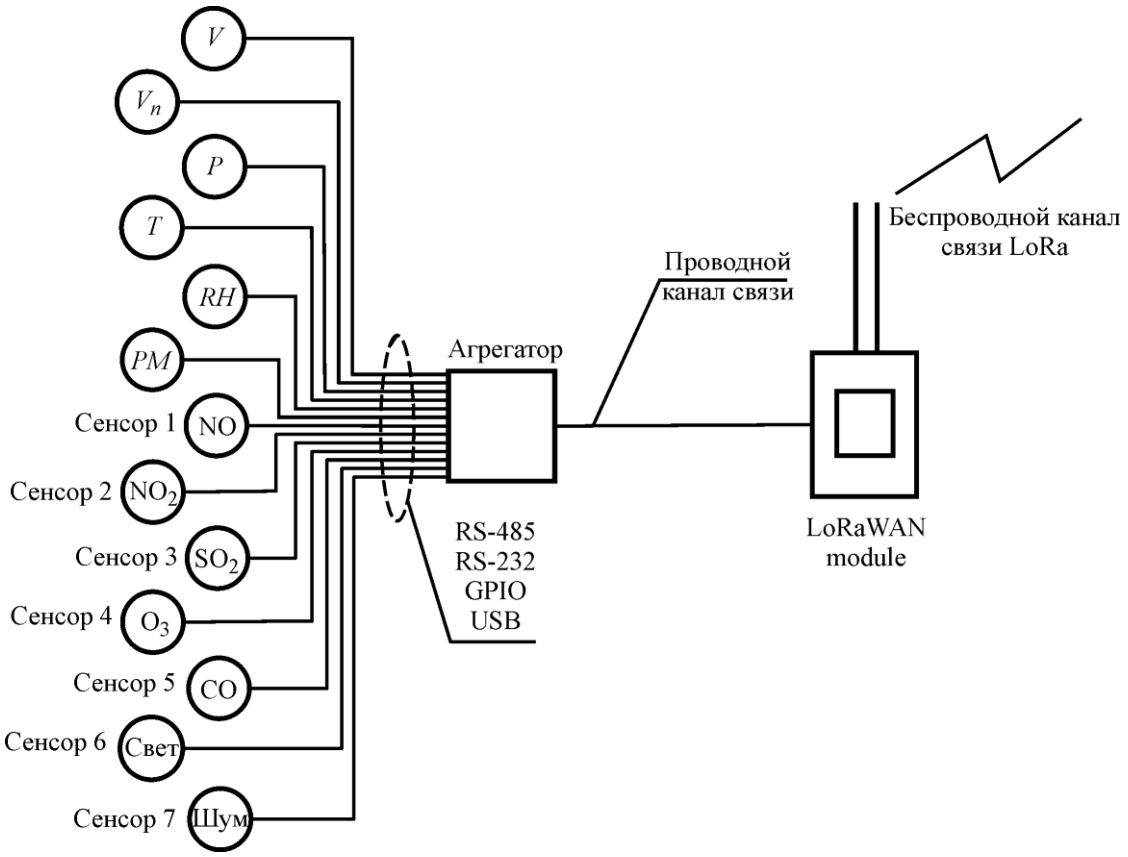


Рис.2. Измерительный пост системы АСМОС
Fig.2. Measuring post of ASMOS system

Данные с сенсоров собираются контроллером и с настроенной периодичностью отправляются на сервер приложений с помощью передатчика.

Результаты и их обсуждение. Одна из задач исследования – определение оптимального количества и расположения БС для заданной конфигурации сети. В случае возникновения ошибки возможно дублирование данных, что негативно скажется на статистике и нагрузке на сервер.

Отказоустойчивость сети [9] напрямую зависит от количества узлов в зоне действия одной БС, требований конечных устройств к пропускной способности и качества канала связи между БС и конечным устройством. При большом количестве ИП или при коротком интервале отправки данных в сети появляются ошибки, связанные с интерференцией.

При моделировании использованы следующие параметры: модель LoRa, разработанная в среде имитационного моделирования NS-3 [10], в качестве канального и физического уровня; размер одного пакета данных с показаниями сенсоров от ИП равен

50 байт; частота, с которой ИП отправляли показания с сенсоров, равна 1 пакету данных в 600 с; высота установки антенн ИП и БС составляет 6 и 50 м соответственно; радиус колец ИП и БС – 350 и 340 км соответственно; ИП и БС равномерно распределены по периметру; количество ИП и БС равно 160 и 60 соответственно.

Влияние соотношения высот антенн ИП и БС. Одна из задач реализации АСМОС – внедрение системы при наименьших трудовых и материальных затратах. Для этого необходимо подобрать такие значения высот антенн БС и ИП, при которых количество БС будет минимальным, при этом стоимость увеличения высоты антенн не должна превышать стоимости дополнительной БС с меньшей высотой антенны (рис.3).

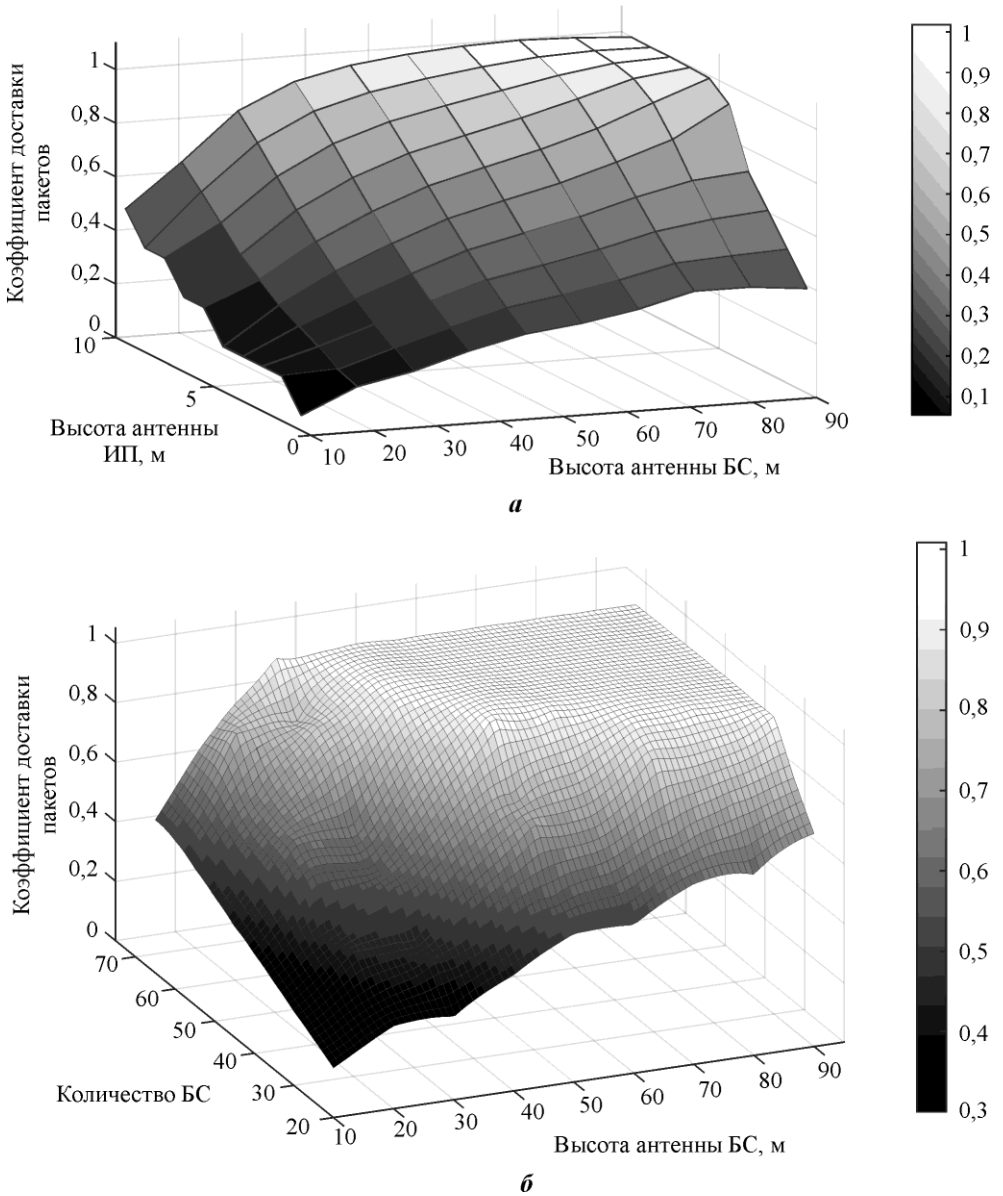


Рис.3. Зависимость коэффициента доставки пакетов с ИП на БС: *а* – от высот антенн БС и ИП (количество ИП фиксировано); *б* – от высот антенн БС и их количества

Fig.3. The dependence of the delivery ratio of packets from the measuring post to the base station: *a* – from the heights of the antennas base station and measuring posts (the number of measuring posts is permanent); *b* – from the heights of the antennas base station and their quantity

Вероятность доставки пакетов выше 0,9, если высота антенны ИП более 6 м, а антенны БС более 32 м. Вероятность доставки пакетов свыше 0,98 при высоте антенн ИП и БС 10 и 90 м соответственно. Протокол связи рассчитан на нахождение нескольких тысяч ИП в зоне покрытия одной БС [11], а в сценарии «Штормовое кольцо» – системы прогнозирования быстроразвивающихся опасных природных явлений и предупреждения населения – каждая БС покрывает не более пары десятков ИП (рис.3,*б*).

Оптимальная эффективная высота антенн БС от 32 до 90 м, а их количество от 40 до 60 (рис.4).

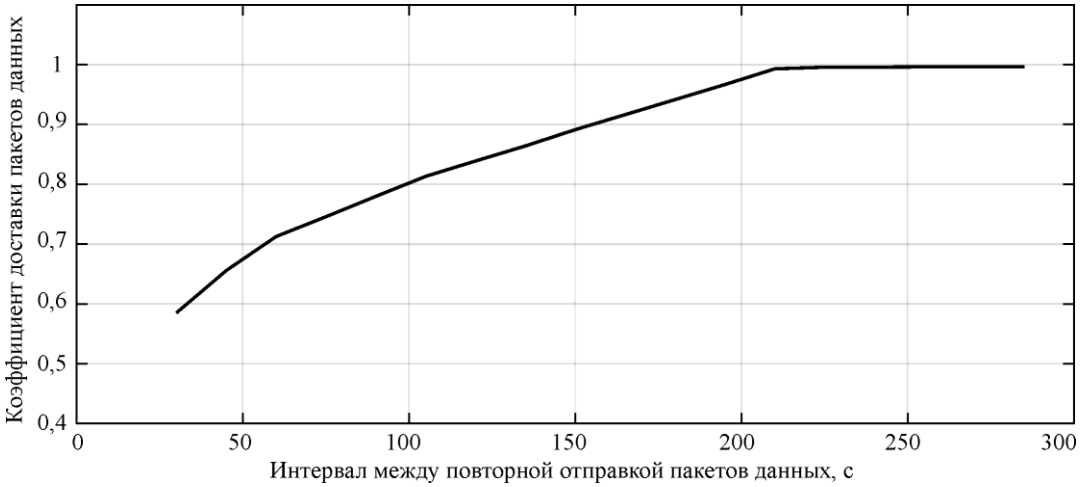


Рис.4. График зависимости доли пакетов от интервала до повторной отправки пакета
Fig.4. Plot of packet dependency on interval to resend packet

Большие объемы трафика влияют на коэффициент доставки. На полный опрос требуется 2*N* с плюс время на передачу служебного трафика (*N* – количество БС). При установке интервала опроса выше определенного порогового значения 210 с потери при интерференции снижаются до нуля.

Оптимизация размещения БС и ИП. Предлагаемая методика оптимизации размещения БС основана на нахождении глобального максимума некоторой целевой функции и описывает два свободных параметра: высота антенн БС и ИП и их оптимальное количество. При достаточно простом алгоритме положение всех БС выбирается одновременно из соображений максимального охвата источников загрязнения.

Для определения оптимального количества ИП в системе АСМОС проведена оценка характеристик информационных потоков в соответствии с теорией массового обслуживания. При условии оптимальности корректно принятые пакеты имеют значения параметров в среднем не менее 90 из каждых 100 значений. Интенсивность нагрузки канала $\rho = 90 / 30 = 3$, т.е. за время средней по продолжительности передачи данных с ИП 2 мин поступает в среднем 3 пакета данных с ИП. Зная эти величины, можно найти оптимальное число каналов, наиболее экономически эффективное.

Заключение. Предложенная имитационная модель АСМОС позволила выявить влияние высоты антенн и количества БС на вероятность доставки данных. Установлено существенное ограничение для применения технологии LoRa вследствие относительно невысокой дальности связи между БС и ИП. Согласно результатам моделирования определены пороговые значения количества БС – от 40 до 60, высоты антенн БС – от 32 до 90 м, ИП – от 6 до 10 м, интервала опроса 210 с, требующиеся для поддержания требуемого качества связи. Технология позволяет связывать только устройства, находя-

щиеся в зоне прямой радиовидимости, поэтому приходится устанавливать большое количество БС для покрытия всего периметра.

Результаты исследования могут быть применены в системе «Штормовое кольцо» [12], проектируемой для прогнозирования быстроразвивающихся опасных природных явлений и предупреждения населения на территории г. Москвы и Московской области.

Заинтересованными потребителями такой информации являются высокотехнологичные предприятия наукоемкой природно-технической геосистемы, конкурентоспособность продукции которых напрямую связана с уровнем экологического менеджмента.

Литература

1. ***Гинко В.И., Тараров А.Г.*** Система экологического мониторинга в управлении экологическим риском // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №3. – С. 6–10.

2. A green small cells deployment in 5G – Switch ON/OFF via IoT networks & energy efficient mesh backhauling / ***I. Allal, B. Mongazon-Cazavet, K. Al Agha et al.*** // IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops. – 2017. – P. 1–2.

3. ***Potéreau M., Veyrac Y., Ferre G.*** Leveraging LoRa spreading factor detection to enhance transmission efficiency // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 2018. – P. 1–5.

4. ***Theodore L.*** Air pollution control equipment. – John Wiley & Sons, Inc. – 2008. – 578 p.

5. ***Сысоева Т.И., Петкун А.С., Кучин В.В., Челибанов В.П.*** Результаты десятилетних измерений ряда параметров атмосферы Антарктики на привязных аэростатах // Известия РАН. Сер. Физическая. – 2016. – Т. 80. – № 5. – С. 600–603.

6. Modeling the process of network scaling for LoRaWan basen on NS3 / ***S. Muratchaev, A. Bakhtin, A. Volkov et al.*** // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – 2018. – P. 1309–1312.

7. ***Goursaud C., Gorce J.M.*** Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges // EAI Endorsed Transactions on Internet of Things. – 2015. – URL:www.meteorf.ru (дата обращения: 24.04.2019).

8. ***Lavric A., Popa V.*** Internet of Things and LoRa™ low-power wide-area networks challenges // 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence. – 2017. – P. 1–4.

9. ***Elshabrawy T., Robert J.*** Analysis of BER and coverage performance of LoRa modulation under same spreading factor interference // IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. – 2018. – P. 1–6.

10. ***Magrin D.*** Network level performances of a LoRa system. – Padua, Italy: 2016. – 104 p.

11. Impact of LoRa imperfect orthogonality: analysis of link-level performance / ***D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione et al.*** // IEEE Communications Letters. – 2018. – Vol. 22. – Iss. 4. – P. 796–799.

12. Приказ от 21 июня 2004 г. № 95 Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды «О внедрении на радиолокационной сети Росгидромета «основных технических требований к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов». – URL: www.meteorf.ru (дата обращения: 24.04.2019).

Поступила в редакцию 23.03.2019 г.; после доработки 24.04.2019 г.; принята к публикации 18.06.2019 г.

Севрюкова Елена Александровна – доктор технических наук, заместитель директора Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), melany@mail.ru

Волкова Елена Анатольевна – ассистент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), eavolkova2015@mail.ru

Угроватов Александр Валерьевич – магистрант кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), a.ugrovatov@gmail.com

Копылова Мария Дмитриевна – бакалавр кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kopylovoy.m@gmail.com

References

1. Ginko V., Tarasov A. System of ecological monitoring in managing of ecological risk. *Digital scientific magazine* «*Modern problems of science and education*», 2015, no. 3.

2. Allal I., Mongazon-Cazavet B., Al Agha K., Senouci S.M., Gourhant Y. A green small cells deployment in 5G – Switch ON/OFF via IoT networks & energy efficient mesh backhauling. *IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops*, 2017, pp. 1–2.

3. Potéreau M., Veyrac Y., Ferre G. Leveraging LoRa spreading factor detection to enhance transmission efficiency. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2018, pp. 1–5.

4. Theodore L. *Air pollution control equipment*. John Wiley & Sons, Inc., 2008, 578 p.

5. Sysoeva T.I., Petkun A.S., Kuchin V.A., Chelibanov V.P. Results of ten-year measurements of a number of parameters of the Antarctic atmosphere on tethered balloons. *Izvestiya RAN, Physical Series*, 2016, vol. 80, no. 5, pp. 600–603.

6. Muratchaev S., Bakhtin A., Volkov A., Ivanov V., Baskakov A. Modeling the process of network scaling for LoRaWan basen on NS3. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2018, pp. 1309–1312.

7. Goursaud C., Gorce J. M. Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges. *EAI endorsed transactions on Internet of Things*, 2015. Available at: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01231221 (accessed 20.03. 2019).

8. Lavric A., Popa V. Internet of Things and LoRa™ low-power wide-area networks challenges. *9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence* (*ECAI*), 2017, pp. 1–4.

9. Elshabrawy T., Robert J. Analysis of BER and coverage performance of LoRa modulation under same spreading factor interference. *IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (*PIMRC*), 2018, p. 1–6.

10. Magrin D. *Network level performances of a LoRa system*. Padua, Italy, Univ. of Padova, 2016, 104 p.

11. Croce D., Gucciardo M., Mangione S., Santaromita G., Tinnirello I. Impact of LoRa imperfect orthogonality: Analysis of link-level performance. *IEEE Communications Letters*, 2018, vol. 22, iss. 4, pp. 796–799.

12. *Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring*. Order of June 21, 2004, no. 95 on the implementation on the RosGidroMet radar network of «the main technical requirements for the detection system of dangerous atmospheric phenomena and storm promotion on the basis of meteorological radiometers».

Received 23.03.2019; Revised 24.04.2019; Accepted 18.06.2019.

Information about the authors:

Elena A. Sevryukova – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), melany@mail.ru

Elena A. Volkova – Assistant of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), eavolkova2015@mail.ru

Alexander V. Ugrovatov – Master's Degree Student of the Telecommunication System Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), a.ugrovatov@gmail.com

Maria D. Kopylova – Bachelor's Degree Student of the Telecommunication System Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kopylovoy.m@gmail.com

УДК 004.67:621.3.049.77 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-530-538

Эффективный метод локализации ошибок при проектировании специализированных БИС

Л.Г. Гагарина[1], И.О. Гайдук[1], Е.А. Кремер[1], А.В. Можжухина[1,2]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

reania@rambler.ru

В настоящее время в отечественных САПР отсутствует подсистема локализации ошибок на этапе функционально-логического проектирования. В работе проанализированы существующие методы САПР и рассмотрен необходимый минимальный функционал для метода локализации ошибок в рамках улучшения САПР «Ковчег». Предложен эффективный метод локализации ошибок на основе требований отечественного технологического процесса и проведенного анализа САПР. Представлена формализация задачи сокращения времени проектирования БИС. Дополнительно приведена схема данных разрабатываемой подсистемы локализации ошибок, учитывающая особенности САПР «Ковчег». К ним, в частности, относятся структура проектов БИС и особенности хранения в них информации. Рассмотрена зависимость времени разработки БИС от степени интеграции микросхемы до и после встраивания в САПР подсистемы локализации ошибок. Сокращение времени разработки БИС при данных упрощениях и усреднениях составляет около 7 % при идеальных условиях работы, что соответственно позволит уменьшить и стоимость микросхемы.

Ключевые слова: функционально-логическое моделирование; БИС; логическое проектирование; САПР

***Для цитирования*:** Гагарина Л.Г., Гайдук И.О., Кремер Е.А., Можжухина А.В. Эффективный метод локализации ошибок при проектировании специализированных БИС // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 5. – С. 530–538. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-530-538

© Л.Г. Гагарина, И.О. Гайдук, Е.А. Кремер, А.В. Можжухина, 2019

Efficient Error Localization Method during Developing Specialized LSI

***L.G. Gagarina*[1], *I.O. Gayduk*[1], *E.A. Kremer*[1], *A.V. Mozhzukhina*[1,2]**

[1]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*
[2]*SMC «Technological Center», Moscow, Russia*

reania@rambler.ru

Abstract: During functional logic modeling in the process of developing specialized large-scale integrated circuits (LSI) various tasks have to be solved. Currently, the domestic CAD systems lack the error localization subsystem at the stage of the functional-logical design. In the work the existing CAD methods have been analyzed, where the necessary minimum functionality for the error localization technique in the context of improving the «Kovcheg» CAD system had been considered. An effective method of localizing errors based on the requirements of the domestic process and the CAD analysis has been proposed. The formalization of the task of reducing the time for designing LSI has been presented. In addition, a diagram of the data of the developed error localization subsystem has been given, taking into account the features of the "Kovcheg" CAD system. These features, in particular, include the structure of the LSI projects and the peculiarities of storing information in them. When considering the dependence of the LSI development time on the degree of integration of the chip before and after embedding the error localization subsystem in the CAD system, the theoretical shortening of the LSI development time with these simplifications and averages is about 7% in ideal working conditions.

Keywords: LSI; visualization; structural scheme; CAD; FLM

For citation: Gagarina L.G., Gayduk I.O., Kremer E.A., Mozhzukhina A.V. Efficient error localization method during developing specialized LSI. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 530–538. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-530-538

Введение. В настоящее время одно из приоритетных направлений в изготовлении отечественных БИС – совершенствование САПР, в том числе за счет улучшения подсистем тестирования и отладки.

При разработке современных БИС используется широкий спектр разноплановых подсистем проектирования. В НПК «Технологический центр» (г. Москва) в маршрут изготовления микросхем входят следующие этапы: системное проектирование; функциональное проектирование; логическое проектирование; физическое (топологическое) проектирование; производство БИС; тестирование БИС в составе пластины и в составе корпуса; квалификационные испытания БИС; испытания БИС в составе аппаратуры заказчика. Поскольку при поиске ошибок на каждом из этапов могут возникнуть дополнительные временные задержки и возврат на предыдущие этапы, то процесс создания микросхем на сложных проектах значительно замедляется.

Многие отечественные САПР на сегодняшний день в полной мере не удовлетворяют всем потребностям в сфере разработки БИС. Наиболее полной и доступной САПР является «Ковчег» [1]. Однако вследствие отсутствия подсистемы локализации ошибок

на этапе логического проектирования разработчикам приходится обращаться к дорогостоящим зарубежным аналогам. Это может приводить не только к встраиванию в электрическую схему аппаратных закладок, но и к утечке информации и разрабатываемых проектов, поэтому необходимо создание собственной методики и подсистемы локализации ошибок в проектах специализированных БИС.

Анализ методик в современных действующих САПР. На основе анализа данных о различных САПР для разработки БИС выбраны две крупные фирмы – Cadence и Synopsys, а также Aldec, Xilinx, Altera и Icarus. В таблице представлены результаты анализа методик САПР выбранных компаний на основе требований отечественных разработчиков и технологического процесса.

Преимущества и недостатки существующих методик поиска ошибок на этапе логического проектирования
Advantages and disadvantages of existing methods for finding errors at the stage of logical design

Методика	Преимущества методики	Недостатки методики
Cadence NC-Verilog [2]	• Обширный набор средств и настроек для проверки модели микросхемы. • Визуальное отображение схемы. • Возможность раскрытия схемы от одного элемента. • Возможность просмотра значения сигнала на входах и выходах в процессе моделирования	• Работает только под Unix-подобными системами. • Вся информация о среде и сама среда только на английском языке. • Освоение системы управления функциями среды занимает много времени. • Не содержит в себе необходимого спектра функций для сквозного проектирования микросхемы
Synopsys VCS и DVE [3]	• Возможность отображения информации о микросхеме в разных представлениях (ASCII таблица моделирования и диаграмма сигналов). • Визуальное отображение схемы. • Возможность отслеживания пути сигнала в схеме БИС в двух режимах – «Path» и «Design»	• Совместимость только с Unix- системами. • Среда и пользовательские инструкции на английском языке. • Просмотр схемы целиком без возможности свертки/развертки от элемента. • Не содержит в себе необходимого спектра функций для сквозного проектирования микросхемы
Aldec Active-HDL [4]	• Возможность внесения изменений и правок в проект в процессе моделирования и поиска ошибок. • Визуальное отображение схемы. • Возможность просмотра значения сигнала на входах и выходах элементов схемы в процессе моделирования	• Инструкции по работе со средой и сама среда только на английском языке. • Просмотр схемы целиком без возможности свертки/развертки от элемента
Xilinx ISE [5]	• Возможность внесения изменений и правок в проект в процессе моделирования и поиска ошибок. • Возможность отслеживания пути сигнала в схеме микросхемы	• Визуальное отображение схемы без отображения сигнала. • Просмотр схемы целиком без возможности свертки от одного элемента. • Множество различных подсистем, входящих в состав среды, не нужных на этапе поиска ошибок в проекте микросхемы. • Информация по работе со средой и сама среда только на английском языке

Окончание таблицы

Методика	Преимущества методики	Недостатки методики
Altera ModelSim [6]	• Возможность внесения изменений и правок в код проекта в процессе моделирования и поиска ошибок. • Совместимость с Windows. • Визуальное отображение схемы микросхемы через Quartus II	• Инструкции по работе со средой и сама среда только на английском языке. • Просмотр схемы целиком без возможности свертки от одного элемента. • Бесплатная версия ограничена в функционале, полная версия платная
Icarus Verilog [7]	• Бесплатная версия	• Правки осуществляются внешними программистами, что ставит под угрозу данные проекта. • Инструкции по работе со средой и сама среда только на английском языке. • Совместимость только с Unix-подобными системами. • Полностью отсутствует какое-либо графическое отображение схемы

Цель настоящей работы – разработка методики локализации ошибок на этапе логического проектирования для дальнейшего использования при создании соответствующей подсистемы САПР «Ковчег».

Формализация проблемы локализации ошибок в проекте БИС. Для четкого понимания того, что именно необходимо улучшить в процессе разработки БИС, следует подробно рассмотреть формализацию поставленной задачи.

Основная формула расчета стоимости вывода микросхемы на рынок имеет вид

$$C = F(\tau,\theta) \to \min,$$

где F – функциональная зависимость; τ – время разработки БИС; θ – время производства БИС.

Поскольку использование САПР происходит на этапах разработки, то следует более подробно рассмотреть составляющие τ. В процесс разработки БИС включаются системное, функциональное, логическое и топологическое проектирование, а также фиксированное время на квалификационные испытания и испытания в аппаратуре заказчика. Необходимо учитывать, что с любого этапа возможен возврат для внесения правок. При этом все операции технологического маршрута между двумя этапами придется повторить:

$$\tau = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i}{K_i} N_i + \begin{cases} \max(T_{ex}, T_{exc}) \\ T_{ex} + T_{exc} \end{cases}, \quad (1)$$

где n – количество этапов разработки БИС; T_i – трудоемкость i-го этапа разработки; K_i – количество специалистов, выполняющих работу на i-м этапе; N_i – количество повторений i-го этапа разработки; T_{ex} – квалификационные испытания; T_{exc} – испытания в составе аппаратуры заказчика. Квалификационные испытания могут проводиться параллельно с испытаниями в составе аппаратуры заказчика либо отдельно в течение определенного времени, оговариваемого с заказчиком [8]. Принято, что в формуле (1) берется максимум из T_{ex}, T_{exc} или их сумма. В n учитывается базовое количество этапов разработки микросхемы. В N_i хранится число повторов каждого из этапов. Оно зависит от количества ошибок и сложности требований к изготавливаемой микросхеме.

В трудоемкости любого из этапов разработки учитывается назначение микросхемы. Например, если БИС будет использоваться заказчиком в космосе, то по сравнению с микросхемами обычного назначения у нее должны быть повышенная отказоустойчивость, больший срок работы и хранения, пониженное энергопотребление и др. В зависимости от этого варьируются требования к БИС.

Трудоемкость i-го этапа разработки выражается формулой

$$T_i = \frac{S(D,E)}{P_i},$$

где S – сложность разработки БИС, т.е. функциональная зависимость от E – степени интеграции БИС и D – коэффициента усложнения в зависимости от класса (назначения); P_i – производительность труда на i-м этапе разработки.

Степень интеграции БИС вычисляется по формуле

$$E = \lg U,$$

где U – количество элементов в составе БИС.

Наиболее важным параметром для рассмотрения является P_i [9]:

$$P_i = \frac{Q(1-k_p)}{t_{ki}K_i},$$

где Q – объем продукции; k_p – коэффициент простоев; t_{ki} – трудозатраты работников на i-м этапе. В трудозатратах работников учитывается наличие и совершенствование подсистем САПР, используемых для разработки.

Методика локализации ошибок в проекте БИС. На основе требований отечественного технологического процесса и проведенного анализа САПР разработана методика локализации ошибок, содержащая основные этапы.

Этап 1. Обнаружение ошибок при сравнении результатов функционально-логического моделирования (ФМЛ) и требуемой реакции на выводах БИС (например, на выходе необходимо получить определенный сигнал – единицу, а в результате моделирования получено неопределенное состояние).

Этап 2. Определение необходимого количества контрольных точек, число которых зависит от сложности микросхемы. Контрольная точка – файл, содержащий состояния всех контактов элементов логической схемы БИС в выбранный момент времени. Чем сложнее микросхема, тем сложнее с первого цикла разработки определить причину ошибок.

Этап 3. Расстановка контрольных точек и запуск моделирования. Каждая контрольная точка имеет свое уникальное имя.

Этап 4. Визуализация логической схемы БИС и состояний контактов в контрольных точках. Сначала подключается одна из контрольных точек, выбранных на этапе 3, и выбирается один элемент схемы. От выбранного элемента через соединения разворачивается остальная схема. Около выводов подписываются значения сигналов из выбранной контрольной точки. При необходимости можно сменить контрольные точки (перейти к этапу 6).

Этап 5. При успешной локализации проблемного элемента осуществляются правки в схеме.

Этап 6. При неудачной локализации проблемного элемента выбирается другая контрольная точки и происходит возврат к этапу 4.

Этап 7. При переборе всех доступных контрольных точек из этапа 7 необходимо вернуться на этап 3 и выбрать другой набор контрольных точек. В случае высокой сложности БИС требуется большое количество повторов всех этапов при постепенном сужении области поиска проблемного элемента.

Особенности подсистемы локализации ошибок для САПР «Ковчег». Для создания эффективной подсистемы локализации ошибок для САПР «Ковчег» на этапе логического проектирования необходимо наличие определенных функций, в том числе графической визуализации схемы, связи моделирования с визуализированной схемой и развертывания схемы от одного элемента.

Первая функция должна находить в библиотеке элементов файл с графическим отображением элемента и выводить его на экран в определенном месте. В этой же функции выбирается первый элемент для дальнейшего развертывания схемы. Также необходимы несколько переменных для хранения специфических данных:

- список графических элементов, в котором хранится информация об уже выведенных на экран графических элементах схемы;
- матрица, представляющая собой структуру данных для расчетов, содержащую схематичное отображение элементов схемы в графическом окне, в частности информацию о занятости точки поля графическим элементом и его характеристиках. Эта структура нужна для правильной расстановки и трассировки элементов.

Кроме того, необходима функция для состыковки подсистемы моделирования с подсистемой локализации ошибок с помощью контрольных точек. Таким образом, после выбора контрольной точки в меню подсистемы из файла считывается информация о состоянии всех контактов, выводится на экран над контактами визуализированных элементов схемы и вносится в поле. Функция развертывания схемы от одного элемента необходима для минимизации выведения ненужных элементов на экран. В результате разработчик выводит на экран только необходимую для проверок часть микросхемы.

Для корректной работы при выводе новых элементов на экран функция отображения элементов всегда должна сверяться с матрицей (свободна ли область) и предусматривать механизмы выбора другого места, если область уже занята. Сюда же включен алгоритм соединения элементов. В процессе трассировки проверяется возможность проведения соединения и занесение проведенных линий в поле. За основу алгоритма трассировки взят волновой алгоритм (алгоритм Ли) ввиду его высокой результативности [10].

Из дополнительных функций специалисты указывают на необходимость функций отслеживания пути; удаления из графического окна каких-либо ранее выведенных элементов; поиска и выведения на экран ближайших триггеров в цепи по контакту какого-либо элемента. Последняя поможет выяснить, с какого триггера в цепи за счет задержек и ошибок в схеме подается неправильный сигнал (все данные не успели установиться на всех элементах схемы при переключении основного сигнала clock за период).

При разработке схем алгоритмов функций необходимо учитывать специфику хранения информации об элементах схемы, а также проектов БИС, особенности реализации структур данных и специфику хранения данных контрольных точек. При создании подсистемы локализации ошибок в проектах БИС также проанализированы данные и составлена схема [11], представленная на рисунке (где УГО – условные графические обозначения). Она, согласно ГОСТу, отражает взаимосвязи подсистем моделирования и локализации ошибок. Методика локализации ошибок частично выполняется в подсистеме моделирования, где можно проследить взаимосвязи перечисленных функций с требуемой для их работы информацией. Для работы подсистемы в проекте БИС должна содержаться информация обо всех условных графических обозначениях и контрольных точках. Разработчик сам выбирает первый элемент, контрольные точки и схему, на базе которых осуществляется работа подсистемы.

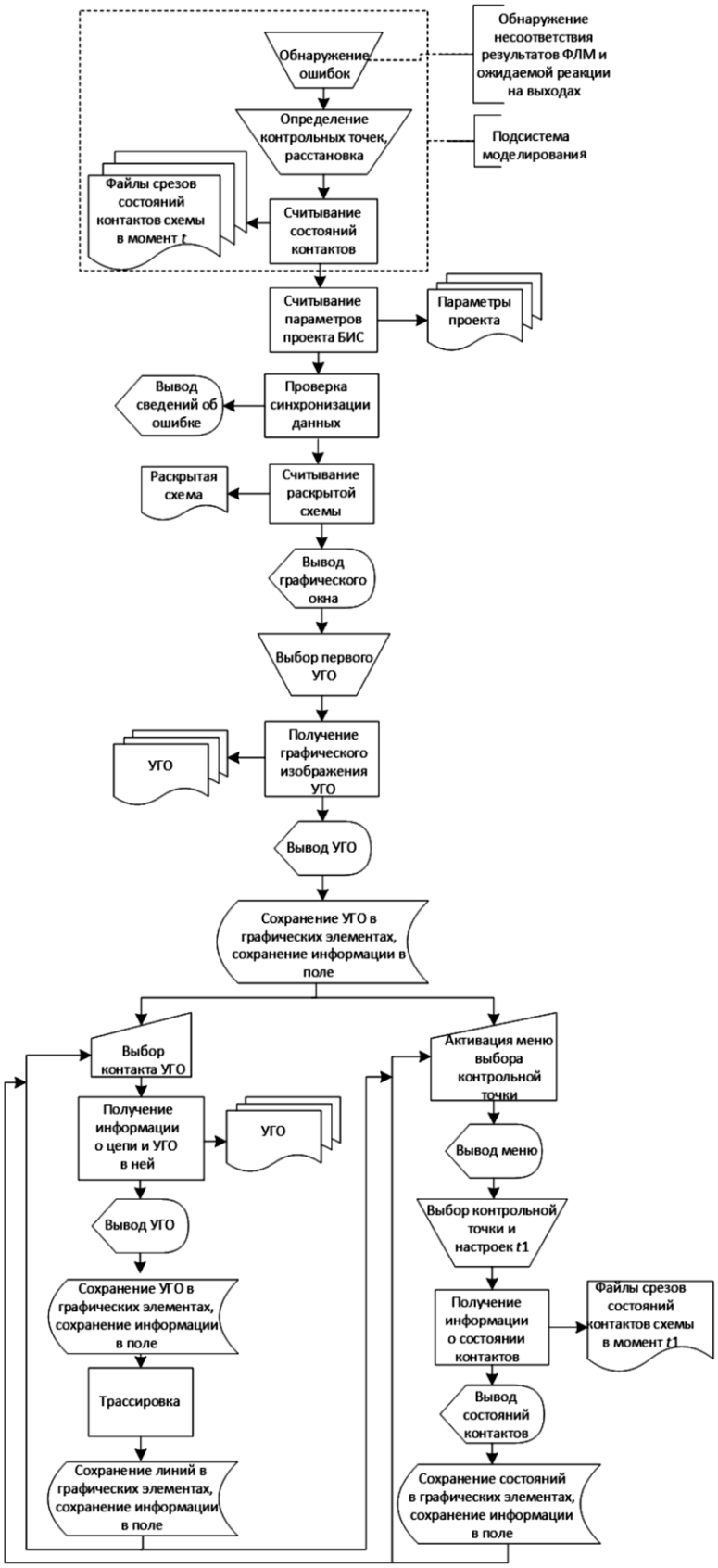


Схема данных подсистемы локализации ошибок
Data scheme of the error localization subsystem

Рассмотрена зависимость времени разработки САПР от степени интеграции микросхемы до и после встраивания подсистемы локализации ошибок. С учетом определенных упрощений и принятия рабочего дня, равного 8 ч, при всех идеальных значениях на разработку микросхемы тратится $\tau = \sum_{1}^{4} 8 + 1$ неделя + 1 неделя = 8·4 + 8·5·2 = 112 ч, или 14 рабочих дней. С учетом времени производства БИС θ и минимальных производственных рисков итоговое время вывода микросхемы на рынок примерно один месяц.

При более детальном рассмотрении зависимости времени разработки БИС от степени интеграции микросхемы до и после встраивания в САПР подсистемы локализации ошибок сокращение времени разработки БИС при данных упрощениях и усреднениях составляет около 7 % при идеальных условиях работы. Процент обращений к подсистеме локализации при этом от 9 до 15 % от общего числа повторения этапов разработки N_i и n.

Заключение. В соответствии с проведенными расчетами смоделирован процесс вывода микросхем в среде MatLab на рынок.

В формализации проблемы локализации ошибок в проекте БИС улучшение происходит за счет сокращения времени и снижения трудозатрат специалистов при локализации ошибок. При снижении трудоемкости t_{ki} сокращается время этапа логического проектирования T_i. Это достигается путем использования совместной визуализации структурной схемы и результатов ФЛМ. Таким образом, сокращается время разработки БИС τ, а также уменьшается число повторов этапов N_i. Разработанный метод позволит уменьшить время разработки микросхемы, соответственно, и ее стоимость C.

Литература

1. ***Гаврилов С.В., Денисов А.Н., Коняхин В.В.*** Система автоматизированного проектирования «Ковчег 2.1» / под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Микрон-Принт, 2001. – 210 с.

2. ***Manikas T., Thornton M.*** Tutorial for cadence simvision verilog simulator tool. – Southern Methodist University, 2013. – 9 p.

3. ***Hima Bindu Kommuru, Hamid Mahmoodi.*** ASIC design flow tutorial using synopsys tools. – San Francisco: State University San Francisco, 2009. – 124 p.

4. ***Шалагинов А.*** Изучаем Active-HDL // Компоненты и технологии. – URL: http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2009_03_134.php (дата обращения: 18.09.2018).

5. Synthesis and simulation design guide. – Xilinx, 2007. – 218 p.

6. ModelSim-altera software simulation. User Guide. – Altera, 2013. – 12 p.

7. User Guide // Icarus Verilog. – URL: http://iverilog.wikia.com/wiki/User_Guide (дата обращения: 24.09.2018).

8. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. – М., 1991. – 24 с.

9. Основные показатели и формула для расчета производительности труда // Делать Дело. Кадровое делопроизводство. – URL: https://delatdelo.com/spravochnik/osnovy-biznesa/proizvoditelnost/truda-formula-rascheta.html (дата обращения: 24.10.2018).

10. Волновой алгоритм поиска пути. Статьи и студенческие работы. – URL: http://www.100byte.ru/100btwrks/wv/wv.html (дата обращения: 24.10.2018).

11. ГОСТ 19.701-90. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. – М., 1990. 26 с.

Поступила в редакцию 24.04.2019 г.; после доработки 29.04.2019 г.; принята к публикации 18.06.2019 г.

Гагарина Лариса Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, директор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), incos@miee.ru

Гайдук Игорь Олегович – ассистент Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), igolgai@mail.ru

Кремер Евгений Александрович – аспирант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), kremerea@gmail.com

Можжухина Арина Валерьевна – магистр Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер НПК «Технологический центр» (124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), reania@rambler.ru

References

1. Gavrilov S.V., Denisov A.N., Konyahin V.V. Ed. By Chapligin Y.A. *CAD system «Kovcheg 2.1»*. Moscow, Micron-Print Publ., 2001. 210 p. (in Russian).

2. Manikas T., Thornton M. *Tutorial for Cadence simvision verilog simulator tool*. Southern Methodist University, 2013. 9 p.

3. Hima Bindu Kommuru, Hamid Mahmoodi. *ASIC Design flow tutorial using Synopsys tools.* Nano-Electronics & Computing Research Lab School of Engineering San Francisco State University San Francisco, CA, 2009. 124 p.

4. Shalaginov A. Studying Active-HDL. *Components and Technology*. Available at: http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2009_03_134.php (accessed: 18.09.2018). (in Russian).

5. *Synthesis and Simulation Design Guide*. Xilinx, 2007. 218 p.

6. *ModelSim-Altera Software Simulation*. User Guide. Altera, 2013. 12 p.

7. *Icarus Verilog. User Guide: Digest of articles on using Icarus Verilog*. Available at: http://iverilog.wikia.com/wiki/User_Guide (accessed: 24.09.2018).

8. *GOST 16504-81. Testing and quality control of products*. Moscow, 1991. 24 p. (in Russian).

9. Key indicators and formula for calculating productivity. *To do business. Online journal, personnel office work*. Available at: https://delatdelo.com/spravochnik/osnovy-biznesa/proizvoditelnost/truda-formula-rascheta.html (accessed: 24.10.2018). (in Russian).

10. *Wave algorithm for finding the path. Articles and student work*. Available at: http://www.100byte.ru/100btwrks/wv/wv.html (accessed 24.10.2018). (in Russian).

11. *GOST 19.701-90. Schemes of algorithms, programs, data and systems*. Moscow, 1990. 26 p. (in Russian).

Received 24.04.2019; Revised 29.04.2019; Accepted 18.06.2019.

Information about the authors:

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of System and Computer Science and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), incos@miee.ru

Igor O. Gayduk – Assistant of the Institute of System and Computer Science and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), igolgai@mail.ru

Evgeny A. Kremer – PhD student of the Institute of System and Computer Science and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kremerea@gmail.com

Arina V. Mozhzhukhina – Master's Degree of the Institute of System and Computer Science and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, SIC «Technological Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), reania@rambler.ru

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@miee.ru

http://ivuz-e.ru