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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 26 | Vol. 26
№ 3-4 | No. 3-4
май - июнь | May - June
июль - август | July - August
2021

МЭС-2021

X Юбилейная Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2021)

Очередная X Юбилейная Всероссийская с международным участием конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2021) проводится с марта по ноябрь 2021 г. в виде интернет-форума с заседаниями научных секций разной тематической направленности в онлайн-режиме. Прием докладов осуществляется ***с 1 марта по 1 августа 2021 г.***

Конференция завершится проведением очного пленарного заседания, а также работой секции «Презентации новых микроэлектронных проектов, САПР и готовых продуктов», на которой партнеры и спонсоры конференции представят доклады о своих разработках.

Организаторы конференции: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, Казенное предприятие города Москвы «Корпорация развития Зеленограда».

Оператор конференции: Межрегиональная общественная организация «Московское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова».

Учредители конференции: Российская академия наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Российский фонд фундаментальных исследований, Правительство г. Москвы, Префектура Зеленоградского АО г. Москвы, ОА «Концерн радиостроения «Вега», МИРЭА – Российский технологический университет, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Южный федеральный университет, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Официальные партнеры и спонсоры: Фонд «Сколково», Фонд инфраструктурных и образовательных программ Роснано, фирма Intel, АО «ПКК Миландр», АО «Мегратек» и другие организации.

Конференция МЭС-2021 посвящена актуальным вопросам автоматизации проектирования микроэлектронных систем, систем на кристалле, сложнофункциональных блоков и новой элементной базы микро- и наноэлектроники.

Принятые доклады будут опубликованы на сайте конференции, а также в четырех выпусках трудов конференции. Будут проведены конкурсы на лучшие доклады с призами для победителей.

Сборник трудов конференции МЭС 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.

Более подробную информацию о конференции можно получить на сайте: **http://www.mes-conference.ru**

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 26, № 3-4, 2021

май – июнь

июль – август

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), ORCID: 0000-0002-7505-5175

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Быков Дмитрий Васильевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4935-7292
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
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), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
Кубарев Юрий Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова (Москва, Россия)
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Максимов Иван Александрович – PhD, проф., Университет города Лунд (Швеция), ORCID: 0000-0003-1944-4878
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© "Известия вузов. Электроника", 2021
© МИЭТ, 2021

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), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада)
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Институт электронной инженерии и нанотехнологий АНМ (Кишинев, Молдова), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

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 22.06.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 16,275 усл.печ.л., 14,58 уч.-изд.л. Тираж 200 экз. Заказ № 4. 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 по следующим группам специальностей:

05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление
05.27.00 Электроника

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

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

Является членом Cross Ref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» – 38934

http://ivuz-e.ru
DOI: 10.24151/1561-5405
ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

Вигдорович Е.Н. Прогнозирование условий хлоридно-гидридной эпитаксии слоев $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}P_x$, изопериодных с GaAs и $GaAs_{1-x}P_x$ 207

Зайцева Ю.С., Боргардт Н.И., Приходько А.С., Zallo E., Calarco R. Электронно-микроскопические исследования структуры тонких эпитаксиальных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$, выращенных на подложке Si(111) 214

Технологические процессы и маршруты

Abazyan S.S., Melikyan V.Sh. Power and Ground Metal Insertion into Integrated Circuit Design Combined with Timing Aware Dummy Metal Fill Insertion

(Абазян С.С., Меликян В.Ш. Конструирование шин питания и заземления в интегральной схеме с вставкой фиктивного металлического заполнителя с учетом временных параметров) 226

Новак А.В., Новак В.Р., Румянцев А.В. Особенности процесса изготовления кремниевых игл для кантилеверов 234

Тихонов Р.Д., Поломошнов С.А., Амеличев В.В., Черемисинов А.А., Ковалев А.М. Формирование пленок тройной системы CoNiFe электрохимическим осаждением 246

Чугунов Е.Ю., Погалов А.И., Тимошенков С.П. Инженерные расчеты узлов и сборок изделий микроэлектронной техники с применением конечно-элементного моделирования 255

Каракеян В.И., Харламов Н.Р., Рябышенков А.С. Оценка профессиональных рисков в технологических помещениях на предприятии микроэлектроники 265

Схемотехника и проектирование

Melikyan V.Sh., Gevorgyan V.S. High Accuracy Two-Step Flash ADC with Changeable Comparison Range Using Latch Based Comparator

(Меликян В.Ш., Геворгян В.С. Высокоточный двухступенчатый АЦП с изменяемым диапазоном сравнения с использованием компаратора на основе защелки) 273

Волобуев С.В., Рябцев В.Г. Особенности интерфейса устройства тестового диагностирования памяти DDR SDRAM 282

Информационно-коммуникационные технологии

Степанов Н.В. Оценка вероятности выполнения целевых функций автомата видеоконтроля 291

Гагарина Л.Г., Доронина А.А., Фомин Р.А., Чухляев Д.А. Исследование управляемости билинейных систем с ограниченным управлением 302

Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Исследование антропогенных изменений в городском ландшафте по данным инфракрасного диапазона Landsat-8 314

Краткие сообщения

Злобин А.В., Клюкин В.И., Николаенков Ю.К. Моделирование блока восстановления тактовой частоты и данных на основе схемы фазовой автоподстройки частоты 324

Гундарцев М.А., Каракеян В.И., Рябышенков А.С., Шараева В.П. Применение методологии энергоэкологического анализа для исследования системы удаления воздуха чистых помещений в микроэлектронике 328

Юбилеи

Неволину Владимиру Кирилловичу – 80 лет 333

Чаплыгину Юрию Александровичу – 70 лет 335

Конференции

Харач О.Г. Об итогах 28-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2021» 337

X Юбилейная Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2021) ..... 2-я стр. обложки

К сведению авторов 339

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 26, No. 3-4, 2021
May – June
July – August
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), ORCID: 0000-0002-7505-5175

Editorial Board:

Sergey A. Gavrilov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Dmitri V. Bykov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-4935-7292
Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Aleksandr A. Gorbatsevich – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1950-356X
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), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Yury N. Korkishko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Optolink LLC (Moscow, Russia)
Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC «NIIME» (Moscow, Russia)
Yuri V. Kubarev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Prokhorov Academy of Engineering Sciences (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), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Ivan A. Maksimov - PhD, Prof., Lund University (Sweden), ORCID: 0000-0003-1944-4878
Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJSC Company «Synopsys Armenia» (Yerevan, Armenia), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© "Proceedings of Universities. Electronics", 2021
© MIET, 2021

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), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Konstantin O. Petrosyantz – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Andrey Y. Sazonov - PhD, Prof., University of Waterloo (Canada)
Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of the Electronic Engineering and Nanotechnologies ASM (Chisinau, Moldova), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia) , ORCID: 0000-0003-4944-676X
Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain), ORCID: 0000-0002-1433-260X

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 22.06.2021. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 16,275. Number of copies 200. Order no. 4. 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 for the following groups of specialties:

05.11.00 Instrumentation, metrology and information-measuring devices and systems
05.13.00 Computer science, computer engineering and management
05.27.00 Electronics

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

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

Is the member of Cross Ref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue «Russian Press» LLC «Agency «Book a Service» – 38934

http://ivuz-e.ru
DOI: 10.24151/1561-5405
ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)

CONTENTS

Electronics materials

Vigdorovich E.N. Prediction of the Conditions of Chloride-Hydride Epitaxy of $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}P_x$ Isoperiod Layers with GaAs and $GaAs_{1-x}P_x$ 207

Zaytseva Yu.S., Borgardt N.I., Prikhodko A.S., Zallo E., Calarco R. Electron Microscopy Studies of the Structure of Thin Epitaxial $Ge_2Sb_2Te_5$ Layers Grown on Si(111) Substrate 214

Technological processors and routes

Abazyan S.S., Melikyan V.Sh. Power and Ground Metal Insertion into Integrated Circuit Design Combined with Timing Aware Dummy Metal Fill Insertion 226

Novak A.V., Novak V.R., Rumyantsev A.V. Features of the Manufacturing Process of Silicon Tips for Cantilevers 234

Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Amelichev V.V., Cheremisinov A.A., Kovalev A.M. CoNiFe Triple System Films Formation by Electrochemical Deposition 246

Chugunov E.Y., Pogalov A.I., Timoshenkov S.P. Engineering Calculations of Microelectronic Products Parts and Assemblies Using Finite-Element Modeling 255

Karakeyan V.I., Kharlamov N.R., Ryabyshenkov A.S. Occupational Risk Assessment in Engineering Spaces at the Microelectronics Enterprise 265

Circuit engineering and design

Melikyan V.Sh., Gevorgyan V.S. High Accuracy Two-Step Flash ADC with Changeable Comparison Range Using Latch Based Comparator 273

Volobuev S.V., Ryabtsev V.G. Interface Features of the DDR SDRAM Memory Test Diagnostic Device 282

Information-communication technologies

Stepanov N.V. Estimation of the Automated Video Control Device's Target Functions Performance Probability 291

Gagarina L.G., Doronina A.A., Fomin R.A., Chukhlyaev D.A. Study of Controllability of Bilinear Systems with Limited Control 302

Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Study of Anthropogenic Changes in the Urban Landscape Based on the Landsat-8 Infrared Range 314

Brief reports

Zlobin A.V., Klyukin V.I., Nickolaenkov Yu.K. Clock Signal and Data Recovery Unit Modeling Based on Phase-Locked-Frequency Scheme 324

Gundartsev M.A., Karakeyan V.I., Ryabyshenkov A.S., Sharaeva V.P. Energy and Environment Analysis Methodology Application for the Study of the Clean Room Air Removal System in Microelectronics 328

Anniversaries

Nevolin Vladimir Kirillovich is 80 years old 333

Chaplygin Yury Aleksandrovich is 70 years old 335

Conferences

Harach O.G. About the Results of the 28 All-Russian Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students and Graduate Students «Microelectronics and Informatics – 2021» 337

X Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation «Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems» (MES-2021) ..... 2 cover page

Instructions for authors 339

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

УДК 621.315.592:539.23-022.532 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-207-213**

Прогнозирование условий хлоридно-гидридной эпитаксии слоев $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}P_x$, изопериодных с GaAs и $GaAs_{1-x}P_x$

Е.Н. Вигдорович

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

evgvig@mail.ru

Для получения многокомпонентных твердых растворов $A^{III}B^{V}$ в основном применяются газофазные методы, такие как хлоридно-гидридный, эпитаксия из металлоорганических соединений, молекулярно-лучевая эпитаксия. Разработка оптимальных технологических режимов многокомпонентных слоев и структур, как правило, требует больших временных и материальных затрат. В работе предложен метод моделирования процессов роста многокомпонентных твердых растворов, основанный на базовых физико-химических закономерностях кристаллизации материалов и свойств соединений $A^{III}B^{V}$. Проанализированы и спрогнозированы процессы получения четырехкомпонентных твердых растворов $In_{1-y}Ga_yAs_{1-x}P_x$, изопериодных с GaAs и трехкомпонентными твердыми растворами $GaAs_{0,8}P_{0,2}$ и $GaAs_{0,6}P_{0,4}$. Экспериментально реализованы рассчитанные режимы и получены материалы, по качеству соответствующие современному уровню.

Ключевые слова: наногетероструктуры; газофазные методы; изопериодные слои

Для цитирования: Вигдорович Е.Н. Прогнозирование условий хлоридно-гидридной эпитаксии слоев $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}P_x$, изопериодных с GaAs и $GaAs_{1-x}P_x$ // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 207–213. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-207-213

© Е.Н. Вигдорович, 2021

Prediction of the Conditions of Chloride-Hydride Epitaxy of $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}P_x$ Isoperiod Layers with GaAs and $GaAs_{1-x}P_x$

E.N. Vigdorovich

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

evgvig@mail.ru

Abstract: Multicomponent solid solutions of $A^{III}B^{V}$ are increasingly used in optoelectronics, photonics, and other fields of science and technology. These are AlGaInN-based emitters, InGaAsP-based receivers, etc. In addition, these materials are widely used as buffer and isomorphic layers in general-purpose nanoheterostructures. The main methods of their production are gas-phase methods, such as chloride-hydride, MOS-hydride epitaxy, MBE. The development of optimal technological modes of multicomponent layers and structures, as a rule, takes a lot of time and is quite expensive. In this paper, the author proposed a method for modeling processes based on the basic physical and chemical laws of the crystallization processes of materials and the properties of $A^{III}B^{V}$ compounds. The analysis and prediction of the processes of obtaining four-component solid solutions $In_{1-y}Ga_yAs_{1-x}P_x$, isoperiodic with GaAs, three-component solid solutions $GaAs_{0,8}P_{0,2}$ and $GaAs_{0,6}P_{0,4}$ were performed. The calculated modes have been experimentally implemented and the materials corresponding to the current level of quality have been obtained.

Keywords: nanoheterostructure; gas-phase methods; isoperiodic layers

For citation: Vigdorovich E.N. Prediction of the conditions of chloride-hydride epitaxy of $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}P_x$ isoperiod layers with GaAs and $GaAs_{1-x}P_x$. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 207–213. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-207-213

Введение. Многокомпонентные твердые растворы $A^{III}B^{V}$ широко применяются в оптоэлектронике, фотонике и других областях науки и техники [1, 2] при создании излучателей на основе AlGaInN, приемников на основе InGaAsP и т.п. [3–5]. Кроме того, эти материалы используются в качестве буферных и изоморфных слоев в наногетероструктурах широкого назначения [6–8]. Исходя из физико-химической природы процессов эпитаксии материалов, режиму получения соединений с одинаковой степенью упорядочения и разными фундаментальными свойствами (например, теплота образования, энтропия, ширина запрещенной зоны) будут соответствовать различные энергии кристаллизации.

Физико-химические свойства соединений $A^{III}B^{V}$ хорошо коррелируют друг с другом. Обнаружена связь теплоты образования и температуры плавления, свободной поверхностной энергии и среднего атомного номера и др. Аналогичная корреляция должна наблюдаться и для энергии кристаллизации соединений с одинаковой степенью разупорядочения.

С наибольшей вероятностью энергия кристаллизации $\Delta G^{кр}$ должна коррелировать с теплотой плавления или с теплотой атомизации $\Delta H^{ат}$. Так как теплота атомизации для

соединений $A^{III}B^{V}$ различается, то для создания одинаковой степени упорядочения необходимо затратить разную энергию, т.е. можно записать следующие выражения:

$$\frac{\Delta G_1^{кр}}{\Delta G_2^{кр}} = \frac{\Delta H_1^{ат}}{\Delta H_2^{ат}}$$

и

$$\frac{-\Delta Z_1^H}{-\Delta Z_2^H} = \frac{\Delta H_1^{ат}}{\Delta H_2^{ат}} \left(\frac{V_1^{2/3}\sigma_1}{V_2^{2/3}\sigma_2} \right)^2,$$

где ΔZ_i^H – термодинамическое пересыщение в процессе эпитаксии для температур $T_1^{эп}$ и $T_2^{эп}$; V_i и σ_i – мольный объем и свободная поверхностная энергия соответственно.

Таким образом, определив оптимальные условия кристаллизации в процессе эпитаксии одного из соединений, можно рассчитать, например, режим эпитаксии других соединений в соответственных условиях.

Цель настоящей работы – разработка метода моделирования условий получения многокомпонентных твердых растворов $A^{III}B^{V}$.

Математическая поверхность переноса для газофазного процесса. На основании представлений Н.С. Курнакова о непрерывности свойств твердых растворов и о соответственных технологических условиях эпитаксии можно предположить следующее. Если фаза, участвующая в равновесии, одновременно принадлежит тройной и четверной системам, то свойства этой фазы в четверной системе зависят от ее свойств в тройной системе [9, 10].

Таким образом, зная технологические условия получения тройных систем, можно, например, найти соответственные (оптимальные) условия получения четырехкомпонентной системы любого состава [4, 5]. Для этого в системе трилинейных координат выразим математически поверхность переноса в общем виде для четверной взаимной системы *AX–BX–AY–BY,* где *X,Y* – второй компонент в бинарной системе:

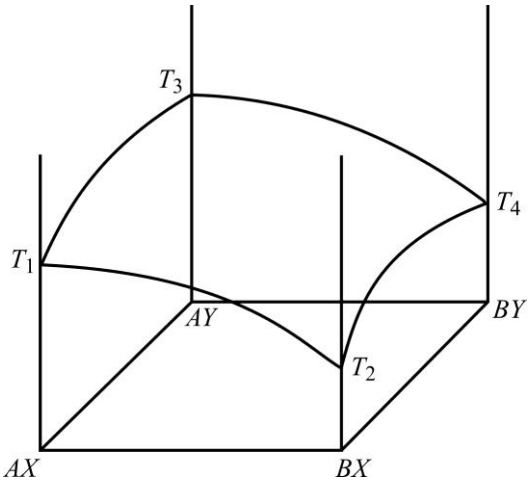
$$T_1T_2 \begin{Bmatrix} t = \varphi(x) \\ y = 0 \end{Bmatrix}, \quad T_2T_3 \begin{Bmatrix} t = \tau(x) \\ x = 0 \end{Bmatrix},$$

где τ и φ – функции изменения параметра *t* от координат *x* и *y* соответственно.

Математическая поверхность переноса для рассматриваемого случая показана на рисунке. Поверхность переноса может быть образована как параллельным переносом кривой T_1T_2 вдоль T_1T_3, так и наоборот:

$$t = F(x, y) = \varphi(x) + \tau(y) - T_1,$$

где *t* – свойство четверной системы при заданных составах твердого раствора *x* и *y*.



Математическая поверхность переноса для четверной взаимной системы *AX–BX–AY–BY*

Mathematical transfer surface for the four-dimensional mutual system *AX–BX–AY–BY*

Для T_3T_4 и T_2T_4 можно записать

$$T_3T_4 \begin{Bmatrix} t = \varphi(x) + T(1) - T_1 \\ y = 0 \end{Bmatrix}, \quad T_2T_4 \begin{Bmatrix} t = T(y) + \varphi(1) - T_1 \\ x = 1 \end{Bmatrix}.$$

С помощью данного подхода можно определить соответственные условия получения четырехкомпонентных твердых растворов $In_{1-y}Ga_yAs_{1-x}P_x$, изопериодных (с одинаковым параметром решетки) с трехкомпонентными твердыми растворами $GaAs_{0,8}P_{0,2}$ и $GaAs_{0,6}P_{0,4}$. Эти гетероструктуры используются в приборах оптоэлектроники и фотоники с новыми функциональными характеристиками [1, 2], а также для создания изопериодных или изоморфных буферных слоев с целью улучшения характеристик уже разработанных устройств [3, 4].

Анализ соответственных (оптимальных) условий получения четырехкомпонентных твердых растворов. Условия оптимальных режимов твердых растворов $GaAs_{1-x}P_x$ известны из литературных источников. Однако для определения необходимого пересыщения в четверной системе надежные данные о получении твердых растворах $In_{1-y}Ga_yAs$ отсутствуют.

В настоящей работе для определения изменения свободной поверхностной энергии в четверной системе используются данные по изменению микротвердости в системе GaAs–InAs.

В табл. 1 приведены исходные данные и результаты расчета соответственных условий получения твердых растворов $In_{1-y}Ga_yAs$ различного состава.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета условий получения $In_{1-y}Ga_yAs$

Table 1

Initial data and results of calculation of conditions for obtaining $In_{1-y}Ga_yAs$

Исходные данные				Результат расчета	
x, мольная доля	Температура плавления $T_{пл}$, К	Микротвердость H, кг/мм^2	Поверхностная энергия σ, эрг/см^2	Температура эпитаксии $T_{эп}$, К	Давление P_{AsH}, атм
0,1	1270	450	1550	840	$2{,}0\cdot10^{-6}$
0,2	1320	520	1750	874	$1{,}0\cdot10^{-5}$
0,3	1356	600	1970	898	$5{,}0\cdot10^{-5}$
0,4	1370	610	2040	907	$2{,}5\cdot10^{-4}$
0,5	1424	650	2200	943	$1{,}0\cdot10^{-3}$
0,6	1446	700	2380	957	$1{,}7\cdot10^{-2}$
0,7	1466	730	2500	970	$2{,}0\cdot10^{-2}$
0,8	1484	710	2430	983	$1{,}8\cdot10^{-2}$
0,9	1500	700	2380	993	$1{,}6\cdot10^{-2}$

Анализ условий эпитаксии и экспериментальная проверка проводились для хлоридно-гидридного метода. Согласно представлениям о соответственных условиях и данным диаграмм состояния для систем GaAs–GaP и GaAs–InAs, рассчитана температура эпитаксии и давление пара гидридов (пересыщение) для твердых растворов $In_{1-y}Ga_yAs_{1-x}P_x$ различного состава (табл.2).

Процессы эпитаксии экспериментально проводились на установках типа «Эпитрон» с использованием взаимодействия чистого хлористого водорода с металлическим галлием и индием, а также гидридов мышьяка и фосфора (арсина и фосфина). В качестве лигатуры использовалась смесь теллуроводорода или сероводорода в водороде необходимой концентрации. Реализованы смоделированные технологические условия и получены гетероструктуры заданного состава.

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета соответственных условий получения изопериодных твердых растворов $In_{1-y}Ga_yAs_{1-x}P_x$

Table 2

Initial data and results of calculation of the corresponding conditions for obtaining isoperiodic solid solutions $In_{1-y}Ga_yAs_{1-x}P_x$

Исходные данные			Результат расчета	
x, мольная доля	*y*, мольная доля	λ, нм	Температура эпитаксии $T_{эп}$, К	Давление ΣP_{BH_3}, атм
Изопериодные с GaAs				
0,2	0,90	824	1010	$1{,}1\cdot10^{-2}$
0,4	0,80	773	1020	$6{,}5\cdot10^{-3}$
0,6	0,70	727	1029	$4{,}5\cdot10^{-3}$
0,8	0,61	687	1035	$2{,}5\cdot10^{-3}$
0,9	0,55	668	1038	$1{,}8\cdot10^{-3}$
Изопериодные с $GaAs_{0,8}P_{0,2}$				
0,4	0,90	727	1056	$1{,}3\cdot10^{-2}$
0,5	0,80	687	1063	$6{,}6\cdot10^{-3}$
0,7	0,76	668	1065	$5{,}0\cdot10^{-3}$
0,8	0,71	651	1067	$3{,}8\cdot10^{-3}$
0,9	0,65	634	1069	$2{,}9\cdot10^{-3}$
Изопериодные с $GaAs_{0,6}P_{0,4}$				
0,5	0,95	640	1085	$1{,}6\cdot10^{-2}$
0,6	0,90	625	1087	$1{,}3\cdot10^{-2}$
0,7	0,85	610	1088	$1{,}0\cdot10^{-2}$
0,8	0,80	595	1089	$8{,}5\cdot10^{-3}$
0,9	0,75	580	1090	$6{,}5\cdot10^{-3}$

Заключение. При экспериментальной реализации рассчитанных режимов с целью создания излучающих структур в процессе эпитаксиального наращивания слои легировались теллуром до концентрации $3\cdot10^{17}$ см$^{-3}$. В результате на слоях, выращенных при температуре 1105 К, давлении $P_{GaCl+InCl} = 1{,}1\cdot10^{-2}$ атм и $P_{AsH+PH} = 5\cdot10^{-2}$ атм для $x = 0{,}5$, $y = 0{,}92$, при температуре 1124 К, давлении $P_{GaCl+InCl} = 1{,}1\cdot10^{-2}$ атм и $P_{AsH+PH} = 7{,}5\cdot10^{-2}$ атм для $x = 0{,}68$, $y = 0{,}87$ и при температуре 1138 К, давлении $P_{GaCl+InCl} = 1{,}1\cdot10^{-2}$ атм и $P_{AsH+PH} = 7{,}0\cdot10^{-2}$ атм для $x = 0{,}78$, $y = 0{,}84$, после создания тестовых *p*–*n*-диодов получена яркость 500, 450, 350 кд/м^2/А/см^2 красно-оранжевого, оранжевого и желтого свечения соответственно. Экспериментальные значения хорошо коррелируют с расчетными данными и лежат в довольно узком доверительном интервале. Уровень значений полученных излучательных характеристик отвечает современным требованиям к излучателям оптического диапазона.

Современные разрабатываемые и изготавливаемые квантово-размерные гетероструктуры содержат в себе различные буферные, ограничительные, волноводные слои, квантовые ямы, сверхрешетки и пр. Основная задача при их формировании – получение слоев с минимальной плотностью структурных дефектов, которые являются нежелательными центрами рассеяния носителей заряда и центрами безызлучательной рекомбинации в оптоэлектронных устройствах. Один из способов решения этой задачи – формирование изопериодных элементов гетероструктуры. Предложенный метод независимо от используемой технологии позволяет определить начальные условия при оптимизации условий формирования элементов многокомпонентной гетероструктуры

необходимого состава. Это значительно сокращает объем экспериментальных исследований, что подтверждено экспериментально для гетероструктуры GaInAsP /GaAsP.

Литература

1. Расчет упругонапряженной гетероструктуры $Al_xGa_yIn_{1-x-y}$ As/InP с квантовыми ямами для эффективных лазерных излучателей / ***В.Н. Светогоров, Р.Х. Акчурин, А.А. Мармалюк и др.*** // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 2. С. 46–55. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-2-46-55

2. ***Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С.*** Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 1. С. 4–20. DOI: 10.32362/2500-316X-2016-4-1-4-20

3. ***Андреев В.М, Левин Р.В., Маричев А.Е., Пушный Б.В.*** Способ изготовления гетероструктуры InGaAsP/InP фотопреобразователя // Изобретение. Номер охранного документа 0002660415. Правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Дата охранного документа 06.07.2018.

4. ***Василььев М.Г., Васильев А.М., Вилк Д.М., Шелякин А.А.*** Получение гетероструктур In/InGaAsP/InP методом жидкостной эпитаксии и раздельное приготовление растворов-расплавов // Неорганические материалы. 2007. Т. 43. № 7. С. 775–780.

5. Эпитаксиальный рост, электронные свойства и фотокатодные применения напряженных псевдоморфных слоев InGaAsP/GaAs / ***В.Л. Альперович, Ю.Б. Болховитянов, С.И. Чикичев и др.*** // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1102–1110.

6. ***Никонов А.В., Куляхтина Н.М., Болтарь К.О., Яковлева Н.И.*** Модель показателя преломления эпитаксиальных слоев InP и InGaAsP // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 83–86.

7. Интегрирование InP/InGaAsP-фотодетекторов с волноводными схемами на подложке кремний на изоляторе / ***Г. Роэлкенс, Ю. Брокер, Д. Тейллаэрт и др.*** // Фотоника. 2007. № 6. С. 28–31.

8. Фотоэлектрические преобразователи концентрированного солнечного излучения на основе InGaAsP(1,0 эВ)/InP-гетероструктур / ***Р.В. Левин, А.Е. Маричев, М.З. Шварц и др.*** // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 5. С. 715–719.

9. Основы теории подобия: конспект лекций / ***сост. К.И. Зуев***. Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2011. 51 с.

10. ***Тихонов А.И.*** Основы теории подобия и моделирования (электрические машины): учеб. пособие. Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2011. 132 с.

Поступила в редакцию 20.02.2021 г.; после доработки 20.02.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

Вигдорович Евгений Наумович – доктор технических наук, профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института МИРЭА – Росссийского технологического университета (Россия, 107996, г. Москва, ул. Стромынка, 20), evgvig@mail.ru

References

1. Svetogorov V.N., Akchurin R.H., Marmalyuk A.A., Ladugin M.A., Yarotskaya I.V. Calculation of the elastic-stressed Al*x*Ga*y*In$_{1-x-y}$ As/InP heterostructure with quantum wells for efficient laser emitters. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian Technological Journal*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 46–55. DOI: https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-46-55 (In Russian).

2. Belkin M.E., Kudzh S.A., Sigov A.S. New principles of construction of radio-electronic equipment of the microwave range using radiophoton technology. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian Technological Journal*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 4–20. DOI: https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-1-4-20 (In Russian).

3. Andreev V.M., Levine R.V., Maric A.E., Posny B.V. *Method of manufacturing the InGaAsP/InP photoconverter heterostructure.* Invention. Protection document No. 0002660415. Copyright holders Federal State Budgetary Institution of Science A.F. Ioffe Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences. Date of the protection document 06.07.2018. (In Russian).

4. Vasiliev M.G., Vasiliev A.M., Vilk D.M., Shelyakin A.A. Preparation of In/InGaAsP/InP heterostructures by liquid epitaxy and separate preparation of solutions-melts. *Neorganicheskiye materialy = Inorganic Materials*, 2007, vol. 43, no. 7, pp. 775–780. (In Russian).

5. Alperovich V.L., Bolkhovityanov Yu.B., Chikichev S.I., Paulish A.G., Terekhov A.S., Yaroshevich A.S. Epitaxial growth, electronic properties and photocathode applications of stressed pseudomorphic InGaAsP/GaAs layers. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors,* 2001, vol. 35, iss. 9, pp. 1102–1110. (In Russian).

6. Nikonov A.V., Kulyakhtina N.M., Boltar K.O., Yakovleva N.I. Model of the refractive index of epitaxial layers InP and InGaAsP. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2015, no. 1, pp. 83–86. (In Russian).

7. Roelkens G., Brocker Y., Teillaert D., Dumont P., Bogarts V., Van Toortout D., Baets R., Netzel R., Smith M. Integration of InP / InGaAsP photodetectors with waveguide circuits on a silicon-on-insulator substrate. *Fotonika = Photonics*, 2007, no. 6, pp. 28–31. (In Russian).

8. Levin R.V., Marichev A.E., Shvarts M.Z., Marukhina E.P., Khvostikov V.P., Pushnyy B.V., Mizerov M.N., Andreyev V.M. Photoelectric converters of concentrated solar radiation based on InGaAsP (1.0 eV)/ InP-heterostructures. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors,* 2015, vol. 49, iss. 5, pp. 715–719. (In Russian).

9. *Fundamentals of the theory of similarity: lecture notes.* Comp. K.I. Zuev. Vladimir, Publishing House of the Vladimir State University Publ., 2011. 51 p. (In Russian).

10. Tikhonov A.I. *Fundamentals of the theory of similarity and modeling (electric machines): textbook*. Ivanovo, FGBOU VPO «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin» Publ., 2011. 132 p. (In Russian).

Received 20.02.2021; Revised 20.02.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the author:

Eugeniy N. Vigdorovich – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Optical and Biotechnical Systems and Technologies Department, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (Russia, 107996, Moscow, Stromynka st., 20), evgvig@mail.ru

Замеченные неточности

В журнале «Известия высших учебных заведений. Электроника» том 26, № 2, 2021 г. в списке литературы и в References на стр. 130 ссылка [7] должна выглядеть так:

7. ***Kitaura R., Shinohara H.*** Carbon-nanotube-based hybrid materials: nanopeapods // Chemistry – An Asian Journal. 2006. Vol. 1. No. 5. P. 646–655.

7. Kitaura R., Shinohara H. Carbon-nanotube-based hybrid materials: nanopeapods. *Chemistry – An Asian Journal*, 2006, vol. 1, no. 5, pp. 646–655.

УДК 539.25: 620.187.3 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-214-225

Электронно-микроскопические исследования структуры тонких эпитаксиальных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$, выращенных на подложке Si(111)

***Ю.С. Зайцева*[1], *Н.И. Боргардт*[1], *А.С. Приходько*[1], *E. Zallo*[2], *R. Calarco*[3]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*Мюнхенский технический университет, г. Гархинг, Германия*
[3]*Институт микроэлектроники и микросистем, г. Рим, Италия*

julia3ybina@gmail.com

Для создания элементов памяти нового поколения представляют интерес эпитаксиальные слои $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) с высоким кристаллическим совершенством, а также многослойные кристаллические структуры на основе сверхрешеток $GeTe/Sb_2Te_3$, выращенные на кремниевых подложках. Это инициирует изучение закономерностей формирования подобных материалов, в том числе с применением метода молекулярно-пучковой эпитаксии. В работе исследована структура тонкого эпитаксиального слоя (толщиной 13 нм) GST, используемого для создания ячеек памяти на основе изменения фазового состояния вещества. Слои выращены на пассивированной сурьмой подложке Si(111) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Исследования проведены методами просвечивающей электронной микроскопии и электронографического анализа с применением образцов поперечного и планарного сечений. Получены высокоразрешающие изображения образцов поперечного сечения, а также дифракционные картины от тонкой фольги планарного сечения и ее светлопольные микрофотографии. Выявлено, что слой состоит из кристаллически совершенных зерен в основном гексагональной фазы, а в некоторых локальных областях – из упорядоченной кубической фазы GST, базисные плоскости которой параллельны поверхности подложки. На основе количественного анализа муарового узора, возникающего на светлопольных электронно-микроскопических изображениях, установлено, что зерна, для которых плоскости GST$(11\bar{2}0)$ и Si(220) развернуты относительно друг друга вокруг направления роста в пределах 2°, занимают около 60 % площади поверхности эпитаксиального слоя, 26 % приходится на практически неразвернутые зерна. Доля площади зерен, разориентированных относительно подложки на углы от 2 до 8º, близка к 33 %, а на угол более 8º развернуты зерна, занимающие около 7 % площади слоя. Средний угол разворота равен примерно 2,6°. Средний оценочный размер неразвернутых зерен составляет около 150 нм и уменьшается по мере роста угла разворота относительно подложки. Выявленные закономерности зернистой структуры эпитаксиального слоя GST свидетельствуют об ориентирующем влиянии подложки Si(111) на его формирование.

Ключевые слова: фазовая память; система Ge-Sb-Te; эпитаксиальный слой; подложка Si(111); просвечивающая электронная микроскопия; электронографический анализ

© Ю.С. Зайцева, Н.И. Боргардт, А.С. Приходько, E. Zallo, R. Calarco, 2021

Для цитирования: Электронно-микроскопические исследования структуры тонкого эпитаксиального слоя $Ge_2Sb_2Te_5$, выращенного на подложке Si(111) / Ю.С. Зайцева, Н.И. Боргардт, А.С. Приходько и др. // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 214–225. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-214-225

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема AAAA-A20-120071490069-9, соглашение № 075-03-2020-216, код 0719-2020-0018) с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов».

Electron Microscopy Studies of the Structure of Thin Epitaxial $Ge_2Sb_2Te_5$ Layers Grown on Si(111) Substrate

Yu.S. Zaytseva[1], N.I. Borgardt[1], A.S. Prikhodko[1], E. Zallo[2], R. Calarco[3]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]Technische Universität München, Garching, Germany
[3]CNR Institute for Microelectronics and Microsystems, Roma, Italy

julia3ybina@gmail.com

Abstract: To create memory cells of new generation, epitaxial layers of $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) material, with high crystalline perfection, and multilayered crystalline structures based on GeTe/Sb_2Te_3 superlattices grown on Si-wafers are of interest. This initiates the study of these and alike materials generation patterns, including with the involvement of molecular beam epitaxy. In this work, the structure of 13 nm thick layers of GST material, used to create phase-change memory cells was studied. These layers were grown on an Sb-passivated Si(111) substrate by molecular beam epitaxy. Research studies were carried out by transmission electron microscopy and electron diffraction analysis. Using high-resolution images of cross-sectional samples and diffraction patterns from planar thin foils, it was revealed that the layer consists of crystalline grains, mostly hexagonal, and in some local regions of the vacancy ordered cubic GST phase with the GST(0001) and GST(111) planes parallel to the Si(111). Based on an analysis of the moiré pattern appearing in bright-field electron microscopy images, it was found that the misorientation of the grains of the epitaxial layer around the Si(111) direction varies from 0 to 13.5º, and nearly 26 % of the surface area is almost non-rotated grains. Grains rotates within the angles from 0.2 to 2º occupy about 34 % of the layer surface area, from 2 to 8º occupy about 33 %, and the fraction of the area of grains rotated by more than 8º is close to 7 %. It has been found that as the rotation angle of the GST grains relative to the substrate increased, their average lateral size decreased from about 150 nm for non-rotated grains to 80 nm for grains rotated at an angle of more than 8º, and the average value of the rotation angle was approximately 2.6º. The data obtained on the grain structure of the epitaxial layer indicate that the relaxation of the misfit stresses of the crystal lattices of silicon and the GST material is provided both by the rotation of grains and, apparently, by the formation of misfit dislocations.

Keywords: phase change memory; Ge-Sb-Te system; epitaxial layer; Si(111) substrate; transmission electron microscopy; electron diffraction analysis

For citation: Zaytseva Yu.S, Borgardt N.I., Prikhodko A.S., Zallo E., Calarco R. Electron microscopy studies of the structure of thin epitaxial $Ge_2Sb_2Te_5$ layer grown on Si(111) substrate. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 214–225. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-214-225

Funding: this study has been carried out with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject AAAA-A20-120071490069-9, agreement no. 075-03-2020-216, code 0719-2020-0018) and using equipment of the resource sharing center «Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects».

Введение. Полупроводники на основе системы Ge-Sb-Te (GST) относятся к числу технологически важных материалов и широко применяются в устройствах энергонезависимой памяти. В таких устройствах для хранения информации используются переходы GST из аморфного в кристаллическое состояние и обратно, инициируемые лазерными или электрическими импульсами [1]. Для создания элементов памяти нового поколения представляют интерес эпитаксиальные слои GST с высоким кристаллическим совершенством, а также многослойные кристаллические структуры на основе сверхрешеток $GeTe/Sb_2Te_3$, выращенные на кремниевых подложках [2–4]. Их энергоэффективность обусловлена отсутствием плавления при работе устройств памяти, поскольку механизм переключения связан с перемещением атомов в кристаллических фазах материала [5].

Для уменьшения влияния подложки кремния на формирование пленок халькогенидных материалов и реализации ван-дер-ваальсового эпитаксиального роста эффективным является использование реконструированной поверхности, пассивированной сурьмой Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)*R*30°-Sb [6]. Слои GeTe и Sb_2Te_3, выращенные на этой подложке, имеют углы разориентации зерен растущей кристаллической фазы существенно меньшие, чем при ее выращивании на Si(111)-(7×7) или на пассивированной водородом поверхности Si(111)-H [7–9]. Согласно [4] такое уменьшение углов разориентации зерен является следствием образования ван-дер-ваальсовой щели между пассивированной сурьмой подложкой кремния и выращенным слоем, в результате чего возникает возможность формировать слои GST с более совершенной кристаллической структурой.

Для исследования выращенных различными методами кристаллических слоев GST используются методы рентгеноструктурного анализа [9–12], атомно-силовой микроскопии [8, 10, 13], рамановской спектроскопии [12, 14, 15] и дифракции быстрых электронов на отражение [8, 13, 16]. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) характеризуется высокой информативностью и разрешающей способностью и позволяет определять кристаллографические ориентации слоев, изучать локальные особенности структуры этих материалов на атомарном уровне, выявлять закономерности фазообразования [2, 4, 7, 17, 18].

В настоящей работе структурные особенности тонкого слоя $Ge_2Sb_2Te_5$, выращенного с применением молекулярно-пучковой эпитаксии на атомарно гладкой подложке Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)*R*30°-Sb, выявлялись с применением методов ПЭМ. Высокоразрешающая электронная микроскопия (ВРЭМ) использовалась для исследования образцов поперечного сечения, методы электронографического анализа и светлопольной микроскопии применялись для изучения тонкой фольги планарного сечения.

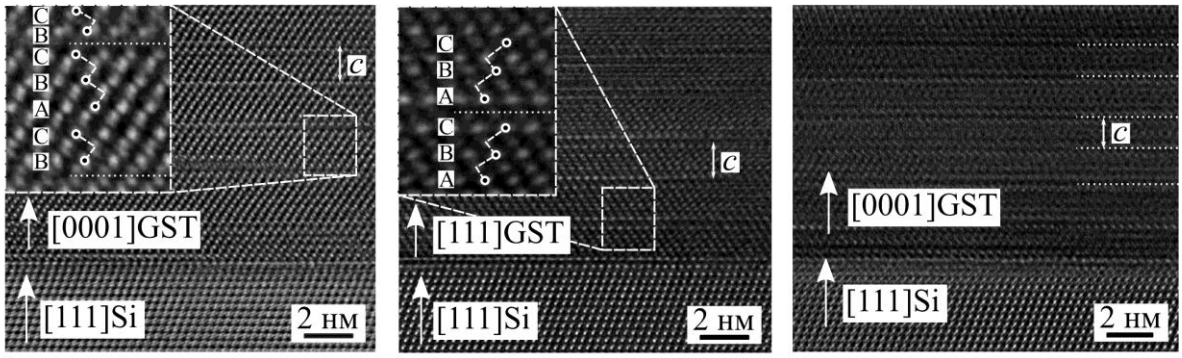
Формирование тонких пленок и методы исследования. Рост слоя GST225 толщиной 13 нм проводили методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием отдельных эффузионных ячеек для Ge, Sb и Te при температуре подложки 250 ºС [16]. Предварительно атомарно-гладкую подложку Si(111) очищали от органических загрязнений [19] и отжигали для формирования реконструированной поверхности Si(111)-(7×7). Затем осуществляли пассивацию поверхности подложки сурьмой [20] для ее реконструкции: Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)*R*30º-Sb [9, 16]. Электронно-микроскопические образцы планарного и поперечного сечений параллельно плоскостям Si(111) и Si$\left(1\bar{1}0\right)$ приготавливали в электронно-ионном микроскопе Helios NanoLab 650 методом In-Situ Lift-Out [21].

Как правило, для защиты образца на его поверхность осаждают углеродный слой с частицами платины, образующийся при разложении металлоорганического соединения $C_9H_{10}Pt$ под воздействием ионного пучка. Однако такой подход для приготовления фольги планарного сечения затрудняет исследования тонких эпитаксиальных слоев методами ПЭМ, поскольку частицы платины на их поверхности вносят артефакты в получаемые изображения, а также усложняют финальное утонение электронно-микроскопического образца. Поэтому на слой GST предварительно наносили защитную пленку из эпоксидного клея толщиной около 1 мкм. Ее наличие на поверхности эпитаксиального слоя позволяет прецизионно контролировать процесс финального утонения образца благодаря характерному для нее темному контрасту, который возникает на изображениях во вторичных электронах, полученных методом растровой электронной микроскопии. Из-за низкого атомного номера и аморфного состояния тонкий углеродный слой защитной пленки, оставшийся на поверхности образца после его приготовления, почти прозрачен для высокоэнергетических электронов пучка и практически не влияет на формирование изображений, полученных методами ПЭМ.

Электронно-микроскопические исследования проводили при ускоряющем напряжении 200 кВ на приборе Titan Themis 200, оснащенном корректором сферической аберрации объективной линзы. Для определения состава эпитаксиального слоя в выбранной локальной области образца использовали встроенный энергодисперсионный спектрометр Super-X.

Структура эпитаксиального слоя в поперечном сечении. Эпитаксиальный слой имеет кристаллическую структуру (рис.1). Для него характерна гексагональная фаза GST [22], которая растет в направлении GST[0001] с упорядочением атомных слоев ABCBC в блоках, разделенных так называемыми ван-дер-ваальсовыми щелями (см. вставку на рис.1,*а*). В локальных областях эпитаксиального слоя выявляется упорядоченная кубическая фаза GST [18], в которой блоки разделяются «вакансионными» плоскостями при упорядочении атомных слоев ABCABC (рис.1,*б*). Расстояние между двумя соседними ван-дер-ваальсовыми щелями или вакансионными плоскостями, определяющее параметр *c* соединения GST, для большей части блоков равно 1,7 нм, что соответствует $Ge_2Sb_2Te_5$. Результаты энергодисперсионного рентгеновского микроанализа подтверждают соответствие среднего химического состава эпитаксиальных слоев стехиометрии $Ge_2Sb_2Te_5$.

Микрофотографии на рис.1,*б*,*в* свидетельствуют о развороте локальных областей эпитаксиального слоя относительно подложки на небольшие углы, поскольку при высокосимметричной ориентации подложки Si$(1\bar{1}0)$ относительно падающего электронного пучка изображение слоя на них несколько размыто, а атомные колонки визуализируются хуже, чем на рис.1,*а*.



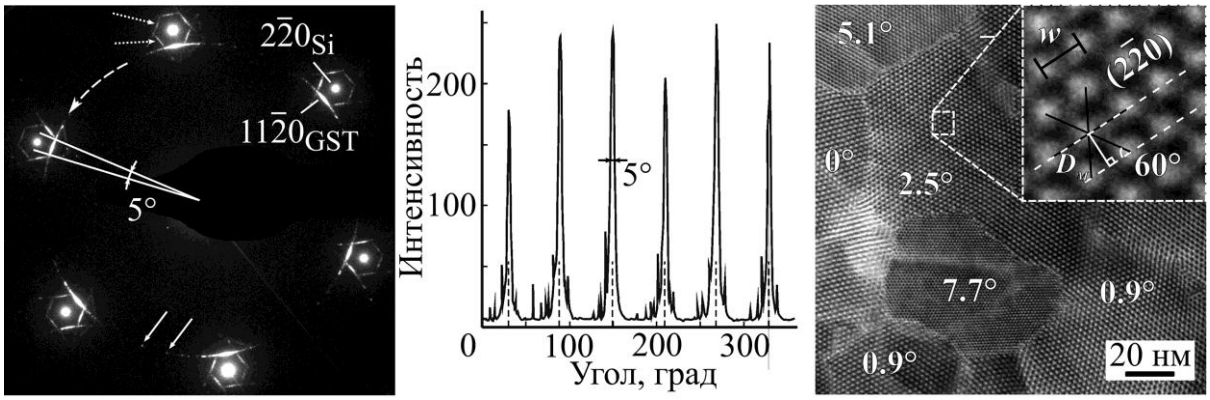
а *б* *в*

Рис.1. ВРЭМ-изображения ориентированного вдоль направления Si[$1\bar{1}0$] образца поперечного сечения: *а, б* – соответственно области кристаллического слоя GST в гексагональной и упорядоченной кубической фазах; *в* – участок слоя, развернутый относительно подложки на небольшой угол (– – – щели Ван-дер-Ваальса, на вставках – увеличенные фрагменты слоя GST)

Fig.1. HRTEM images of the cross-section oriented along the Si[$1\bar{1}0$] direction: *a, b* – regions of the GST crystalline layer in the hexagonal and vacancy ordered cubic phases, respectively; *c* – an area of the layer rotated at a small angle relative to the substrate. The dotted lines mark the Van der Waals gaps, the insets in (*a*) and (*b*) show enlarged fragments illustrating the atomic stacking

Электронно-микроскопические исследования планарных образцов. Изучение разориентации локальных областей эпитаксиального слоя GST относительно подложки и его структуры проводили с использованием тонкой фольги планарного сечения. Расположение точечных рефлексов от кремниевой подложки и отражений от GST в виде тяжей на дифракционной картине свидетельствует о том, что плоскости Si$\left(2\bar{2}0\right)$ и GST$\left(11\bar{2}0\right)$ гексагональной или GST$\left(2\bar{2}0\right)$ кубической фаз слоя с межплоскостными расстояниями $d_{\mathrm{Si}(2\bar{2}0)} = 0{,}192$ нм и $d_{\mathrm{GST}(11\bar{2}0)} = d_{\mathrm{GST}(\bar{2}20)} = 0{,}212$ нм [7] развернуты относительно друг друга на небольшой угол вокруг направления Si[111] (рис.2,*а*). Пунктирными стрелками на дифракционной картине показаны отражения, являющиеся результатом двойной дифракции и обусловленные рассеянием падающих электронов сначала на плоскостях $\left(2\bar{2}0\right)$ расположенного сверху кремния, а затем повторной дифракции на плоскостях $\left(11\bar{2}0\right)$ материала GST.

На светлопольной микрофотографии (рис.2,*в*) визуализируется муаровый узор, возникающий в результате рассеяния падающего электронного пучка на плоскостях Si $\left(2\bar{2}0\right)$ и GST$\left(11\bar{2}0\right)$. Данная микрофотография получена с применением объективной апертуры с угловым размером примерно 0,25°, которая пропускает только центральный пучок и расположенные вблизи него отражения вторичного рассеяния на GST дифрагированного пучка, возникшего после прохождения падающих электронов через кристаллический кремний. Вид муарового узора, изменение его ориентации и периода при переходе из одних областей микрофотографии в другие указывают на то, что слой GST состоит из отдельных зерен разного размера, развернутых на разные углы вокруг направления Si[111].



а *б* *в*

Рис.2. Дифракционная картина от образца планарного сечения с рефлексами типа 220 кремния и тяжами отражений от слоя GST (*а*), профиль распределения интенсивности вдоль окружности (отмечен штриховой линией со стрелкой на рис.2,*а*), проходящей через центры отражений (*б*), светлопольная микрофотография отдельных зерен слоя GST со смешанным муаровым узором (*в*). На вставке – увеличенный фрагмент геометрического построения для расчета периода муара D_m по расстояниям между максимумами интенсивности. Для отдельных зерен приведены углы разворота

Fig.2. Diffraction pattern from a planar TEM specimen with the marked reflections of 220_{Si} and cords from GST layer (*a*), intensity distribution along a circle (marked by a dashed line with an arrow in fig.2,*a*), passing through the centers of reflections (*b*), bright-field micrograph of individual grains of the GST layer with a mixed moiré pattern (*c*). The inset shows an enlarged fragment of the geometric construction for calculating the moiré period D_m from the distances between the intensity maxima. The angles of rotation are marked for individual grains

Анализ среднего разворота зерен GST относительно подложки проводили с использованием дифракционных картин. При этом применяли компьютерную программу, реализованную в пакете Matlab и позволяющую определять угловую ширину тяжей на дифракционной картине. Для этого прецизионно измеряли радиус R_{GST} окружности, на которой располагаются тяжи от зерен GST. Предварительно находили центр дифракционной картины как точку пересечения прямых линий, проходящих через центры противоположно расположенных рефлексов от кремния. С этой точкой совмещали центр круга радиусом R_0, заведомо большим R_{GST}, и для значений r на отрезке $[0, R_0]$ строили усредненное по углам от 0 до 360º одномерное распределение интенсивности на дифракционной картине. Затем на графике зависимости $I(r)$ определяли точку максимума, соответствовавшую R_{GST}, и строили одномерный профиль распределения интенсивности вдоль окружности радиусом R_{GST} (рис.2,*б*). Штриховыми линиями на рисунке отмечены рефлексы типа 220 от кремния, расположенные на углах $30° + 60°\cdot n$, где n – целое. Ширина тяжей от зерен на полувысоте составляет примерно 5°. Таким образом, средний угол разворота GST относительно подложки лежит в пределах 2,5°. Зерна, развернутые на большие углы, также вносят вклад в дифракционную картину, формируя отражения, на некоторые из которых указывают стрелки на рис.2,*а*.

Разворот отдельных зерен GST относительно подложки определяли с использованием серии светлопольных микрофотографий и разработанной компьютерной программы в пакете Matlab. Алгоритм программы основан на выявлении на микрофотографиях областей, в пределах которых муаровый узор остается неизменным, и вычислении локальных значений периода муарового узора D_m. На микрофотографиях с помощью программного пакета STEM CELL [23, 24] определяли позиции максимумов интенсивности муарового узора. Затем определяли расстояния между максимумами в пикселях, значения которых переводили в нанометры с использованием масштабного множителя, откалиброванного по межплоскостным расстояниям в кремниевой подлож-

ке с известным параметром решетки. Полученные данные представляли в виде графа, вершины которого соответствуют точкам максимумов интенсивности, а ребра – расстояниям между ними с весом, равным их длине.

Представление светлопольных изображений в виде графа и применение программного пакета Matlab позволили использовать алгоритм «поиска в ширину» (breadth-first search) для выявления в автоматическом режиме всех точек, принадлежащих отдельному зерну. Сначала выбирали произвольную точку максимума в *j*-м зерне, после чего определяли позиции шести ее ближайших соседей в соответствии с шестиугольной симметрией муарового узора. Усредненное расстояние между исходной точкой и ее соседями принимали за реперное значение $\langle w_{rj} \rangle$ для данного зерна. Затем для выявления всех точек, относящихся к *j*-му зерну, последовательно осуществляли поиск ближайших соседей к найденным на предыдущем этапе максимумам интенсивности. Максимум считался принадлежащим *j*-му зерну, если он был удален от ближайших соседей на расстояние, лежащее в интервале $\left(\langle w_{rj} \rangle - 0{,}1\langle w_{rj} \rangle, \langle w_{rj} \rangle + 0{,}1\langle w_{rj} \rangle\right)$. Такой подход позволил выявить все максимумы, относящиеся к зерну, и оценить площадь его сечения. Полученные значения w_j усредняли и использовали для вычисления периода муарового узора по формуле $D_m = \langle w_j \rangle \sin 60°$, которая следует из геометрического построения (см. вставку на рис.2,*в*).

Найденные периоды D_m позволили рассчитать углы разворота θ отдельных зерен GST относительно подложки по формуле для смешанного муарового узора [25]:

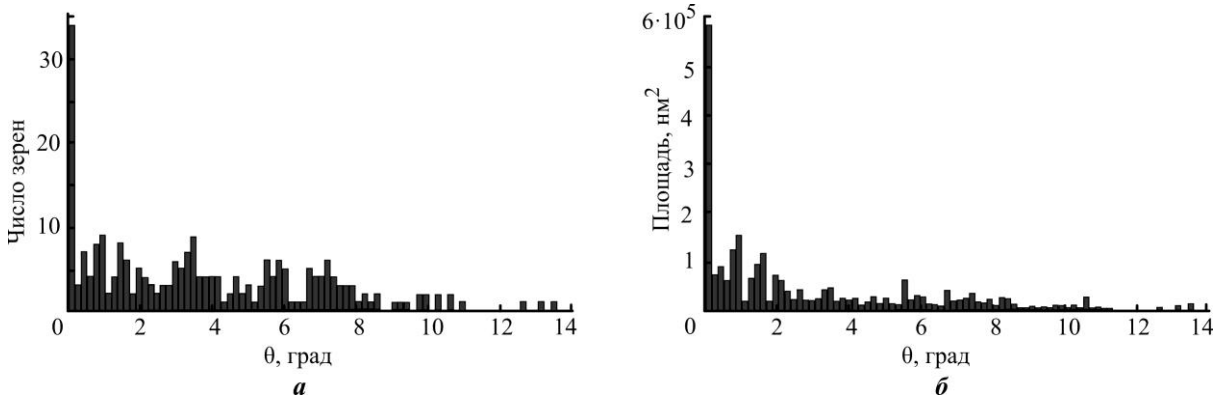
$$D_m = d_{\mathrm{Si}(2\bar{2}0)} d_{\mathrm{GST}(11\bar{2}0)} / \sqrt{d^2_{\mathrm{Si}(2\bar{2}0)} + d^2_{\mathrm{GST}(11\bar{2}0)} - 2 d_{\mathrm{Si}(2\bar{2}0)} d_{\mathrm{GST}(11\bar{2}0)} \cos\theta}\,.$$

Отметим, что, поскольку межплоскостные расстояния $d_{\mathrm{GST}(11\bar{2}0)}$ и $d_{\mathrm{GST}(2\bar{2}0)}$ для фаз с гексагональной и кубической кристаллическими решетками являются одинаковыми, фазовые состояния GST не оказывают влияния на период муарового узора.

Значения θ_i получены примерно для 250 зерен, расположенных на площади около 2,2 мкм^2. Они использовались для построения гистограмм распределения количества зерен GST и их площадей по углам разворота с шагом разбиения 0,2° (рис.3). Из рис.3,*а* видно, что разориентация зерен эпитаксиального слоя варьируется от 0 до 13,5°, причем около 14 % от общего числа зерен можно считать неразвернутыми, поскольку их углы разворота лежат в интервале 0–0,2°. В пределах углов от 0,2 до 2° развернуты 24 % зерен, от 2 до 8° – 53,5 %, а доля зерен, развернутых более чем на 8°, равна 8,7 %.

Гистограмма на рис.3,*б* учитывает площадь поверхности зерен. Из нее следует, что неразвернутые зерна занимают 26 % площади поверхности слоя, на зерна с разворотом в пределах от 0,2 до 2° приходится 34 % площади. Доля площади зерен, развернутых от 2 до 8º близка к 33 %, а на угол более 8º развернуты зерна, занимающие около 7 % площади слоя. Средний угол разворота зерен, вычисленный на основе данных гистограммы на рис.3,*б*, составил 2,6°, что согласуется со значением, полученным на основе анализа дифракционной картины.

Отметим, что результаты анализа дифракционных картин, светлопольных микрофотографий планарных образцов и исследований методом ВРЭМ поперечных сечений эпитаксиального слоя согласуются друг с другом. В частности, области слоя GST, развернутые вокруг направления Si[111] (см. рис.1,*в*), на высокоразрешающих микрофотографиях выявляются значительно чаще, чем участки, на которых подложка и эпитаксиальный слой находятся в высокосимметричной ориентации (см. рис.1,*а*).



а ***б***

Рис.3. Гистограммы распределения числа зерен эпитаксиального слоя GST (*а*) и площади их сечения (*б*) по углам разворота зерен относительно подложки

Fig.3. Histograms of the distribution of the number of GST grains of the GST epitaxial layer (*a*) and their cross-sectional area (*b*) at the angles of rotation of these grains relative to the substrate

На основе данных гистограмм (см. рис.3,*а*,*б*) вычислены средние площади неразвернутых зерен $\langle S_0 \rangle$, а также зерен $\langle S_1 \rangle$, развернутых на углы в пределах от 0,2 до 2°, $\langle S_2 \rangle$ – от 2 до 8º и $\langle S_3 \rangle$ – на угол более 8º. На основе найденных $\langle S_j \rangle$ получены оценочные средние латеральные размеры зерен при их аппроксимации кругами с диаметрами $\langle d_j \rangle \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\langle S_j \rangle}$, которые равны: $\langle d_0 \rangle = 149$ нм, $\langle d_1 \rangle = 132$ нм, $\langle d_2 \rangle = 86$ нм, $\langle d_3 \rangle = 79$ нм.

Полученные данные о зернистой структуре и ориентации зерен в эпитаксиальном слое GST указывают на ориентирующее влияние трансляционной симметрии подложки на формирование слоя. При этом небольшой средний угол разворота зерен вокруг направления Si[111] качественно соответствует значениям, полученным в процессе анализа методом рентгеновской дифракции слоев GeTe [8] и Sb_2Te_3 [9], выращенных на подложке Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)*R*30°-Sb. Поскольку зерна, повернутые относительно подложки на углы более 0,2°, занимают около 74 % площади поверхности, то снятие напряжения несоответствия решеток кремния и материала GST в основном происходит вследствие разворота зерен выращенного эпитаксиального слоя. При этом средняя площадь зерен и, соответственно, их средний размер уменьшаются по мере роста угла разворота. Вместе с тем для зерен, практически не развернутых относительно подложки и занимающих 26 % площади, различие в межплоскостных расстояниях $d_{\mathrm{Si}(220)}$ и $d_{\mathrm{GST}(11\bar{2}0)} = d_{\mathrm{GST}(220)}$ должно приводить к образованию дислокаций несоответствия, для выявления которых требуются дальнейшие исследования.

Заключение. В результате электронно-микроскопических исследований образцов поперечного и планарного сечения выяснено, что тонкий слой $Ge_2Sb_2Te_5$, выращенный методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке Si(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)*R*30º-Sb, состоит из кристаллически совершенных зерен в основном гексагональной, а также упорядоченной кубической фаз материала GST. Плоскости GST($11\bar{2}0$) гексагональной или GST$\left(2\bar{2}0\right)$ кубической фаз этих зерен развернуты относительно плоскостей Si$\left(2\bar{2}0\right)$ вокруг направления Si[111] на небольшой угол, среднее значение которого ≈ 2,6°. При

этом практически не развернутые зерна имеют максимальный средний размер, равный 149 нм, и занимают 26 % площади поверхности слоя, а доля площади зерен, развернутых более чем на 8° со средним размером 79 нм, составляет 7 %.

Наличие в эпитаксиальном слое разориентированных и практически не развернутых зерен свидетельствует о том, что релаксация напряжений, обусловленных различиями параметров кристаллических решеток кремния и материала GST, может происходить как в результате разворота зерен относительно подложки, так и, по-видимому, из-за образования дислокаций несоответствия.

Литература

1. ***Redaelli A***. Phase change memory: Device physics, reliability and applications. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. XVIII, 330 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69053-7

2. ***Lotnyk A., Behrens M., Rauschenbach B.*** Phase change thin films for non-volatile memory applications // Nanoscale Advances. 2019. Vol. 1. No. 10. P. 3836–3857. DOI: https://doi.org/10.1039/C9NA00366E

3. Interfacial phase-change memory / ***R.E. Simpson, P. Fons, A.V. Kolobov et al.*** // Nature Nanotechnology. 2011. Vol. 6. No. 8. P. 501–505. DOI: https://doi.org/10.1038/nnano.2011.96

4. ***Boschker J.E., Calarco R.*** Growth of crystalline phase change materials by physical deposition methods // Advances in Physics: X. 2017. Vol. 2. No. 3. P. 675–694. DOI: https://doi.org/10.1080/23746149.2017.1346483

5. *In situ* observations of the reversible vacancy ordering process in Van der Waals-bonded Ge-Sb-Te thin films and GeTe-Sb_2Te_3 superlattices / ***A. Lotnyk, T. Dankwort, I. Hilmi et al.*** // Nanoscale. 2019. Vol. 11. P. 10838–10845. DOI: https://doi.org/10.1039/C9NR02112D

6. ***Elswijk H.B., Dijkkamp D., van Loenen E.J.*** Geometric and electronic structure of Sb on Si(111) by scanning tunneling microscopy // Physical Review B. 1991. Vol. 44. Issue 8. P. 3802–3809. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.3802

7. Tailoring the epitaxy of Sb_2Te_3 and GeTe thin films using surface passivation / ***J. Momand, J.E. Boschker, R. Wang et al.*** // CrystEngComm. 2018. Vol. 20. Iss. 3. P. 340–347. DOI: https://doi.org/10.1039/C7CE01825H

8. Toward truly single crystalline GeTe films: the relevance of the substrate surface / ***R. Wang, J.E. Boschker, E. Bruyer et al.*** // Journal of Physical Chemistry C. 2014. Vol. 118. No. 51. P. 29724–29730. DOI: https://doi.org/10.1021/jp507183f

9. Surface reconstruction-induced coincidence lattice formation between two-dimensionally bonded materials and a three-dimensionally bonded substrate / ***J.E. Boschker, J. Momand, V. Bragaglia et al.*** // Nano Letters. 2014. Vol. 14. No. 6. P. 3534–3538. DOI: https://doi.org/10.1021/nl5011492

10. Epitaxial $Ge_2Sb_2Te_5$ films on Si(111) prepared by pulsed laser deposition / ***I. Hilmi, E. Thelnader, P. Schumacher et al.*** // Thin Solid Films. 2016. Vol. 619. P. 81–85. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.10.028

11. ***Nakaoka T., Satoh H., Honjo S., Takeuchi H.*** First-sharp diffraction peaks in amorphous GeTe and Ge2Sb2Te5 films prepared by vacuum-thermal deposition // AIP Advances. 2012. Vol. 2. P. 042189. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4773329

12. Pulsed laser deposited GeTe-rich GeTe-Sb2Te3 thin films / ***M. Bouška, S. Pechev, Q. Simon et al.*** // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. No. 1. P. 26552. DOI: https://doi.org/10.1038/srep26552

13. Author correction: Modulation of Van der Waals and classical epitaxy induced by strain at the Si step edges in GeSbTe alloys / ***E. Zallo, S. Cecchi, J.E. Boschker et al.*** // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 1–2.

14. Research update: Van-der-Waals epitaxy of layered chalcogenide Sb_2Te_3 thin films grown by pulsed laser deposition / ***I. Hilmi, A. Lotnyk, J.W. Gerlach et al.*** // APL Materials. 2017. Vol. 5. Iss. 5. P. 050701. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4983403

15. ***Sosso G.C., Caravati S., Mazzarello R., Bernasconi M.*** Raman spectra of cubic and amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ from first principle // Physical Review B. 2011. Vol. 83. Iss. 13. P. 134201. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.134201

16. Evolution of low-frequency vibrational modes in ultrathin GeSbTe films / ***E. Zallo, D. Dragoni, Y. Zaytseva et al.*** // Physica Status Solidi (RRL). 2021. Vol. 15. Iss. 3. P. 2000434. DOI: https://doi.org/10.1002/pssr.202170014

17. Epitaxial formation of cubic and trigonal Ge-Sb-Te thin films with heterogeneous vacancy structures / ***I. Hilmi, A. Lotnyk, J.W. Gerlach et al.*** // Materials and Design. 2017. Vol. 115. P. 138–146. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.003

18. Surface energy driven cubic-to-hexagonal grain growth of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin film / ***Y. Zheng, Y. Cheng, R. Huang et al.*** // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. No. 1. P. 5915. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-017-06426-2

19. Robust topological surface states in Sb_2Te_3 layers as seen from the weak antilocalization effect / ***Y. Takagaki, A. Giussani, K. Perumal et al.*** // Physical Review B. 2012. Vol. 86. No. 12. P. 125137. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.125137

20. ***Andrieu S.*** Sb adsorption on Si<111> analyzed by ellipsometry and reflection high-energy electron diffraction: Consequences for Sb doping in Si molecular-beam epitaxy // Journal of Applied Physics. 1991. Vol. 69. No. 3. P. 1366–1370. DOI: https://doi.org/10.1063/1.347274

21. ***Mayer J., Giannuzzi L.A., Kamino T., Michael J.*** TEM sample preparation and FIB-induced damage // MRS Bulletin. 2007. Vol. 32. Iss. 5. P. 400–407. DOI: https://doi.org/10.1557/mrs2007.63

22. Role of vacancies in metal–insulator transitions of crystalline phase-change materials / ***W. Zhang, A. Thiess, P. Zalden et al.*** // Nature Materials. 2012. Vol. 11. P. 952–956. DOI: https://doi.org/10.1038/nmat3456

23. STEM_CELL // (Quantum) e-Optics and TEM GROUP: [Web] / CNRNANO. URL: http://tem-s3.nano.cnr.it/?page_id=2 (accessed: 08.04.2020).

24. ***Grillo V., Rotunno E.*** STEM_CELL: A software tool for electron microscopy: Part 1: Simulations // Ultramicroscopy. 2013. Vol. 125. P. 97–111. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2012.10.016

25. ***Williams D.B., Carter C.B.*** Transmission electron microscopy. A textbook for materials science. New York: Springer US, 2009. LXII, 775 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-76501-3

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.; после доработки 29.03.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

Зайцева Юлия Сергеевна – аспирант Института физики и прикладной математики, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронно-микроскопических исследований Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), julia3ybina@gmail.com

Боргардт Николай Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института физики и прикладной математики, начальник научно-исследовательской лаборатории электронно-микроскопических исследований Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), borgardt@miee.ru.

Приходько Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент Института физики и прикладной математики, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронно-микроскопических исследований Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), sashaprixodko@gmail.com

Zallo Eugenio – Dr., руководитель группы, физический факультет, Институт Вальтера Шоттки Мюнхенского технического университета (Am Coulombwall 4, 85748 Гархинг, Германия), eugenio.zallo@wsi.tum.de

Calarco Raffaella – Dr., директор по исследованиям, Институт микроэлектроники и микросистем (Via del Fosso del Cavaliene 100, 00133, Рим, Италия), raffaella.calarco@cnr.it

References

1. Redaelli A. *Phase Change Memory: Device Physics, Reliability and Applications.* Cham, Springer International Publishing AG, 2018. xviii, 330 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69053-7

2. Lotnyk A., Behrens M., Rauschenbach B. Phase change thin films for non-volatile memory applications. *Nanoscale Advances*, 2019, vol. 1, no. 10, pp. 3836–3857. DOI: https://doi.org/10.1039/C9NA00366E

3. Simpson R.E., Fons P., Kolobov A.V., Fukaya T., Krbal M., Yagi T., Tominaga J. Interfacial phase-change memory. *Nature Nanotechnology*, 2011, vol. 6, no. 8, pp. 501–505. DOI: https://doi.org/10.1038/nnano.2011.96

4. Boschker J.E., Calarco R. Growth of crystalline phase change materials by physical deposition methods. *Advances in Physics: X*, 2017, vol. 2, no. 3, pp. 675–694. DOI: https://doi.org/10.1080/23746149.2017.1346483

5. Lotnyk A., Dankwort T., Hilmi I., Kienle L., Rauschenbach B. *In situ* observations of the reversible vacancy ordering process in van der Waals-bonded Ge-Sb-Te thin films and GeTe-Sb_2Te_3 superlattices. *Nanoscale*, 2019, vol. 11, pp. 10838–10845. DOI: https://doi.org/10.1039/C9NR02112D

6. Elswijk H.B., Dijkkamp D., van Loenen E.J. Geometric and electronic structure of Sb on Si(111) by scanning tunneling microscopy. *Physical Review B*, 1991, vol. 44, issue 8, pp. 3802–3809. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.3802

7. Momand J., Boschker J.E., Wang R., Calarco R., Kooi B.J. Tailoring the epitaxy of Sb_2Te_3 and GeTe thin films using surface passivation. *CrystEngComm*, 2018, vol. 20, issue 3, pp. 340–347. DOI: https://doi.org/10.1039/C7CE01825H

8. Wang R., Boschker J.E., Bruyer E., Di Sante D., Picozzi S., Perumal K., Giussani A., Riechert H., Calarco R. Toward truly single crystalline GeTe films: the relevance of the substrate surface. *Journal of Physical Chemistry C*, 2014, vol. 118, no. 51, pp. 29724–29730. DOI: https://doi.org/10.1021/jp507183f

9. Boschker J.E., Momand J., Bragaglia V., Wang R., Perumal K., Giussani A., Kooi B.J., Riechert H., Calarco R. Surface reconstruction-induced coincidence lattice formation between two-dimensionally bonded materials and a three-dimensionally bonded substrate. *Nano Letters*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 3534–3538. DOI: https://doi.org/10.1021/nl5011492

10. Hilmi I., Thelnader E., Schumacher P., Gerlach J.W., Rauschenbach B. Epitaxial $Ge_2Sb_2Te_5$ films on Si(111) prepared by pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*, 2016, vol. 619, pp. 81–85. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.10.028

11. Nakaoka T., Satoh H., Honjo S., Takeuchi H. First-sharp diffraction peaks in amorphous GeTe and Ge2Sb2Te5 films prepared by vacuum-thermal deposition. *AIP Advances*, 2012, vol. 2, p. 042189. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4773329

12. Bouška M., Pechev S., Simon Q., Boidin R., Nazabal V., Gutwirth J., Baudet E., Němec P. Pulsed laser deposited GeTe-rich GeTe-Sb2Te3 thin films. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no. 1, p. 26552. DOI: https://doi.org/10.1038/srep26552

13. Zallo E., Cecchi S., Boschker J.E., Mio A.M., Arciprete F., Privitera S., Calarco R. Author correction: Modulation of Van der Waals and classical epitaxy induced by strain at the Si step edges in GeSbTe alloys. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–2.

14. Hilmi I., Lotnyk A., Gerlach J.W., Schumacher P., Rauschenbach B. Research update: Van-der-Waals epitaxy of layered chalcogenide Sb_2Te_3 thin films grown by pulsed laser deposition. *APL Materials*, 2017, vol. 5, issue 5, p. 050701. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4983403

15. Sosso G.C., Caravati S., Mazzarello R., Bernasconi M. Raman spectra of cubic and amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ from first principle. *Physical Review B*, 2011, vol. 83, iss. 13, p. 134201. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.134201

16. Zallo E., Dragoni D., Zaytseva Y., Cecchi S., Borgardt N.I., Bernasconi M., Calarco R. Evolution of low-frequency vibrational modes in ultrathin GeSbTe films. *Physica Status Solidi (RRL)*, 2021, vol. 15, iss. 3, p. 2000434. DOI: https://doi.org/10.1002/pssr.202170014

17. Hilmi I., Lotnyk A., Gerlach J.W., Schumacher P., Rauschenbach B. Epitaxial formation of cubic and trigonal Ge-Sb-Te thin films with heterogeneous vacancy structures. *Materials and Design*, 2017, vol. 115, pp. 138–146. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.003

18. Zheng Y., Cheng Y., Huang R., Qi R., Rao F., Ding K., Yin W., Song S., Liu W., Song Z., Feng S. Surface energy driven cubic-to-hexagonal grain growth of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin film. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 5915. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-017-06426-2

19. Takagaki Y., Giussani A., Perumal K., Calarco R., Friedland K.-J. Robust topological surface states in Sb_2Te_3 layers as seen from the weak antilocalization effect. *Physical Review B*, 2012, vol. 86, no. 12, p. 125137. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.125137

20. Andrieu S. Sb adsorption on Si<111> analyzed by ellipsometry and reflection high-energy electron diffraction: Consequences for Sb doping in Si molecular-beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 1991, vol. 69, no. 3, pp. 1366–1370. DOI: https://doi.org/10.1063/1.347274

21. Mayer J., Giannuzzi L.A., Kamino T., Michael J. TEM sample preparation and FIB-induced damage. *MRS Bulletin*, 2007, vol. 32, iss. 5, pp. 400–407. DOI: https://doi.org/10.1557/mrs2007.63

22. Zhang W., Thiess A., Zalden P., Zeller R., Dederichs P.H., Raty J.-Y., Wuttig M., Blügel S., Mazzarello R. Role of vacancies in metal–insulator transitions of crystalline phase-change materials. *Nature Materials*, 2012, vol. 11, pp. 95–956. DOI: https://doi.org/10.1038/nmat3456

23. STEM_CELL. *(Quantum) e-Optics and TEM GROUP*, CNRNANO. Available at: http://tem-s3.nano.cnr.it/?page_id=2 (accessed: 08.04.2020).

24. Grillo V., Rotunno E. STEM_CELL: A software tool for electron microscopy: Part I – simulations, *Ultramicroscopy*, 2013, vol. 125, pp. 97–111. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2012.10.016

25. Williams D.B., Carter C.B. *Transmission Electron Microscopy. A Textbook for Materials Science.* New York, Springer US, 2009, lxii, 775 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-76501-3

Received 29.03.2021; Revised 29.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

Yuliya S. Zaytseva – PhD student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Researcher of the Research Laboratory of Electron Microscopy Studies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), julia3ybina@gmail.com

Nikolay I. Borgardt – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Director of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Head of the Research Laboratory of Electron Microscopy Studies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), borgardt@miee.ru

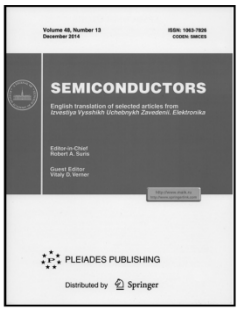
Alexander S. Prikhodko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Senior Researcher of the Research Laboratory of Electron Microscopy Studies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sashaprixodko@gmail.com

Eugenio Zallo – Dr., Sub-Group Leader, Walter Schottky Institut, Physik-Department, Technische Universität München (Am Coulombwall 4, 85748 Garching, Germany), eugenio.zallo@wsi.tum.de

Raffaella Calarco – Dr., Research Director, CNR Institute for Microelectronics and Microsystems (Via del Fosso del Cavaliene 100, 00133, Roma, Italy), raffaella.calarco@cnr.it

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



SEMICONDUCTORS

Vol. 54, *No.* 13, 2020. - ISSN PRINT: 1063-7826, ISSN ONLINE: 1090-6479,
в котором опубликованы избранные статьи журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».

http://pleiades.online
http://link.springer.com

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSORS AND ROUTES

УДК 621.3.049.771:[621.311.6:621.316.93/.99] **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-226-233**

Power and Ground Metal Insertion into Integrated Circuit Design Combined with Timing Aware Dummy Metal Fill Insertion

S.S. Abazyan[1], V.Sh. Melikyan[2]

[1]*Yerevan State University, Yerevan, Armenia*
[2]*National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia*

vazgenm@synopsys.com

Abstract: As dummy metal fill insertion is mandatory step for integrated circuits' (IC) current manufacturing processes, many works are targeting better fill insertion with small coupling capacitance. However, with scaling technology trends, smaller IR drop is becoming more and more required, as its high value can lead to integrated circuit working failures. To ensure IR drop reduction, a new approach was proposed: while doing dummy fill insertion, firstly, metal shapes which are tied to power and ground nets were inserted and then timing aware dummy metal shapes were added. It has been established that power and ground metal fill shapes were creating shield layers, hence optimizing IR drop. Later it was found that timing aware dummy metal fill insertion was creating dummy metals for ensuring final metal ratio. Experiments have shown that with the use of proposed method, for 5 different designs IR drop has been reduced on average by about 11,9 %; however, placement and routing tool runtime has been increased by about 27,8 % and overall capacitance has been increased by about 4,4 %.

Keywords: IR drop optimization; dummy fill; route shielding

For citation: Abazyan S.S., Melikyan V.Sh. Power and ground metal insertion into integrated circuit design combined with timing aware dummy metal fill insertion. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 226–233. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-226-233

© S.S. Abazyan, V.Sh. Melikyan, 2021

Конструирование шин питания и заземления в интегральной схеме с вставкой фиктивного металлического заполнителя с учетом временных параметров

С.С. Абазян[1], В.Ш. Меликян[2]

[1]Ереванский государственный университет, г. Ереван, Армения
[2]Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван, Армения

vazgenm@synopsys.com

Введение металлического наполнителя в конструкцию ИС – обязательный этап в производственном цикле изготовления ИС, поэтому многие работы направлены на исследование процесса введения наполнителя с небольшой паразитной емкостью. С развитием технологий масштабирования ужесточаются требования к значению падения напряжения, поскольку его высокое значение может привести к сбоям в работе ИС. В работе для гарантированного уменьшения падения напряжения предложен подход, заключающийся во вставке в конструкцию ИС металлических заливок, которые привязаны к питанию и заземлению, и последующем добавлении фиктивных металлических форм с учетом времени. Установлено, что добавление форм питания и заземления создает экранные слои и в итоге падение напряжения оптимизируется. Вставка металлического наполнителя в конструкцию ИС с учетом временных параметров обеспечивает окончательную плотность металлов. Эксперименты показали, что при использовании предложенного метода падение напряжения сократилось примерно на 11,9 % в среднем для пяти разных конструкций ИС, однако время работы программного средства размещения и трассировки увеличилось примерно на 27,8 %, а общая паразитная емкость возросла примерно на 4,4 %.

Ключевые слова: оптимизация падения напряжения; металлическое заполнение; экранирование трассы

Для цитирования: Абазян С.С., Меликян В.Ш. Конструирование шин питания и заземления в интегральной схеме с вставкой фиктивного металлического заполнителя с учетом временных параметров // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 226–233. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-226-233

Introduction. With advances in process technology downscaling the IC size in current production, more complex design rules are being required. Along with this, for advanced manufacturing processes, manufacturing yields improving keys are chemical-mechanical polishing pattern uniformity and dielectric thickness variation control. One of effective techniques to achieve pattern uniformity and dielectric thickness variation control is metal fill insertion. After fill shapes are inserted, they increase planarity, reduce the dielectric thickness variation and ensure nearly uniform pattern density. All these are important to decrease the process variability and thereby achieve better yield [1, 2].

However, metal fill insertion leads to coupling capacitance, which can cause circuit delays and thus problems in timing closure [3]. Based on this, it is important to consider the

coupling capacitance during metal fill insertion [4, 5]. Overall, coupling capacitance resulting from metal fill insertion can be of 3 types:

- Area capacitance, which is being formed between two metals that are of the same metal layer;
- Lateral capacitance, which is being formed between two metals that are on different layers and have horizontal overlap;
- Fringe capacitance, which can be formed between two conductors that are on different metal layers but don't have overlap.

Along with the metal fill insertion for ensuring correct metal density on IC, having smaller IR drop is also very important, as high value of drop can lead to non-correct working of IC and up to wrong logic operation. IR drop can be optimized by adding more power/ground metals and interconnections, thus decreasing the overall resistance of the network. Based on this, adding metal fillers, while considering IR drop, will help to have good planarity and controllable dielectric thickness on the one hand, and decrease IR drop value on the other hand [6].

As a solution for described challenges for metal fill insertion, current works [1–3] are aiming to ensure uniform metal fill insertion and by the same time keeping small coupling capacitance between filled shapes.

For IR drop estimation and optimization, in some methods [4, 5] power mesh metals and interconnections are being added to ensure less resistance on power network, thus decreasing the drop value.

In [2], lithography aware metal fill insertion method is presented. This method is analyzing the effect of dummy metal fill insertion on signal interconnection metal's width variation. The signal interconnects, which width variation exceeds the predefined threshold, are selected to be critical and lithography aware dummy metal fill is being done on them. This will avoid metal fill insertion within critical distances based on optical proximity of these nets. As described in work [2], about 30 % of signal nets are being affected by conventional dummy metal fill insertion, which is bringing to more than 15 % linewidth variation. With using lithography aware dummy metal fill insertion, linewidth variation has been reduced by ~25 % and critical area by ~35 %, while keeping density, planarity and performance targets. Hence, this method can ensure lithography aware metal insertion, while meeting density target without any cost.

In [3], timing-aware metal fill insertion is described, which is taking under consideration total interconnect capacity and density constraints together. This method mainly consists of 4 steps:

1. Initial metal fill insertion and legalization based on design rules.
2. Conductor dividing into different paths and constructing capacitance graph for global capacity reduction.
3. Monte Carlo based fill selection for reducing coupling capacitance between any conductor pairs.
4. Density-aware fill deletion for dummy fill amount reduction.

In [4], described method is doing IR drop estimation while generating information about possible high IR drop areas and later adds special types of interconnects, which will decrease the IR drop. Main advantage of this method is adding special interconnect on exact places. Hence in places not needing to have too dense power/ground nets, sparse network will remain. This will give chance to do better routing and IR drop reduction will not affect timing.

Fill insertion considering timing. One of timing aware fill insertion frameworks is FIT: Fill insertion considering timing [1]. In this work, efficient and high-performance framework is demonstrated, which is decreasing critical wire capacitance by 8 % while decreasing tools' runtime. The tool has inbuild parasitic extraction algorithm, which is providing required data for coupling capacitance calculation.

The described timing aware fill insertion algorithm can be divided into 3 main phases.

Target density planning. Density check on each layer is being performed with w × w window and w/2 step, where w is predefined value based on technology. For effectively taking care of this, described work is dividing the whole layout into w/2 × w/2 windows and placing constraints of satisfying original density requirements on every window. Anyway, as bigger area has more flexibility of distribution than smaller one, aside from directly applying density rule, algorithm is using target density planning algorithm for target density distribution on each small sub-window, while considering two main things:

1. Reduce coupling capacitance between fill shapes and critical nets;
2. Reduce total wire capacitance of design.

Global fill synthesis. After target density calculation, global synthesis step is being performed. In this step, there are 4 major points that are being considered:

1. Avoid overlapping of upper/lower signal metal layers and fill shapes that have big area;
2. Increase spacing between metal shapes and fill shapes;
3. Avoid fill insertion between two parallel wires;
4. Reduce parallel run length between fill shapes and metal shapes.

Detailed post refinement. After global fill insertion, some fill shapes cannot be placed with their not best option, thus they can have impact to critical wires. Because of this, after global fill insertion, detail post refinement is being done, where timing aware eco changes are done to ensure smaller capacitance and not having post-fill design rule violations. This step consists of two main steps: fill relocation step and fill shifting step.

Power and ground metal insertion combined with timing aware fill insertion. Fill insertion considering timing algorithm is fast and reliable algorithm, which is minimizing the coupling capacitance and ensuring less interaction between critical wires and fill shapes. However, in this algorithm the IR drop is not being considered. As working voltages of ICs are being decreased with decreasing technology sizes, having smaller IR drop is becoming more important [6] for having reliable work of IC. Based on this, aside from issues which can come from critical capacitance increasing, IR drop issues also need to be considered.

The proposed method is targeting IR drop-aware metal insertion, while ensuring overall wire capacitance decrease by timing aware filler insertion.

The main working principle of proposed method can be divided into 4 steps:

1. Fillable area extraction from design;
2. Power and ground mesh extraction and searching for fillable area overlap with power and ground nets;
3. IR drop-aware power/ground metal and interconnect insertion on extracted areas;
4. Timing aware fill insertion with considering target density.

Fillable area extraction. At the first step, algorithm is taking placed and routed design as input. The required output for this step is set of polygons, where inserting corresponding metal layer fill shape will not violate minimum metal spacing rules. For the fillable area extraction, full routing blockage is being drawn on design, and areas that are intersecting with signal routings are being cut with minimum spacing precision of that particular metal layer (Fig.1). After extraction, coordinates of polygons/blockages are being saved, for later postprocesses.

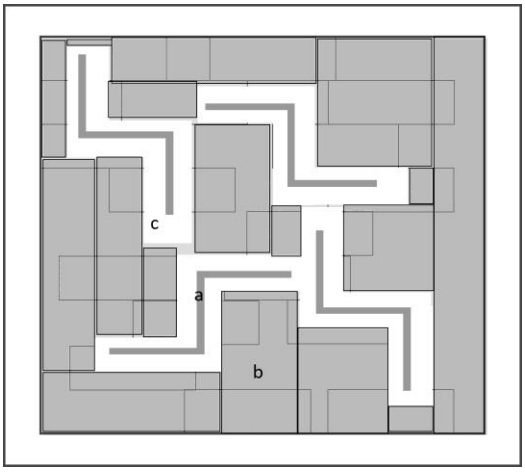


Fig.1. Fillable area extraction process output

The polygons that are extracted from the design are mainly complicated with high count of vertices and holes in them. Because of this, there is a need to perform polygon to rectangle conversion, for which some different techniques are described [1–3].

For proposed algorithm, D-PTR method (described in [1]) is used, where outputted rectangle shapes ("fat" or "tall") are matching with under extracting metal directions (horizontal or vertical). Along with this, all areas that are sharing common edge are being merged into one shape. Final view (Fig.2) for fillable area extraction includes: routed design shapes from input (a); fillable area rectangles (b); empty spaces for ensuring metal minimum spacing (c).

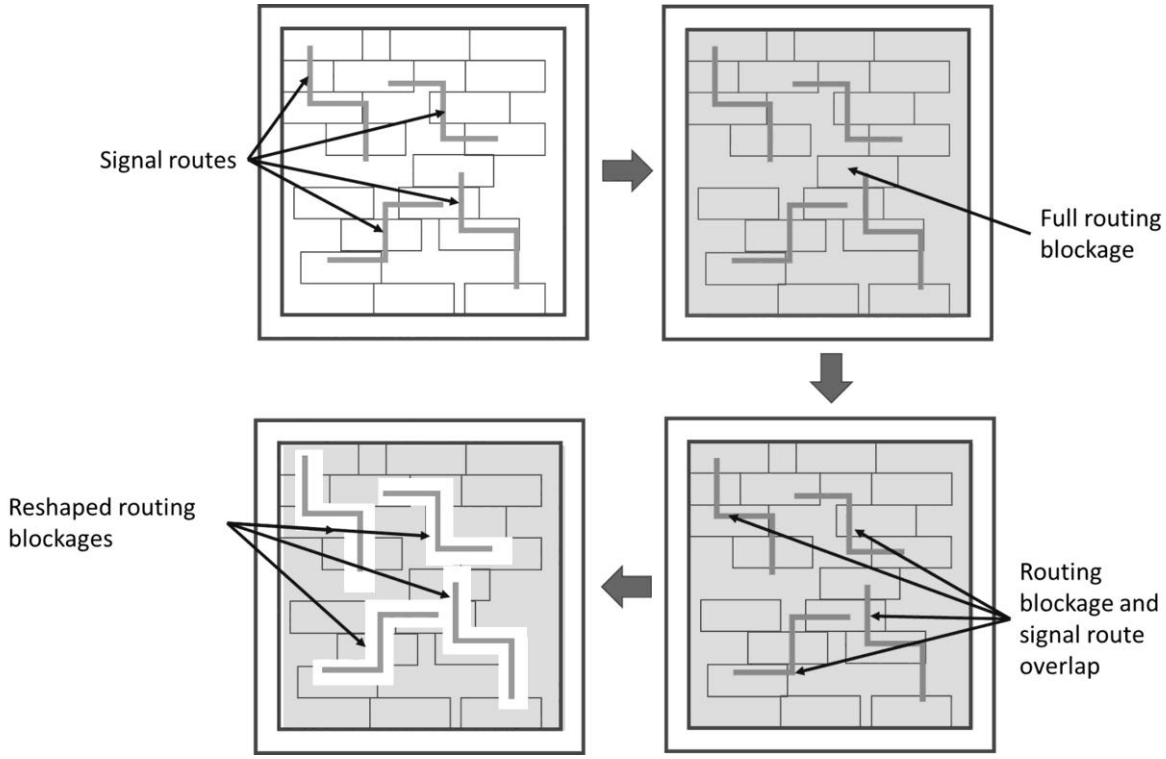


Fig.2. Fillable area extraction using routing blockage

Power and ground mesh extraction and searching for fillable area overlap with power and ground nets. After fillable area extraction is done, algorithm is searching power and ground nets and constructing possible intersection maps for power/ground mesh metals with fillable areas. By the time of intersection map construction, few criteria are being taken under consideration:

- Area of rectangle which is intersecting power/ground metal, must be bigger than minimum metal area of that layer.

- Rectangle's width and height must be bigger than the sum of minimum width and minimum spacing of that metal layer.

All rectangles that are satisfying to above described criteria, are marked as potential power/ground fill insertion areas and their coordinates are saved for later processing.

IR drop-aware power/ground metal and interconnect insertion on extracted areas. On this step, areas from previous step and power/ground mesh information are being considered as inputs. The algorithm is later adding the "owner" attribute on highlighted shapes. This attribute is showing to which power net must be assigned the shape on next step. For adding the "owner" attribute, two main criteria exist:

- Shape must be near to routes of the power/ground net which name will be assigned as "owner" attribute.
- The overall metal density must be considered.

Here near nets also are being classified. This means, the nearest net is considered the net which has same metal layer and the delta distance of center of width of net (for vertical direction metal layer) and mass center of the shape is the smallest compared to other shapes. Based on described, the higher (lower) the net is from shape, the more (the less) distance is considered to be between them.

For having the overall net/shape density value, variables for their densities are being stored and updated each time, when any shape is assigned to any power/ground net.

After these steps, the algorithm is taking the shapes that have been assigned to power/ground nets and starts finding room for their physical connection with corresponding net.

As per the priority, same metal layer fill shapes and power/ground nets are the first. Hence, if there is intersection or possibility of connecting shape by extending it, algorithm is connecting by this way. By this, with vertical or horizontal extending of the fill shape, it is being connected with power/ground net physically. Second priority are the shapes (nets), which have different metal layers.

For different layer shapes, after extending shape to have cross overlap [7–9] with power/ground shape, vertical interconnections (VIAs) are being placed with keeping routing design rules, i.e. minimum metal area, minimum spacing, minimum metal-via enclosure, etc.

As these operations are using high memory (because of big count of fill shapes and near power/ground nets), process is being divided into partitions and handled parallelly.

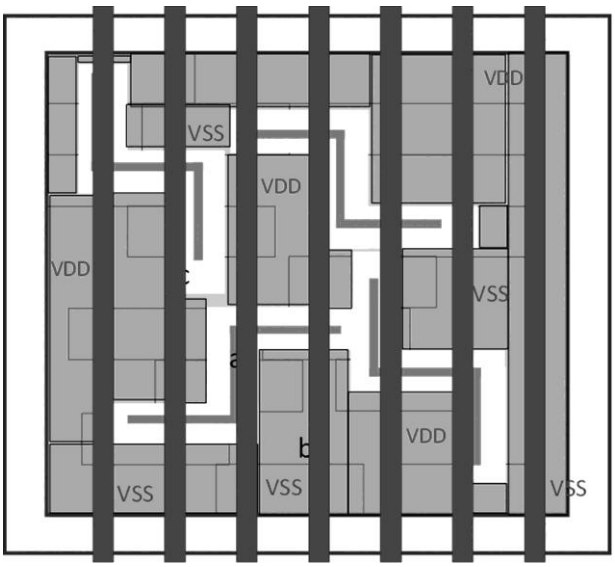


Fig.3. Connected metal fills (VDD – power net, VSS – ground net)

The output of this step is fully connected and marked metal shapes (Fig.3). After described steps, physical checks are being done on design, to ensure there are no any design rule that has been violated while adding fill shapes. If there are any violations, corresponding metal fill shapes are being deleted and the density variable is being updated accordingly.

Experimental results. For demonstrating quantitative results and the advantages and disadvantages of proposed method, five types of designs were used with different floorplan shapes and power/ground metal option. Designs include 2 hardened blocks and about 150k-400k logic cells. Along with this, wire length is selected to be near to [1] method demonstrated designs' wire lengths, to be able to do comparative calculations.

All tests are done on 4-cores 3,4Ghz Linux machine with 64GB memory, to be matching with [1] demonstrated method machine.

Comparison results for overall runtime and capacitance are shown in Table 1.

Comparison results for IR drop optimization using proposed method are shown is Table 2.

Table 1

Comparison results for runtime and capacitance

	Standard run			[1] method			Proposed method		
	Wires	C_{total}	Runtime (s)	Wires	C_{total}	Runtime (s)	Wires	C_{total}	Runtime (s)
Design 1	311250	10712,9	7,9	305667	10883,66	8,8	312373	11258,1	12,3
Design 2	742837	34627,1	30,28	750166	39523,68	31,44	758960	41256,75	37,4
Design 3	62739	1499,7	1,54	64903	1558,17	1,59	64749	1648,24	2,27
Design 4	150507	2960,71	3,17	149464	2969,20	3,55	154783	3109,64	4,61
Design 5	268315	5514,83	6,21	275425	5705,39	6,97	247614	5908,41	7,49

Table 2

Comparison results for IR drop optimization

	Standard run		Proposed method	
	Wires	IR drop %	Wires	IR drop %
Design 1	311250	1,127	312373	1,004
Design 2	742837	1,432	758960	1,103
Design 3	62739	0,974	64749	0,914
Design 4	150507	0,993	154783	0,861
Design 5	268315	1,014	247614	0,947

Conclusion. To ensure less IR drop on power and ground nets, while having successful dummy fill insertion, the proposed method is adding power/ground metal shapes while adding fill shapes and after that adding regular metal fills to ensure correct metal density.

Experiments have shown that with use of proposed method, IR drop has been decreased by about 11,9 %, however, because of high number of metal/ground nets and fill shapes processing, overall tools' runtime has been increased by about 27,8 % and overall wire capacitance C_{total} has been increased by about 4,4 %.

References

1. Jiang B., Zhang X., Chen R., Chen G., Tu P. et al. FIT: fill insertion considering timing. *2019 56th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)*. Las Vegas, NV, IEEE, 2019, 87.6, pp. 1–6.

2. Suresh V.B., Vijayakumar P., Kundu S. On lithography aware metal-fill insertion. *Thirteenth International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED).* Santa Clara, CA, IEEE, 2012, pp. 200–207. DOI: https://doi.org/10.1109/ISQED.2012.6187495

3. Lin Y., Yu B., Pan D.Z. High performance dummy fill insertion with coupling and uniformity constraints. *IEEE TCAD*, 2017, vol. 36, no. 9, pp. 1532–1544. DOI: https://dx.doi.org/10.1145/2744769.2744850

4. Mamikonyan N., Melikyan N., Musayelyan R. IR drop estimation and optimization on DRAM memory using machine learning algorithms. *2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, Varna, IEEE, 2020, pp. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/EWDTS50664.2020.9224772

5. Sercu J., Barnes H. Thermal aware IR drop using mesh conforming electro-thermal co-analysis. *2017 IEEE 21st Workshop on Signal and Power Integrity (SPI)*, Baveno, IEEE, 2017, pp. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/SaPIW.2017.7944013

6. Liu C., Tu P., Wu P., Tang H., Jiang Y., Kuang J., Young E.F.Y. An effective chemical mechanical polishing filling approach. *2015 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI*, Montpelier, IEEE, 2015, pp. 44–49. DOI: https://doi.org/10.1109/ISVLSI.2015.75

7. Gupta P., Kahng A.B., Nakagawa O.S., Samadi K. Closing the loop in interconnect analyses and optimization: CMP fill, lithography and timing. *Proc. VMIC*, 2005, pp. 352–363.

8. Lan T., Li X., Chen J., Yu J., He L. et al. Timing-aware fill insertions with design-rule and density constraints. *2019 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*, Westminster, CO, IEEE, 2019, pp. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCAD45719.2019.8942079

9. Arora N.D., Raol K.V., Schumann R., Richardson L.M. Modeling and extraction of interconnect capacitances for multilayer VLSI circuits. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1996, vol. 15, no. 1, pp. 58–67. DOI: https://doi.org/10.1109/43.486272

Received 01.02.2021; Revised 02.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

Suren S. Abazyan – PhD student of the Yerevan State University (Armenia, Yerevan, 0025, 1 Alex Manoogian), su.abazyan@gmail.com

Vazgen Sh. Melikyan – Corresponding Member of NAS RA, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, Yerevan, Teryan 105,0009), vazgenmelikyan56@gmail.com

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

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2020 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

УДК 621.382:620.183.2:539.22:539.25.085.332 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-234-245

Особенности процесса изготовления кремниевых игл для кантилеверов

А.В. Новак[1,2], В.Р. Новак[3], А.В. Румянцев[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]АО «Ангстрем», г. Москва, Россия
[3]ООО «НТ-МДТ Спектрум Инструментс», г. Москва, Россия

Novak@angstrem.ru

Исследование поверхности образцов в атомно-силовой микроскопии проводится с применением кантилеверов, представляющих собой упругую консоль с острой иглой на свободном конце. Качество изображений, получаемых с помощью атомно-силового микроскопа, существенным образом зависит от степени остроты иглы. Широко используемыми являются кантилеверы из монокристаллического кремния, изготавливаемые на основе жидкостного анизотропного травления. В работе изучена зависимость формы и размеров формируемой иглы от концентрации KOH в растворе. Исследовано влияние пирогенного окисления и окисления в атмосфере сухого кислорода на остроту иглы при проведении процесса заострения. Определено, что при 70 %-ной концентрации KOH формируются иглы, имеющие наибольшее аспектное отношение и максимальную высоту. При этом форма иглы представляет собой восьмиугольную пирамиду, боковые грани которой образованы восемью кристаллографическими плоскостями из {311} и {131}. Показано, что при двухэтапном процессе заострения, состоящем из пирогенного окисления и окисления в атмосфере сухого кислорода, удается формировать достаточно острые зонды с радиусом острия 2–5 нм и углом при вершине 14–24°, в то время как одноэтапный процесс заострения игл на основе пирогенного окисления обеспечивает получение зондов с радиусом около 14 нм. Проведены сравнительные испытания изготовленных зондов. С помощью атомно-силового микроскопа получены изображения тестового образца пленки поликристаллического кремния с полусферическими зернами (HSG-Si). Определено, что такой статистический параметр, как относительное приращение площади поверхности S_{dr}, является наиболее чувствительным к «степени остроты» зонда для поверхностей пленки типа HSG-Si.

Ключевые слова: анизотропное травление в KOH; атомно-силовая микроскопия; кантилевер

Для цитирования: Новак А.В., Новак В.Р., Румянцев А.В. Особенности процесса изготовления кремниевых игл для кантилеверов // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 234–245. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-234-245

© А.В. Новак, В.Р. Новак, А.В. Румянцев, 2021

Features of the Manufacturing Process of Silicon Tips for Cantilevers

A.V. Novak[1,2], V.R. Novak[3], A.V. Rumyantsev[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]JSC «Angstrem», Moscow, Russia
[3]LLC «NT-MDT Spectrum Instruments», Moscow, Russia

Novak@angstrem.ru

Abstract: Sample surface examination in atomic force microscopy is carried out using cantilevers having the form of elastic consoles with sharp needle (tip) at the free end. Quality of images obtained from atomic force microscope (AFM) heavily depends on tip sharpness degree. Silicon cantilevers made based on wet anisotropic etching are widely used in atomic force microscopy. This paper studies the dependence of the shape and size of the resulting tip on the concentration of KOH in the solution, as well as the effect of pyrogenic oxidation and oxidation in a dry oxygen atmosphere on the sharpness of the tip during the sharpening process. It was shown that when 70 % concentration is used, tips with the highest aspect ratio and maximum height are obtained. In this case, the shape of the needle is an octagonal pyramid, the lateral faces of which are formed by eight crystallographic planes from {311} and {131}. It was found that in a two-stage sharpening process, consisting of pyrogenic oxidation and oxidation in a dry oxygen atmosphere, it is possible to form sufficiently sharp probes with a tip radius of 2–5 nm and an apex angle of 14–24°. It has been established that a one-stage sharpening process based on pyrogenic oxidation provides only the production of probes with a radius of about 14 nm. Comparative tests of the manufactured probes in obtaining AFM images of a test sample of a polycrystalline silicon film with hemispherical grains (HSG-Si) were presented. Research study has revealed that such a statistical parameter as the relative increment of the surface area S_{dr} is the most sensitive to probe sharpness for surfaces of the HSG-Si film type.

Keywords: anisotropic etching in KOH; atomic force microscopy; cantilever

For citation: Novak A.V., Novak V.R., Rumyantsev A.V. Features of the manufacturing process of silicon tips for cantilevers. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 234–245. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-234-245

Введение. Поверхность образцов в атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследуется с помощью специальных зондовых датчиков – кантилеверов, представляющих собой упругую консоль с острой иглой на свободном конце. Острая игла – ключевой элемент зонда, поскольку качество получаемых АСМ-изображений существенным образом зависит от степени остроты иглы. В АСМ широко используются кантилеверы из монокристаллического кремния. Для формирования кремниевых игл в основном применяется анизотропное жидкостное травление в растворе KOH [1–5], однако в некоторых случаях [6, 7] предпочтение отдается изотропному жидкостному травлению. В работах [1, 3] для пластин с ориентацией Si (100) изучалась зависимость формы и размеров получаемых игл от формы маски, стороны которой специальным образом ориен-

тировались относительно кристаллографического направления [110], при травлении в растворе KOH. Исследовалась зависимость формы получаемой кремниевой иглы от добавления I_2 и KI в травящий раствор KOH [5]. Кремниевые иглы, полученные посредством анизотропного травления в KOH или ТМАН, недостаточно острые для того, чтобы их можно было использовать для АСМ-кантилеверов. С этой целью проводят процедуру заострения игл [1, 7–11], применяя специальную технологию, разработанную и описанную в работах [8, 9]. Процедура основана на термическом окислении кремниевых игл при температурах ниже 1000 °С и последующем удалении сформированного оксида кремния химическим травлением в HF или буферном травителе. В основе данного процесса – обнаруженный в работе [12] эффект замедления скорости окисления в локальных областях с большой кривизной из-за возникающих механических напряжений на границе SiO_2 и Si, обусловленных увеличением молярного объема при окислении.

Несмотря на значительное количество опубликованных работ, некоторые особенности процесса формирования острых кремниевых игл рассмотрены недостаточно полно. В частности, мало изучено влияние концентрации KOH в растворе на форму, размеры и аспектное отношение получаемой иглы, особенно при высоких концентрациях, а также отсутствует сравнительный анализ влияния на заострение иглы процессов пирогенного окисления и окисления в атмосфере сухого кислорода.

В настоящей работе исследуются особенности формирования острых кремниевых игл, а именно изучается влияние концентрации KOH в растворе на форму, размеры и аспектное отношение получаемой иглы. Проводится сравнительный анализ двух процессов для заострения игл: на основе пирогенного окисления и двухэтапного процесса, на основе пирогенного окисления и окисления в атмосфере сухого кислорода.

Методика эксперимента. Для изготовления кремниевых игл и кантилеверов использовались пластины монокристаллического кремния, легированного бором (КДБ-12) с ориентацией (100). Маскирующее покрытие из термического SiO_2 (толщиной 1,3 мкм) формировалось на лицевой стороне пластины. При травлении применялись маски в форме круга диаметром 45 мкм. Травление кремниевых игл проводили в водном растворе KOH. Температура раствора составляла 90 °С для концентрации 30 %, 100 °С для концентрации 50 % и 120 °С для 70 %-ного раствора. Это обусловлено тем, что для данной концентрации при меньшей температуре не происходит полного растворения KOH. Скорости травления в направлении [100] равны соответственно 2,22; 2,18; 0,85 мкм/мин для концентраций 30, 50 и 70 %. Процесс травления проводился до момента удаления маски. Контроль окончания процесса травления осуществлялся в ходе наблюдения за моментом удаления маски с помощью оптического микроскопа (Leitz Ergolux AMC). Для заострения кремниевых игл, полученных в результате травления в KOH, применялись окисление в атмосфере сухого кислорода и пирогенное окисление при температуре 950 °С с последующим удалением оксида кремния в буферном травителе.

Формы и размеры полученных игл исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) (Helios Nanolab 650 FEI). Для тестирования кантилеверов с иглами, подвергнутыми различным заостряющим окислениям, использовался атомно-силовой микроскоп Солвер Р47 (компании NT-MDT) в полуконтактном режиме сканирования. Амплитуда колебаний зонда составляла 5–10 нм. При АСМ-измерениях для оценки «степени остроты» зонда в качестве тестового использовался образец поликристаллического кремния с полусферическими зернами (HSG-Si) [13–15].

Результаты и их обсуждение. Типичные РЭМ-изображения для кремниевых игл, полученных анизотропным травлением в водном растворе KOH при концентрациях 30, 50 и 70 %, показаны на рис.1.

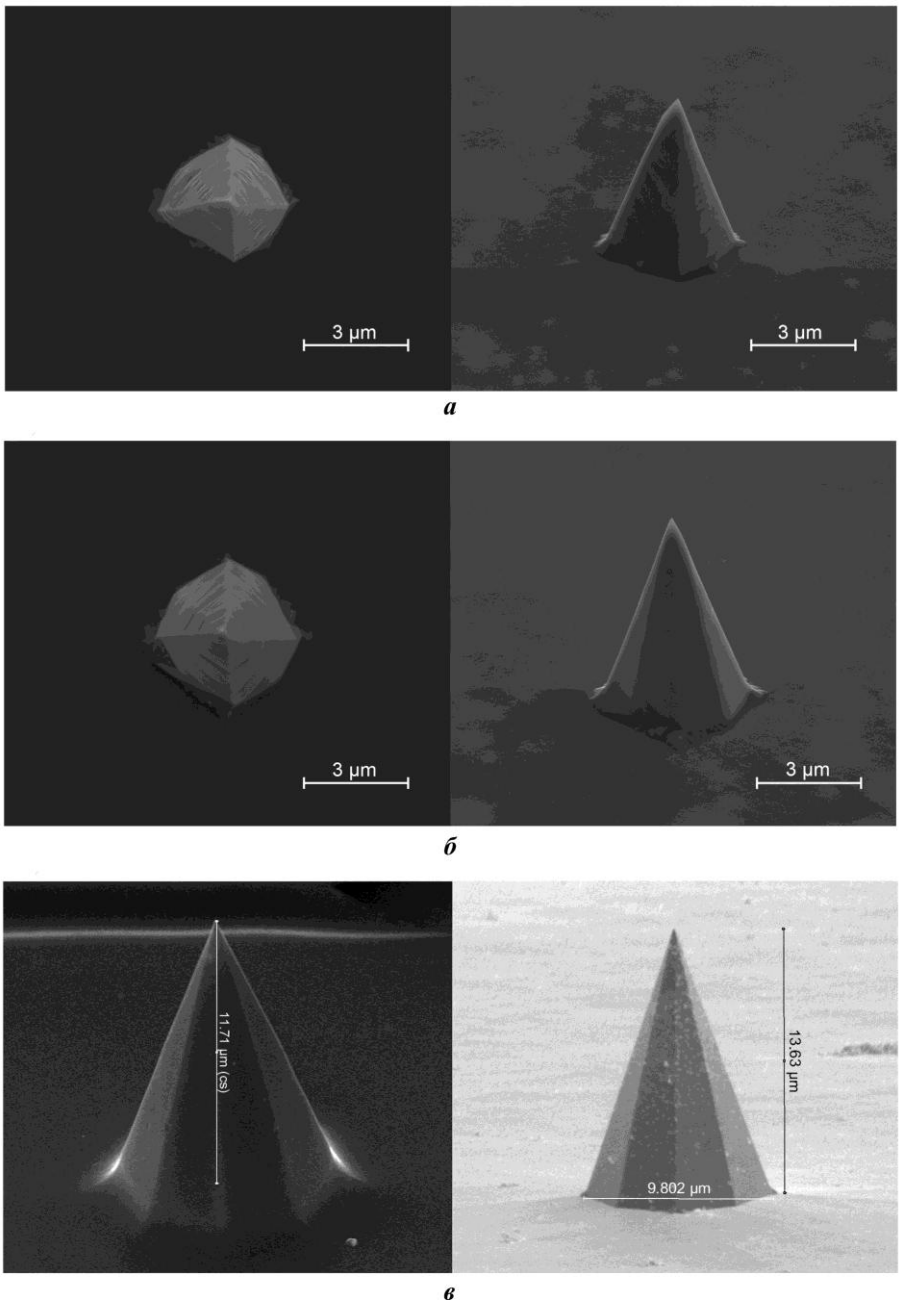


Рис.1. РЭМ-изображения кремниевых игл, полученных анизотропным травлением в водном растворе KOH при концентрациях 30 (*а*), 50 (*б*) и 70 % (*в*)
Fig.1. SEM-images of silicon tips obtained by anisotropic etching in an aqueous solution of KOH at concentrations 30 (*a*), 50 (*b*) and 70 % (*c*)

Установлено, что иглы, полученные при концентрации раствора KOH 30 % (рис.1,*а*), имеют форму, более близкую к четырехугольной, – неправильной пирамиды. При концентрации 50 % (см. рис.1,*б*) иглы уже имеют форму, более близкую к восьмиугольной пирамиде. Время травления, необходимое для формирования иглы, равно 6 мин при концентрации раствора KOH 30 % и примерно 7 мин при концентрации 50 %. Иглы, полученные при концентрации раствора KOH 70 % (рис.1,*в*), имеют форму восьмиугольной пирамиды. Игла образована восемью гранями, сходящимися в вершине. Для 70 %-ной концентрации требуется значительное время (примерно 20 мин) для формирования игл. Это позволяет лучше контролировать процесс формирования игл и, как следствие, получать иглы с более контролируемыми геометрическими размерами, такими как высота иглы и размер у основания.

Высота игл при концентрации раствора KOH 70 % составляет 11–14 мкм, тогда как для концентраций 30 и 50 % высота игл менее 10 мкм. Для игл, полученных при 70 %-ной концентрации раствора KOH, размер у основания примерно равен 9–10 мкм. Важная характеристика иглы – аспектное отношение, определяемое как отношение высоты иглы к ее латеральному размеру у основания. Для игл, полученных при концентрации раствора 70 и 50 %, аспектное отношение примерно одинаковое и составляет 1,3–1,5, а при концентрации 30 % составляет 1,0–1,1. Максимальная высота иглы, которая может быть получена при 70 %-ной концентрации раствора KOH равна 1/3 от диаметра круглой маски. Для маски диаметром 45 мкм максимальная высота иглы может составлять не более 15 мкм. Использование круглой маски и высокой концентрации раствора KOH приводит преимущественно к формированию именно восьмиугольной пирамиды, сохраняющей свою форму на всей высоте.

Для игл, полученных при 70 %-ной концентрации раствора KOH, проведены расчеты индексов Миллера (*hkl*) плоскостей, образующих иглу. На основе сопоставления формы и геометрических характеристик, полученных из РЭМ-измерений, с расчетной пирамидой, построенной посредством компьютерного моделирования, можно заключить, что форма иглы образована восемью кристаллографическими плоскостями (311), $(\bar{3}11)$, $(3\bar{1}1)$, $(\bar{3}\bar{1}1)$, (131), $(\bar{1}31)$, $(1\bar{3}1)$, $(\bar{1}\bar{3}1)$. Основание иглы в виде восьмиугольника образовано линиями, являющимися пересечениями указанных плоскостей с плоскостью (001), угол между направлениями [310] и [110] равен 26,57°. Полученные результаты согласуются с данными работы [16], в которой различные трехмерные структуры получали посредством травления при разных концентрациях раствора KOH. Так, согласно [16] при молярной концентрации раствора KOH 15 М имели место трехмерные структуры, похожие на основания полученных кремниевых игл при 70 %-ной концентрации раствора KOH.

АСМ-изображение, получаемое при АСМ-измерениях, только с некоторой погрешностью соответствует изображению реальной поверхности из-за искажений, обусловленных конечными размерами острия иглы. Соответственно, чем острее игла кантилевера, тем меньше искажения и тем точнее АСМ-изображение будет соответствовать реальной поверхности исследуемого образца.

Для характеристики степени остроты иглы используют такие параметры, как радиус кривизны острия и угол при вершине острия (или половина угла), а также аспектное отношение острия W/L, где W – ширина острия на некотором расстоянии L от вершины [11, 13]. Широко используемыми для АСМ-измерений являются кантилеверы, имеющие радиус острия менее 10 нм.

Изучено влияние на степень остроты получаемой иглы двух процессов заострения, основанных на термическом окислении. Первый процесс – пирогенное окисление, второй процесс – двухэтапный: пирогенное окисление на первом этапе и сухое окисление (окисление в атмосфере сухого кислорода) на втором. На рис.2 приведены примеры РЭМ-изображений острий, соответствующих трем типам изготовленных игл. Соответственно первый тип – это иглы, полученные путем анизотропного травления в 70 %-ном растворе KOH и не подвергнутые последующей процедуре заострения (см. рис.2,*а*). Второй тип – иглы, полученные путем травления в 70 %-ном растворе KOH и в дополнение подвергнутые заострению на основе пирогенного окисления с последующим удалением оксида (см. рис.2,*б*). Третий тип – иглы, подвергнутые двухэтапному процессу заострения: на первом этапе – пирогенное окисление с последующим удалением оксида, на втором – сухое окисление с последующим удалением оксида (см. рис.2,*в*). Как видно из рисунка, острие иглы, изготовленной только анизотропным травлением в растворе KOH, имеет довольно большой радиус кривизны (около 20–40 нм) и значительный угол при вершине (~ 60°). Иглы, подвергнутые процессу заострения на основе пирогенного окисления, имеют несколько меньший радиус острия (~ 8–14 нм),

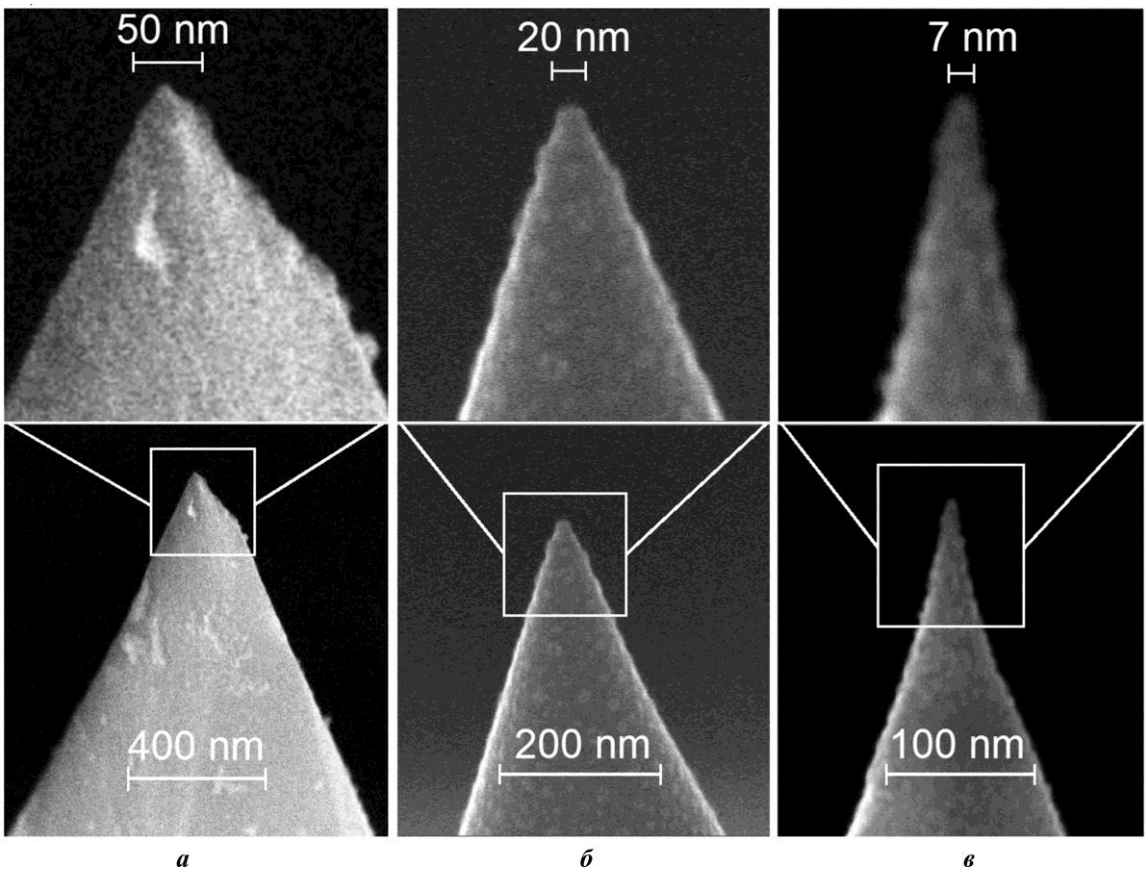
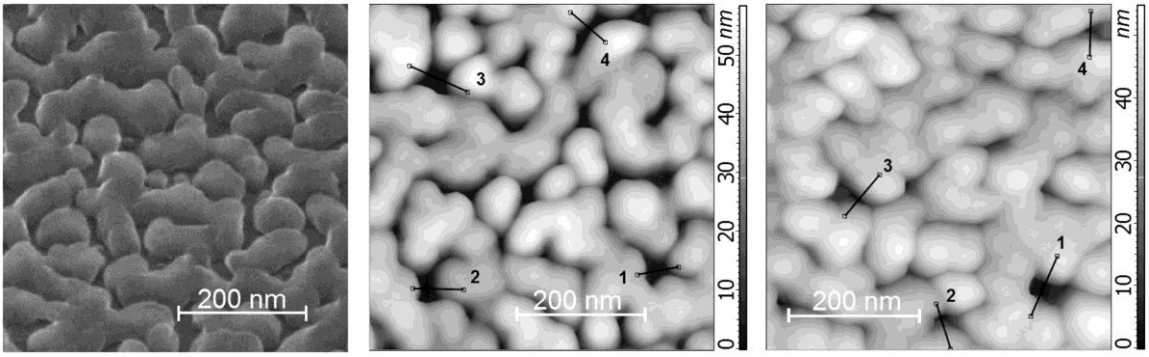


Рис.2. РЭМ-изображения острий игл: *а* – после анизотропного травления и без дополнительных технологических операций; *б* – дополнительно подвергнутых заострению на основе пирогенного окисления при 950 °С; *в* – подвергнутых заострению на основе пирогенного и сухого окисления
Fig.2. SEM-images of the tips: *a* – after anisotropic etching and without additional technological operations; *b* – additionally subjected to sharpening based on pyrogenic oxidation at 950 °C; *c* – subjected to a two-stage sharpening process based on pyrogenic and dry oxidation

однако довольно большой угол при вершине (~ 40°–50°) и, соответственно, значительное аспектное отношение острия (W/L ~ 0,9 при L = 100 нм). Иглы, подвергнутые двухэтапному процессу заострения, наиболее острые. Как следует из РЭМ-измерений, для десяти образцов таких игл значение радиуса острия лежит в интервале 2–5 нм, угол при вершине – в интервале 14–24°, аспектное отношение острия W/L – в интервале 0,33–0,56 (при L=100 нм).

Итак, двухэтапная процедура заострения с использованием сухого окисления является более эффективной по сравнению с пирогенным окислением. По-видимому, это связано с тем, что в процессе пирогенного окисления по сравнению с окислением в атмосфере сухого кислорода при температуре 950 °С рост оксида происходит более интенсивно. В результате сжимающие механические напряжения, препятствующие окислению на самом острие иглы, частично снимаются и происходит лучшее окисление острия. При окислении в атмосфере сухого кислорода при температуре 950 °С рост окисла происходит не так интенсивно, как при пирогенном окислении, и эффект замедления роста окисла на острие иглы выражен более сильно по сравнению с пирогенным окислением. Таким образом, помимо температуры процесса окисления, на размеры острия иглы влияет среда, в которой происходит процесс окисления кремния. Полученные результаты по заострению игл согласуются с данными работ [8, 9], где отмечено, что острия игл при более интенсивном окислении имеют большие размеры по сравнению с медленным процессом окисления.

Проведено сравнительное тестирование кантилеверов с иглами, заостренными пирогенным окислением, и с иглами, заостренными пирогенным и сухим окислением. Для тестирования использовался образец пленки поликристаллического кремния с полусферическими зернами HSG-Si [13–15]. Он представляет собой слой, состоящий примерно из одинаковых зерен, расположенных на поверхности плоской подложки. Эффективная толщина HSG-Si-пленки ~ 40 нм, средняя высота зерен ~ 50 нм, средний латеральный размер ~ 70 нм [15]. Зерна плотно упакованы в слое, некоторые соседние зерна в той или иной степени срастаются в латеральном направлении. Однако имеются зерна, не соприкасающиеся с некоторыми соседями. Расстояние между границами таких зерен может составлять от нескольких нанометров до 10–30 нм. На рис.3,*а* приведено снятое под углом 52° к нормали РЭМ-изображение участка поверхности тестовой HSG-Si-пленки.



а *б* *в*

Рис.3. РЭМ-изображение HSG-Si-пленки, снятое под углом 52° к нормали (*а*), АСМ-изображения поверхности HSG-Si-пленки, измеренные кантилеверами с радиусом острия 4 (*б*) и 14 нм (*в*)
Fig.3. SEM-image of the HSG-Si film, measured at an angle of 52° to the normal (*a*), AFM-images of the HSG-Si film surface, measured by cantilevers with a tip radius 4 (*b*) and 14 nm (*c*)

На рис.3,*б*,*в* приведены АСМ-изображения HSG-Si-пленки, измеренные зондами, заостренными соответственно пирогенным и сухим окислением (радиус острия 4 нм, угол при вершине 19º, W/L=0,46 при L=100 нм), пирогенным окислением (радиус острия 14 нм, угол при вершине 40º). РЭМ-измерения этих зондов проводились после выполнения АСМ-измерений. Из приведенных изображений видно, что площадь темных участков, на которых игла проникает до плоской подложки, значительно больше на АСМ-изображении, соответствующем зонду с меньшим радиусом острия (4 нм).

На каждом из АСМ-изображений (см. рис.3,*б*,*в*) проведено по четыре линии сечения, профили которых показаны на рис.4. Линии сечений проведены по наиболее низким участкам, содержащим граничные области между зернами. Как видно из рис.4,*а* (зонд радиусом острия 4 нм), все четыре профиля имеют сравнительно плоские участки с минимальной высотой. Участки профилей соответствуют областям плоской подложки, лежащим между зернами. Длины этих участков 26, 15, 26 и 6 нм соответственно для профилей *1*, *2*, *3*, *4*. На основе наиболее крутых участков кривой профиля можно сделать оценку угла острия при вершине, поскольку угол наклона кривой профиля относительно вертикальной оси примерно соответствует половине угла острия при условии, что участок профиля образца вертикальный. Углы наклона наиболее крутых участков составляют 9, 10 и 12º соответственно для профилей *2*, *4* и *1* (см. рис.4,*а*). Это дает оценку для угла при вершине около 18–24º, что согласуется с РЭМ-измерениями. Для зонда радиусом 14 нм (см. рис.4,*б*) только на одном профиле имеется участок, соответствующий плоской подложке, длиной примерно 17 нм. Наиболее крутые участки профиля имеют значительно большую величину угла наклона (16–24º). Таким образом, зонд с радиусом острия 14 нм намного хуже прописывает рельеф поверхности тестового образца, чем зонд с радиусом острия 4 нм.

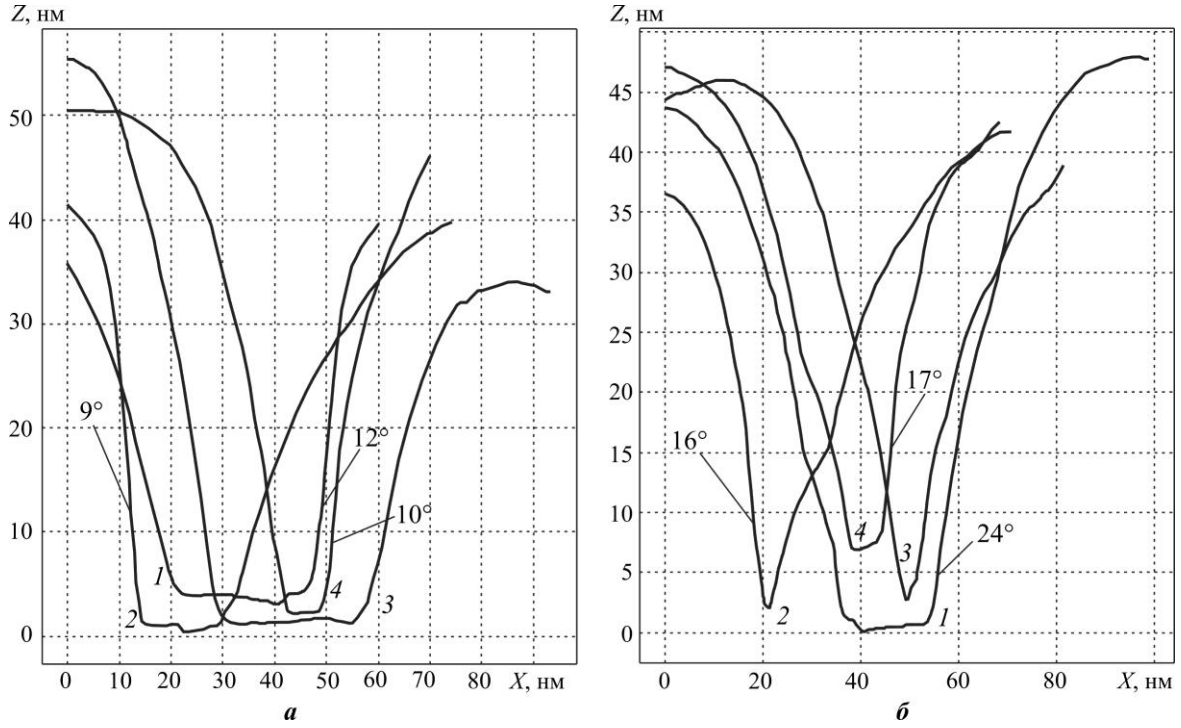


Рис.4. Профили сечений четырех участков для АСМ-изображений, измеренных кантилеверами с радиусом острия 4 (*а*) и 14 нм (*б*)

Fig.4. Section profiles of four regions for AFM-images, measured by cantilevers with a tip radius 4 (*a*) and 14 nm (*b*)

Для АСМ-изображений, полученных зондами с радиусами острия 14 и 4 нм, рассчитаны основные статистические параметры и функции, используемые для характеристики шероховатости поверхности [13]. При расчетах применялся программный пакет Image Analysis P9 (НТ МДТ). Оценку площади плоских участков для АСМ-изображений можно сделать с помощью функции распределения высот. Определено, что площадь низких точек поверхности, включающих темные (плоские) области на АСМ-изображении, по уровню 0,1 от Z_{max} составляет 3,5 % для АСМ-изображения, соответствующего острию радиусом 4 нм, и 0,4 % – острию радиусом 14 нм.

По результатам сравнения основных параметров, характеризующих шероховатость поверхности, установлено, что к остроте зонда наиболее чувствительным оказался параметр S_{dr} – относительное приращение площади поверхности (определяется как отношение разницы между полной площадью поверхности и площадью плоской поверхности к площади плоской поверхности). Так, для зонда с радиусом острия 4 нм (W/L = 0,46) S_{dr} составляет 80 %, тогда как для зонда с радиусом острия 14 нм $S_{dr} \approx$ 34 %. Это хорошо согласуется с данными работы [13], в которой описано влияние размеров зонда на основные статистические параметры поверхности, определяемые из АСМ-изображений HSG-Si-пленки. В частности, при значении аспектного отношении острия W/L = 0,46 (что соответствует зонду с радиусом острия 4 нм) S_{dr} составляет 78 % для зонда, имеющего параболическую форму. Значение S_{dr}, равное 80 %, полученное для АСМ-изображения, измеренного зондом с радиусом острия 4 нм, является близким к S_{dr} реальной поверхности HSG-Si-пленки, составляющей примерно 100 %, что оценивалось альтернативным методом [13, 14].

Заключение. В ходе проведенного исследования изучена зависимость формы, размеров и аспектного отношения изготовляемой иглы от концентрации раствора KOH в интервале 30–70 %. Иглы, изготовляемые при 70 %-ной концентрации, имеют наибольшую высоту (11–14 мкм при размере исходной маски 45 мкм) и аспектное отношение (1,3–1,5). Форма иглы образована четырьмя кристаллографическими плоскостями из {311} и четырьмя из {131}. Максимальная высота иглы, которая может быть получена при использовании раствора KOH с концентрацией 70 %, составляет 1/3 от диаметра круглой маски.

Иглы, изготовленные только анизотропным травлением в растворе KOH, имеют радиус кривизны 20–40 нм и значительный угол при вершине (~ 60°). Иглы, подвергнутые процессу заострения на основе пирогенного окисления, также имеют значительный радиус острия (~ 8–14 нм), угол при вершине ~ 40–50°. Двухэтапный процесс – пирогенное окисление и сухое окисление – позволяет получить довольно острые иглы, имеющие радиус острия 2–5 нм, угол при вершине 14–24° и аспектное отношение острия W/L = 0,33–0,56 при (L =100 нм).

Из статистических параметров, рассчитываемых на основе АСМ-изображений, параметр S_{dr} наиболее чувствителен к степени остроты зонда для поверхностей пленки типа HSG-Si. Так, для АСМ-изображения, измеренного острием радиусом 4 нм, S_{dr} составляет 80 %, а для острия радиусом 14 нм – S_{dr} = 34 %. Значение S_{dr} = 80 %, рассчитанное для АСМ-изображения, измеренного острием радиусом 4 нм, близко к S_{dr} реальной поверхности HSG-Si-пленки, которая составляет ~ 100 %.

Литература

1. ***Burt D.P., Dobson P.S., Donaldson L., Weaver J.M.R.*** A simple method for high yield fabrication of sharp silicon tips // Microelectronic Engineering. 2008. Vol. 85. Iss. 3. P. 625–630. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.11.010

2. ***Wolter O., Bayer Th., Greschner J.*** Micromachined silicon sensors for scanning force microscopy // Journal of Vacuum Science & Technology B. 1991. Vol. 9. No. 2. P. 1353–1357. DOI: https://doi.org/10.1116/1.585195

3. ***Li J., Xie J., Xue W., Wu D.*** Fabrication of cantilever with self-sharpening nano-silicon-tip for AFM applications // Microsystem Technologies. 2013. Vol. 19. Iss. 2. P. 285–290. DOI: https://doi.org/10.1007/s00542-012-1622-x

4. ***Zhang X., Yu X., Li T., Wang Y.*** A novel method to fabricate silicon nanoprobe array with ultra-sharp tip on (111) silicon wafer // Microsystem Technologies. 2018. Vol. 24. Iss. 7. P. 2913–2917. DOI: https://doi.org/10.1007/s00542-017-3687-z

5. ***Han J., Lu S., Li Q., Li X., Wang J.*** Anisotropic wet etching silicon tips of small opening angle in KOH solution with the additions of I_2/KI // Sensors and Actuators A: Physical. 2009. Vol. 152. No. 1. P. 75–79. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.03.008

6. ***Brugger J., Buser R.A., de Rooij N.F.*** Silicon cantilevers and tips for scanning force microscopy // Sensors and Actuators A: Physical. 1992. Vol. 34. No. 3. P. 193–200. DOI: https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)85002-J

7. ***Folch A., Wrighton M.S., Schmidt M.A.*** Microfabrication of oxidation-sharpened silicon tips on silicon nitride cantilevers for atomic force microscopy // Journal of Microelectromechanical Systems. 1997. Vol. 6. No. 4. P. 303–306. DOI: https://doi.org/10.1109/84.650126

8. Formation of silicon tips with <1 nm radius / ***R.B. Marcus, T.S. Ravi, T. Gmitter et al.*** // Applied Physics Letters. 1990. Vol. 56. No. 3. P. 236–238. DOI: https://doi.org/10.1063/1.102841

9. ***Ravi T.S., Marcus R.B., Liu D.*** Oxidation sharpening of silicon tips // Journal of Vacuum Science & Technology B. 1991. Vol. 9. No. 6. P. 2733–2737. DOI: https://doi.org/10.1116/1.585680

10. ***Dey R.K., Shen J., Cui B.*** Oxidation sharpening of silicon tips in the atmospheric environment // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2017. Vol. 35. No. 6. P. 06GC01. DOI: https://doi.org/10.1116/1.4998561

11. ***He H., Zhang J., Yang J., Yang F.*** Silicon tip sharpening based on thermal oxidation technology // Microsystem Technologies. 2017. Vol. 23. No. 6. P. 1799–1803. DOI: https://doi.org/10.1007/s00542-016-2941-0

12. ***Marcus R.B., Sheng T.T.*** The oxidation of shaped silicon surfaces // Journal of the Electrochemical Society. 1982. Vol. 129. No. 6. P. 1278–1282. DOI: https://doi.org/10.1149/1.2124118

13. ***Новак А.В., Новак В.Р.*** Оценка влияния размеров зонда на параметры морфологии поверхности пленок кремния с полусферическими зернами, получаемые методом атомно-силовой микроскопии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 9. С. 70–80. DOI: https://doi.org/10.7868/S0207352816090109

14. ***Новак А.В.*** Формирование пленок поликристаллического кремния с полусферическими зернами для конденсаторных структур с повышенной емкостью // Изв. вузов. Электроника. 2013. № 6 (104). С. 10–16.

15. ***Новак А.В., Новак В.Р., Смирнов Д.И., Румянцев А.В.*** Особенности морфологии и структуры тонких пленок кремния // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 2. С. 60–66. DOI: https://doi.org/10.31857/S1028096021020114

16. ***Zubel I.*** Silicon anisotropic etching in alkaline solutions III: On the possibility of spatial structures forming in the course of Si(100) anisotropic etching in KOH and KOH+IPA solutions // Sensors and Actuators A: Physical. 2000. Vol. 84 (1-2). P. 116–125. DOI: https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00347-7

Поступила в редакцию 05.02.2020 г.; после доработки 29.03.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

Новак Андрей Викторович – кандидат технических наук, руководитель лаборатории осаждения тонких пленок АО «Ангстрем» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 2/3), старший преподаватель кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Novak@angstrem.ru

Новак Виктор Рудольфович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ООО «НТ-МДТ Спектрум Инструментс» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, пр-д 4922, 4/3), novak@ntmdt.ru

Румянцев Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии, доцент кафедры общей физики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), lemi@miee.ru

References

1. Burt D.P., Dobson P.S., Donaldson L., Weaver J.M.R. A simple method for high yield fabrication of sharp silicon tips. *Microelectronic Engineering*, 2008, vol. 85, iss. 3, pp. 625–630. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.11.010

2. Wolter O., Bayer Th., Greschner J. Micromachined silicon sensors for scanning force microscopy. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1991, vol. 9, no. 2, pp. 1353–1357. DOI: https://doi.org/10.1116/1.585195

3. Li J., Xie J., Xue W., Wu D. Fabrication of cantilever with self-sharpening nano-silicon-tip for AFM applications. *Microsystem Technologies*, 2013, vol. 19, issue 2, pp. 285–290. DOI: https://doi.org/10.1007/s00542-012-1622-x

4. Zhang X., Yu X., Li T., Wang Y. A novel method to fabricate silicon nanoprobe array with ultra-sharp tip on (111) silicon wafer. *Microsystem Technologies*, 2018, vol. 24, issue 7, pp. 2913–2917. DOI: https://doi.org/10.1007/s00542-017-3687-z

5. Han J., Lu S., Li Q., Li X., Wang J. Anisotropic wet etching silicon tips of small opening angle in KOH solution with the additions of I_2/KI. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, vol. 152, no. 1, pp. 75–79. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.03.008

6. Brugger J., Buser R.A., de Rooij N.F. Silicon cantilevers and tips for scanning force microscopy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1992, vol. 34, no. 3, pp. 193–200. DOI: https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)85002-J

7. Folch A., Wrighton M.S., Schmidt M.A. Microfabrication of oxidation-sharpened silicon tips on silicon nitride cantilevers for atomic force microscopy. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, vol. 6, no. 4, pp. 303–306. DOI: https://doi.org/10.1109/84.650126

8. Marcus R.B., Ravi T.S., Gmitter T., Chin K., Liu D., Orvis W.J., Ciarlo D.R., Hunt C.E., Trujillo J. Formation of silicon tips with <1 nm radius. *Applied Physics Letters*, 1990, vol. 56, no. 3, pp. 236–238. DOI: https://doi.org/10.1063/1.102841

9. Ravi T.S., Marcus R.B., Liu D. Oxidation sharpening of silicon tips. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1991, vol. 9, no. 6, pp. 2733–2737. DOI: https://doi.org/10.1116/1.585680

10. Dey R.K., Shen J., Cui B. Oxidation sharpening of silicon tips in the atmospheric environment. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2017, vol. 35, no. 6, pp. 06GC01. DOI: https://doi.org/10.1116/1.4998561

11. He H., Zhang J., Yang J., Yang F. Silicon tip sharpening based on thermal oxidation technology. *Microsystem Technologies*, 2017, vol. 23, no. 6, pp. 1799–1803. DOI: https://doi.org/10.1007/s00542-016-2941-0

12. Marcus R.B., Sheng T.T. The oxidation of shaped silicon surfaces. *Journal of the Electrochemical Society*, 1982, vol. 129, no. 6, pp. 1278–1282. DOI: https://doi.org/10.1149/1.2124118

13. Novak A.V., Novak V.R. Influence of the probe sizes on the parameters of the surface morphology of hemispherical-grain polysilicon films: estimation via atomic-force microscopy. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2016, vol. 10, no. 5, pp. 949–958. DOI: https://doi.org/10.1134/S1027451016050104

14. Novak A.V. Formation of polycrystalline-silicon films with hemispherical grains for capacitor structures with increased capacitance. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, iss. 13, pp. 1724–1728. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063782614130119

15. Novak A.V., Novak V.R., Smirnov D.I., Rumyantsev A.V. Features of the morphology and structure of thin silicon films. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 152–157.

16. Zubel I. Silicon anisotropic etching in alkaline solutions III: On the possibility of spatial structures forming in the course of Si(100) anisotropic etching in KOH and KOH+IPA solutions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 84 (1-2), pp. 116–125. DOI: https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00347-7

Received 05.02.2020; Revised 29.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

Andrey V. Novak – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Thin Film Deposition Laboratory, JSC «Angstrem» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 2/3), Senior Lecturer of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Novak@angstrem.ru

Victor R. Novak – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, LLC «NT-MDT Spectrum Instruments» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, proezd 4922, 4/3), novak@ntmdt.ru

Alexander V. Rumyantsev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher of the Electron Microscopy Laboratory, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), lemi@miee.ru

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



RUSSIAN MICROELECTRONICS
Vol. 49, *No.* 7, 2020. - ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,
в котором опубликованы избранные статьи журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».
http://pleiades.online
http://link.springer.com

УДК 621.3.049.77:[539.23:621.359] DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-246-254

Формирование пленок тройной системы CoNiFe электрохимическим осаждением

Р.Д. Тихонов[1], С.А. Поломошнов[1], В.В. Амеличев[1], А.А. Черемисинов[1], А.М. Ковалев[2]

[1]НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

R.Tikhonov@tcen.ru

Магнитомягкие тонкие пленки тройной системы CoNiFe являются основой для хранения магнитных данных с высокой плотностью. Электрохимическое осаждение пленок тройной системы CoNiFe по сравнению с «сухими» процессами дает более однородное покрытие с меньшим количеством дефектов и позволяет увеличить толщину пленок без механических напряжений. В работе изучена природа явлений, происходящих в электролите для электрохимического осаждения пленок CoNiFe и приводящих к различию относительного содержания элементов в электролите и пленке. Экспериментально исследован водородный показатель хлоридных электролитов в диапазоне температур 25–70 °С. Проведено электрохимическое осаждение пленок CoNiFe при температуре 70 °С. Показано, что растворы солей $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ при концентрации от 0,006 до 1 моль/л характеризуются сложным процессом образования ионного баланса в одиночных и смешанных растворах. Осаждение пленок CoNiFe проведено из хлоридного электролита с отношением содержания компонентов 1:1:1 при средней концентрации 0,083 моль/л каждого компонента. Установлено, что содержание компонентов в пленке при электрохимическом осаждении из трехкомпонентного раствора солей $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ с равной концентрацией каждого компонента не соответствует составу электролита, но приближается к нему при уменьшении концентрации каждого компонента при большой плотности тока.

Ключевые слова: пленки CoNiFe; хлоридный электролит; ионный баланс; электрохимическое осаждение

Благодарности: работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр» (г. Москва).

Для цитирования: Формирование пленок тройной системы CoNiFe электрохимическим осаждением / Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, В.В. Амеличев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 246–254. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-246-254

© Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, В.В. Амеличев, А.А. Черемисинов, А.М. Ковалев, 2021

CoNiFe Triple System Films Formation by Electrochemical Deposition

R.D. Tikhonov[1], S.A. Polomoshnov[1], V.V. Amelichev[1], A.A. Cheremisinov[1], A.M. Kovalev[2]

[1]SMC «Technological Centre», Moscow, Russia
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

R.Tikhonov@tcen.ru

Abstract: High-permeability films of CoNiFe triple system form the basis for high-density magnetic data storage. Electrochemical deposition of CoNiFe films, as contrasted with «dry» processes, gives more homogeneous coating with lesser defect level and allows reinforcing the films thickness without stresses. This study investigates the nature of the phenomena taking place at electrochemical deposition of CoNiFe films and leading to the difference in the relative content of the elements in the electrolyte and in the film. The hydrogen exponent of chloride electrolytes was examined in the temperature range of 25–70 °C and electrochemical deposition of CoNiFe films at 70 °C was studied. It was demonstrated that $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ salt solutions with concentration from 0,006 to 1 mole/l are characterized by complex process of ion balance formation in single and mixed solutions. The deposition of CoNiFe films was carried out from chloride electrolyte with a component content ratio of 1:1:1 at an average concentration of 0,083 mole/l of each component. It has been established that the content of the component in the film at electrochemical deposition of three-component solution $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ with equal concentration of each component did not correspond to the composition of the electrolyte but was closest to the composition of the electrolyte at a decrease in the concentration of each component at high current density.

Keywords: CoNiFe films; chloride electrolyte; ion balance; electrochemical deposition

Acknowledgments: this study work has been performed using the equipment of the Centre for collective use «Functional control and diagnostics of micro- and nanosystem technology on the basis of the SMC «Technological Centre» (Moscow).

For citation: Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Amelichev V.V., Cheremisinov A.A., Kovalev A.M. CoNiFe triple system films formation by electrochemical deposition. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 246–254. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-246-254

Введение. Магнитомягкий тройной сплав CoNiFe применяется в изделиях нано- и микроэлектроники, а также в магнитной памяти с высокой плотностью упаковки [1–4]. Электрохимическое покрытие CoNiFe снижает коррозию и износ в магнитных и электрических устройствах, а также используется для электрокаталитических материалов. Электрохимическое осаждение пленок тройной системы CoNiFe по сравнению с «сухими» процессами дает более однородное покрытие с меньшим количеством дефектов и позволяет при необходимости увеличивать толщину пленок без механических напряжений.

В работе [1] рассматриваются тонкие магнитные пленки $Co_{65}Ni_{12}Fe_{23}$, изготовленные из сульфатного электролита. Такие пленки имеют высокое насыщение намагничивания (2,4–2,59 Тл). При добавлении в электролит хлорида аммония изменяется соотношение компонентов в пленках CoNiFe: происходит обогащение железом или никелем [2]. В результате улучшаются магнитные свойства, снижается коэрцитивная сила и растет магнитная проницаемость. Пленки CoNiFe, полученные электролитическим осаждением из сульфатного электролита, имеют структуру нанокомпозитов [3]. Математическая модель, описывающая электроосаждение нанометровых многослойных магниточувствительных структур FeCoNiCu/Cu, разработана для получения нанопроволок [4].

Осаждение электрохимическим методом пленок CoNiFe из сульфатно-хлоридного электролита [5], содержащего, моль/л: $NiSO_4$ – 0,304, $NiCl_2$ – 0,084, $CoSO_4$ – 0,1, $FeSO_4$ – 0,036 и H_3BO_3 – 20 г/л, показало, что кобальт и железо осаждаются с концентрацией в три раза большей, чем в электролите, а никель – с концентрацией в два раза меньшей. Аномальность зависимости состава пленок тройного сплава от состава электролита не позволяет привести в соответствие состав пленок и состав электролита. Несмотря на то что пленки CoNiFe успешно применяются в микроэлектронике, природа явлений, определяющих химические процессы в электролите и состав пленок, остается невыясненной и требует дальнейших исследований.

Ряд напряжений металлов характеризует их сравнительную активность в окислительно-восстановительных реакциях в водных растворах. Электрохимические потенциалы φ_0 составляют, В: Fe^{2+} – 0,441; Fe^{3+} – 0,0425; Co^{2+} – 0,28; Ni^{2+} – 0,234. Поэтому никель должен осаждаться лучше, чем железо и кобальт, а железо – хуже, чем кобальт. Экспериментальные данные по зависимости состава пленок от состава электролита при электрохимическом осаждении сплавов CoNi, CoFe, NiFe представлены в работах [6, 7] для NiFe, [8, 9] для CoNi, [10] для CoFe.

В работе [6] впервые показана аномальность осаждения железа по отношению к никелю в диапазоне концентраций железа в электролите 5–50 % для осаждения сплава NiFe и зависимость концентрации железа в пленке от плотности тока. В работе [7] аномальность осаждения железа по отношению к никелю демонстрируется при всех концентрациях железа в электролите для осаждения сплава NiFe. В диапазоне концентраций кобальта в электролите до 30 % для осаждения сплава CoNi происходит осаждение пленки с содержанием кобальта до 80 % [8]. В диапазоне концентраций кобальта в электролите 50–85 % для осаждения сплава CoNi происходит осаждение пленки с содержанием кобальта 60–95 % [9]. В диапазоне концентраций железа в электролите 3–40 % для осаждения сплава CoFe происходит осаждение пленки с содержанием железа до 60% [10].

Таким образом, для электрохимического осаждения металлов группы железа характерна аномальность осаждения. Железо осаждается более интенсивно, чем кобальт и никель, кобальт осаждается более интенсивно, чем никель. Оценка скорости осаждения по электрохимическим потенциалам важна, но существует много факторов проведения процессов, определяющих осаждение металлов. Аномальность осаждения проявляется также в тройном сплаве CoNiFe. Согласно экспериментальным данным, состав пленок зависит от температуры, водородного показателя pH, концентрации и состава электролита.

В настоящей работе для выяснения действия факторов, определяющих отклонение состава пленок CoNiFe от состава электролита, исследуется зависимость водородного показателя от температуры хлоридных электролитов с одинаковой концентрацией ком-

понентов и электрохимическое осаждение пленок CoNiFe при температуре 70 °С, которое обеспечивает нормальное и конгруэнтное осаждение сплава NiFe [11, с. 193; 12].

Исследование pH растворов солей $CoCl_2$ $6H_2O$, $NiCl_2$ $6H_2O$, $FeCl_2$ $4H_2O$. Водородный показатель pH в водных растворах солей $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ с концентрацией компонентов 0,01–1 моль/л измерялся с помощью pH-метра testo 206 фирмы Testo SE Co. KGaA (Германия). При концентрации 1 моль/л и температуре 25 °С получены следующие значения pH: $NiCl_2$ – 5,8; $CoCl_2$ – 4,7; $FeCl_2$ – 2,7 [13]. Показатель pH смешанного электролита во всем диапазоне изменения концентраций каждого компонента от 0,01 до 1 моль/л тройного электролита с равными концентрациями всех трех солей $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ определялся фактически гидролизом хлорида железа.

Зависимость показателя pH от температуры растворов с концентрацией 0,083 моль/л каждого компонента приведена на рис.1. Повышение температуры до 70 °С усиливает гидролиз. На рис.2 показана зависимость pH смешанного электролита от концентрации для осаждения сплава CoNiFe. Видно, что повышение температуры от 25 до 70 °С усиливает гидролиз смешанного электролита в диапазоне концентраций 0,004–0,5 моль/л практически равномерно.

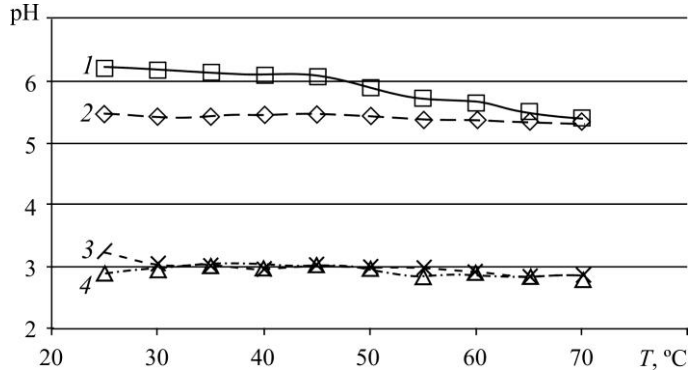


Рис.1. Зависимость pH от температуры электролита для осаждения сплава CoNiFe с концентрацией 0,083 моль/л каждого компонента по отдельности и в смеси (□ – кобальт; ◊ – никель; × – CoNiFe; Δ – железо)
Fig.1. Dependence of electrolyte pH for the deposition of the CoNiFe alloy with concentrations of 0.083 mole/l of each component separately and in a mixture at a temperature of 25 to 70 °C (□ – cobalt; ◊ – nickel; × – CoNiFe; Δ – iron)

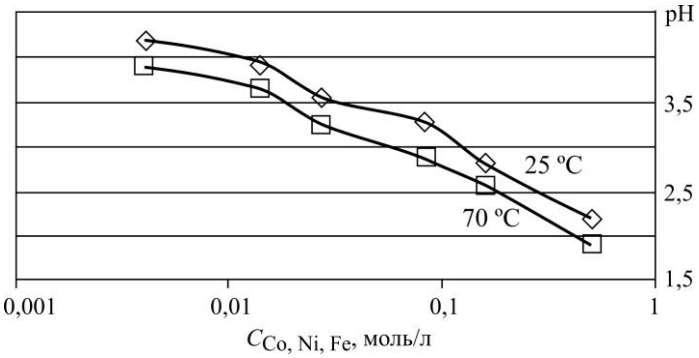


Рис.2. Зависимость pH электролита для осаждения сплава CoNiFe от концентрации C_{CoNiFe} при температуре 25 и 70 °С
Fig.2. Dependence of electrolyte pH for the deposition of the CoNiFe on the concentrations C_{CoNiFe} at a temperature of 25 to 70 °C

Таким образом, в результате экспериментального исследования водородного показателя pH растворов солей $FeCl_2$, $NiCl_2$ и $CoCl_2$ получены изменения гидролиза солей в одиночных и смешанных растворах в зависимости от температуры и концентрации.

Электрохимическое осаждения пленок CoNiFe при разной концентрации электролита. Измерения толщины пленок концентраторов проведены с использованием анализатора микросистем MSA-500. Состав пленочных концентраторов магнитного поля исследовали с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора PhilipsXL 40. Состав пленок, полученных электрохимическим осаждением из трехкомпонентного раствора солей $FeCl_2$, $CoCl_2$, $NiCl_2$ с концентрацией каждого компонента 0,006 моль/л, обеспечивает [13] содержание компонентов в пленке, близкое к содержанию состава электролита.

В трехкомпонентном растворе солей $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ с концентрацией каждого компонента 0,48 моль/л при такой же плотности тока на катоде и температуре, как и с концентрацией 0,083 моль/л, содержание компонентов не соответствует составу электролита. Влияние плотности электрического тока на катоде в диапазоне 5–20 мА/см^2 на состав пленок исследовано при электрохимическом осаждении из электролита с концентрацией примесей 0,48 моль/л (рис.3). Относительное содержание компонентов Co, Ni, Fe в пленке отличается от состава электролита и существенно меняется в зависимости от плотности тока. Подобрать плотность тока для получения состава пленки, равного составу электролита, не представляется возможным.

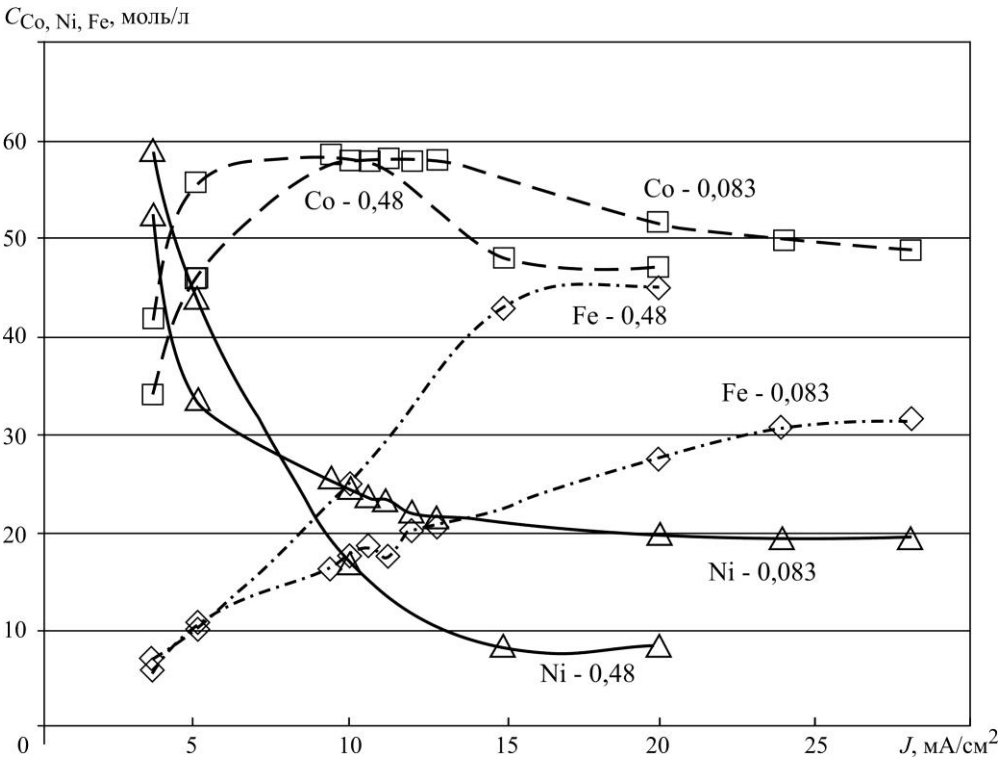


Рис.3. Зависимость состава пленок CoNiFe от плотности тока при осаждении из трехкомпонентного раствора солей $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ с концентрацией C_{CoNiFe}, равной 0,48 или 0,083 моль/л

Fig.3. Dependence on current density of CoNiFe film composition when deposited from three-component salt solutions $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ with concentration C_{CoNiFe} equal to 0.48 mole/l or 0.083 mole/l

Исследовано относительное содержание компонентов Co, Ni, Fe в пленке при осаждении из состава электролита с концентрацией 0,083 моль/л каждого компонента, равной 33,3 %. Результаты приведены на рис.3. Наблюдается слабая зависимость содержания компонентов от плотности тока больше 25 мА/см^2. В пленке CoNiFe содержание никеля составляет 19–22 %, железа – 28–33 %, кобальта – 55–47 %. При плотности тока менее 25 мА/см^2 состав пленки CoNiFe существенно изменяется: содержание никеля увеличивается с 19 до 57 % , содержание железа уменьшается с 28 до 5 %, а содержание кобальта составляет 55–42 %.

Сравнение зависимостей состава пленок от плотности тока, полученных из трехкомпонентного раствора солей $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ с концентрацией каждого компонента Co, Ni, Fe, равной 0,48 моль/л или 0,083 моль/л, показало следующее. Преобладание осаждения кобальта сохраняется при всех концентрациях электролита. Повышение плотности тока приводит к уменьшению содержания никеля и повышению содержания железа. Уменьшение концентрации электролита до 0,083 моль/л в области стабилизации зависимости состава пленок от плотности тока 28 мА/см^2 приближает концентрацию никеля и железа в пленке к составу компонентов в электролите. Кобальт осаждается с концентрацией в 1,44 раза большей, чем в электролите, железо – с концентрацией в 0,97 раза меньшей, чем в электролите, никель – с концентрацией в 0,54 раза меньшей, чем в электролите.

В экспериментах по электрохимическому осаждению пленок CoNiFe из хлоридного электролита с мольным отношением 1:1:1 и содержанием компонентов $CoCl_2{\cdot}6H_2O$; $NiCl_2{\cdot}6H_2O$; $FeCl_2{\cdot}4H_2O$ с составом 0,48; 0,083; 0,006 моль/л соответственно проявляется сильная зависимость состава пленок от напряжения между анодом и катодом и концентрации солей в электролите. От концентрации электролита зависит падение напряжения на электродах анода и катода при заданной плотности тока. Скорость осаждения пленок CoNiFe определяется плотностью тока. Изменение состава при больших напряжениях может быть связано с изменением скорости массопереноса в электролите за счет дрейфа ионов в электрическом поле.

Результаты и их обсуждение. Проведенное экспериментальное исследование водородного показателя pH растворов солей $CoCl_2$, $NiCl_2$ и $FeCl_2$ при разной концентрации показывает, как происходит реакция гидролиза в растворах. На диссоциацию молекул соли при гидролизе оказывает влияние несколько факторов:

- хлориды кобальта, никеля и железа образованы слабыми основаниями и сильной кислотой и гидролизуются по аниону. Наиболее сильно гидролизуется хлорид железа (см. рис.2);
- степень гидролиза растет при разбавлении, но рост концентрации тройного электролита приводит к общему увеличению количества молекул, подвергшихся гидролизу (см. рис.3);
- в диапазоне температуры 25–70 °C гидролиз растворов солей $CoCl_2$, $NiCl_2$ и $FeCl_2$ с концентрацией 0,083 моль/л усиливается незначительно;
- при концентрации 0,083 моль/л водородный показатель pH растворов солей $CoCl_2$, $NiCl_2$ не оказывает влияния на pH трехкомпонентного раствора, который определяется гидролизом $FeCl_2$.

Ионные равновесия в электролите $FeCl_2$ определялись в работе [14] с помощью термодинамического расчета констант равновесия и уравнений баланса массы и заряда. В отличие от принятой полной диссоциации солей в электролите в растворе $FeCl_2$ происходит образование однократно заряженных ионов $(Fe^{2+}Cl^-)^+$, а количество ионов Fe^{2+} меньше. По сравнению с двухзарядными ионами количество однозарядных ионов

$CoCl^+$ и $NiCl^+$ в растворах в 10 раз меньше, а нейтральных молекул хлоридов совсем мало [15]. Согласно этим расчетам заряд ионов в растворах солей $CoCl_2$, $NiCl_2$, $FeCl_2$ отличается от валентности металлов в солях.

Результаты электрохимического осаждения из трехкомпонентного раствора солей $FeCl_2$, $CoCl_2$, $NiCl_2$ с равной концентрацией каждого компонента показывают, что содержание компонентов в пленке не соответствует составу электролита. Состав электролита приближается к составу пленки CoNiFe при уменьшении концентрации каждого компонента в электролите.

Для получения соответствия составов пленки CoNiFe и электролита необходимо учитывать все факторы, влияющие на ионный баланс электролитов и парциальные токи ионов.

Заключение. Использование технологии приготовления электролита с фильтрацией и проведение процесса осаждения при температуре 70° С обеспечивают выбор хлоридного электролита с отношением $C_{Co}/C_{Ni}/C_{Fe}$ = 1/1/1. Установлено, что отношение концентраций в пленке $C_{Co}/C_{Ni}/C_{Fe}$ = 1/1/1 достигается при снижении концентрации каждого компонента в электролите при большой плотности тока.

Пленки CoNiFe при электрохимическом осаждении получены воспроизводимо с минимальными механическими напряжениями и адгезией к подслою никеля.

Литература

1. ***Tabakovic I., Venkatasamy V.*** Preparation of metastable CoFeNi alloys with ultra-high magnetic saturation (B_s = 2.4–2.59 T) by reverse pulse electrodeposition // J. of Magn. and Magn. Mat. 2018. Vol. 452. P. 306–314. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.12.003

2. Electroplated Fe-Co-Ni films prepared in ammonium-chloride-based plating baths / ***T. Yanai, K. Koda, J. Kaji et al.*** // AIP Advances. 2018. Vol. 8. Iss. 5. P. 056127. DOI: https://doi.org/10.1063/1.5007782

3. ***Romankov S., Park Y.C., Shchetinin I.V.*** Mechanical intermixing of elements and self-organization of (FeNi) and (CoFeNi) nanostructured composite layers on a Ti sheet under ball collisions // J. of Alloys and Comp. 2015. Vol. 653. P. 175–186. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.269

4. ***Li D., Podlaha E.*** Template-assisted electrodeposition of Fe-Ni-Co nanowires: Effects of electrolyte pH and sodium lauryl sulfate // J. Electrochem. Soc. 2017. Vol. 164 (13). P. D843–D851. DOI: https://doi.org/10.1149/2.0931713jes

5. ***Yang Y.*** Preparation of Fe-Co-Ni ternary alloys with electrodeposition // Int. J. Electrochem. Sci. 2015. Vol. 10. Issue 6. P. 5164–5175.

6. ***Коровин Н.В.*** О катодном процессе при электроосаждении сплава железо-никель // Журнал неорганической химии. 1957. Т. 2. № 9. С. 2259–2263.

7. Mechanism of anomalous type electrodeposition of Fe-Ni alloys from sulfate solutions / ***H. Nakano, M. Matsuno, S. Oue et al.*** // Mater. Trans. 2004. Vol. 45. No. 11. P. 3130–3135.

8. Microstructure and tribological properties of electrodeposited Ni–Co alloy deposits / ***L. Wang, Y. Gao, Q. Xue et al.*** // Appl. Surf. Sci. 2005. Vol. 242 (3-4). P. 326–332. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.08.033

9. The influence of saccharin on the electrodeposition and properties of Co–Ni alloy thin films / ***S. Tebbakh, Y. Messaoudi, A. Azizi et al.*** // Transactions of the IMF – The International Journal of Surface Engineering and Coatings. 2015. Vol. 93 (4). P. 196–204. DOI: https://doi.org/10.1179/0020296715Z.000000000247

10. Preparation, structure and giant magnetoresistance of electrodeposited Fe-Co/Cu multilayers / ***B.G. Tóth, L. Péter, L. Pogány et al.*** // J. Electrochem. Soc. 2014. Vol. 161 (4). P. D154–D162. DOI: https://doi.org/10.1149/2.053404jes

11. ***Tikhonov R.*** Congruent electrochemical deposition of NiFe alloy: The results of the research. Beau Bassin: Lambert Academic Publishing, 2019. 204 p.

12. ***Тихонов Р.Д.*** Электрохимическое осаждение сплава NiFe при температуре 70 ºС // Электрохимия. 2020. Т. 56. № 7. С. 666–669. DOI: https://doi.org/10.31857/S0424857020070063

13. ***Тихонов Р.Д., Черемисинов А.А., Горелов Д.В., Казаков Ю.В.*** Магнитные свойства пленок Co-Ni-Fe, полученных электрохимическим осаждением по методу Тихонова // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22. № 3. С. 123–135. DOI: https://doi.org/10.17587/nmst.22.123-135

14. ***Lee M.-S.*** Use of the bromley equation for the analysis of ionic equilibria in mixed ferric and ferrous chloride solutions at 25 °C // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37 (2). P. 173–179. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02693146

15. ***Lee M.-S., Oh Y.-J.*** Chemical equilibria in a mixed solution of nickel and cobalt chloride // Mater. Trans. 2005. Vol. 46 (1). P. 59–63. DOI: https://doi.org/10.2320/matertrans.46.59

Поступила в редакцию 09.03.2020 г.; после доработки 09.03.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

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

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

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

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

Ковалев Алексей Михайлович – сотрудник научно-исследовательской лаборатории интегральных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), A.kovalev@gmail.com

References

1. Tabakovic I., Venkatasamy V. Preparation of metastable CoFeNi alloys with ultra-high magnetic saturation (B_s = 2.4–2.59 T) by reverse pulse electrodeposition. *J. of Magn. and Magn. Mat.*, 2018, vol. 452, pp. 306–314. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.12.003

2. Yanai T., Koda K., Kaji J., Aramaki H., Eguchi K., Takashima K., Nakano M., Fukunaga H. Electroplated Fe-Co-Ni films prepared in ammonium-chloride-based plating baths. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, iss. 5, pp. 056127. DOI: https://doi.org/10.1063/1.5007782

3. Romankov S., Park Y.C., Shchetinin I.V. Mechanical intermixing of elements and self-organization of (FeNi) and (CoFeNi) nanostructured composite layers on a Ti sheet under ball collisions. *J. of Alloys and Comp.*, 2015, vol. 653, pp. 175–186. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.269

4. Li D., Podlaha E. Template-assisted electrodeposition of Fe-Ni-Co nanowires: Effects of electrolyte pH and sodium lauryl sulfate. *J. Electrochem. Soc.*, 2017, vol. 164 (13), pp. D843–D851. DOI: https://doi.org/10.1149/2.0931713jes

5. Yang Y. Preparation of Fe-Co-Ni ternary alloys with electrodeposition. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2015, vol. 10, iss. 6, pp. 5164–5175.

6. Korovin N.V. About cathode process at the electrodeposition of Fe-Ni alloy. *Zhurnal neorganicheskoy khimii = Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1957, vol. 2, no. 9, pp. 2259–2263. (In Russian).

7. Nakano H., Matsuno M., Oue S., Yano M., Kobayashi Sh., Fukushima H. Mechanism of anomalous type electrodeposition of Fe-Ni alloys from sulfate solutions. *Mater. Trans.*, 2004, vol. 45, no. 11, pp. 3130–3135.

8. Wang L., Gao Y., Xue Q., Liu H., Xu T. Microstructure and tribological properties of electrodeposited Ni–Co alloy deposits. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, vol. 242 (3-4), pp. 326–332. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.08.033

9. Tebbakh S., Messaoudi Y., Azizi A., Fenineche N., Schmerber G., Dinia A. The influence of saccharin on the electrodeposition and properties of Co–Ni alloy thin films. *Transactions of the IMF – The International*

Journal of Surface Engineering and Coatings, 2015, vol. 93 (4), pp. 196–204. DOI: https://doi.org/10.1179/0020296715Z.000000000247

10. Tóth B.G., Péter L., Pogány L., Revesz A., Bakonyi I. Preparation, structure and giant magnetoresistance of electrodeposited Fe-Co/Cu multilayers. *J. Electrochem. Soc.*, 2014, vol. 161 (4), pp. D154–D162.
DOI: https://doi.org/10.1149/2.053404jes

11. Tikhonov R. *Congruent Electrochemical Deposition of NiFe Alloy: The Results of the Research*. Beau Bassin, Lambert Academic Publishing, 2019. 204 p.

12. Tikhonov R.D. Electrochemical deposition of NiFe alloy at 70 °C. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2020, vol. 56, no. 7, pp. 666–669. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31857/S0424857020070063

13. Tikhonov R.D., Cheremisinov A.A., Gorelov D.V., Kazakov Iu.V. The magnetic properties of the Co-Ni-Fe films were obtained by electrochemical deposition by Tikhonov's method. *Nano- and Microsystemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 12–135. (In Russian).
DOI: https://doi.org/10.17587/nmst.22.123-135

14. Lee M.-S. Use of the bromley equation for the analysis of ionic equilibria in mixed ferric and ferrous chloride solutions at 25 °C. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2006, vol. 37 (2), pp. 173–179. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02693146

15. Lee M.-S., Oh Y.-J. Chemical equilibria in a mixed solution of nickel and cobalt chloride. *Mater. Trans.*, 2005, vol. 46 (1), pp. 59–63. DOI: https://doi.org/10.2320/matertrans.46.59

Received 09.03.2020; Revised 09.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

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

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

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

Andrey A. Cheremisinov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Microelectronics and Microsensorics, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), CheremisinovAA@gmail.com

Alexey M. Kovalev **–** Staff Member of the Research Laboratory of Integrated Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), A.kovalev@gmail.com

Уважаемые авторы!

С правилами оформления и опубликования научных статей можно ознакомиться на нашем сайте:
http://ivuz-e.ru

УДК 621.396.6.049.76:658.512.2 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-255-264

Инженерные расчеты узлов и сборок изделий микроэлектронной техники с применением конечно-элементного моделирования

Е.Ю. Чугунов, А.И. Погалов, С.П. Тимошенков

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

dtm@miee.ru

В условиях повышения степени интеграции электронных компонентов, роста функциональности, плотности компоновки, а также снижения массы и габаритов электроники требуется комплексный подход к инженерным расчетам узлов и сборок современных технически сложных изделий микроэлектронной техники, разрабатываемых функционально. Особое значение приобретают инженерный расчет и моделирование конструкций с использованием систем автоматизированного проектирования, а также оценка влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на надежность и работоспособность изделий. В работе представлен подход к проведению инженерных расчетов и моделированию изделий микроэлектронной техники на основе метода конечных элементов, который обеспечивает комплексный учет влияния различных факторов (свойств материалов, воздействия внешних нагрузок, температурных полей и прочих параметров) на напряженно-деформированное состояние, механическую прочность, тепловой режим и другие характеристики изделий. На примере узлов и сборок изделий микроэлектронной техники показана аппроксимация конструкций и разработаны компьютерные конечно-элементные модели для изучения различных конструктивно-технологических вариантов изделий и воздействий на них. Проведены инженерные расчеты и моделирование узлов и сборок с учетом влияния свойств материалов, конструктивных параметров и внешних воздействий на характеристики изделий. Выработаны научно-технические рекомендации по оптимизации конструкций и конструктивно-технологические решения, обеспечивающие устойчивость изделий к различным воздействиям. Показано, что комплексный подход к инженерным расчетам и моделированию изделий микроэлектронной техники на основе метода конечных элементов обеспечивает определение оптимальных решений с учетом конструктивных, технологических, эксплуатационных факторов и позволяет разрабатывать изделия с высокими тактико-техническими и эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: проектирование изделий электронной техники; инженерный расчет конструкций; метод конечных элементов; аппроксимация конструкций; конечно-элементное моделирование

© Е.Ю. Чугунов, А.И. Погалов, С.П. Тимошенков, 2021

Для цитирования: Чугунов Е.Ю., Погалов А.И., Тимошенков С.П. Инженерные расчеты узлов и сборок изделий микроэлектронной техники с применением конечно-элементного моделирования // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 255–264. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-255-264

Engineering Calculations of Microelectronic Products Parts and Assemblies Using Finite-Element Modeling

E.Y. Chugunov, A.I. Pogalov, S.P. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

dtm@miee.ru

Abstract: In the context of increasing the electronic components integration level, growing functionality and packaging density, as well as reducing the electronics weight and size, an integrated approach to engineering calculations of parts and assemblies of modern functionally and technically complex microelectronic products is required. Of particular importance are engineering calculations and structural modeling using computer-aided engineering systems, and also assessment of structural, technological and operational factors' impact on the products reliability and performance. This work presents an approach to engineering calculations and microelectronic products modeling based on the finite-element method providing a comprehensive account of various factors (material properties, external loading, temperature fields, and other parameters) impact on the stress-strain state, mechanical strength, thermal condition, and other characteristics of products. On the example of parts and assemblies of products of microelectronic technology, the approximation of structures was shown and computer finite-element models were developed to study various structural and technological options of products and the effects on them. Engineering calculations and modeling of parts and assemblies were performed, taking into account the impact of material properties, design parameters and external influences on the products' characteristics. Scientific and technical recommendations for structure optimization and design and technology solutions ensuring the products resistance to diverse effects were developed. It has been shown that an integrated approach to engineering calculations and microelectronic products modeling based on the finite-element method provides for the determination of optimal solutions taking into account structural, technological, and operational factors and allows the development of products with high tactical, technical and operational characteristics.

Keywords: electronic product design; structural engineering and analysis; finite-element method; structure approximation; finite-element modeling

For citation: Chugunov E.Y., Pogalov A.I., Timoshenkov S.P. Engineering calculations of microelectronic products parts and assemblies using finite-element modeling. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 255–264. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-255-264

Введение. Разработка методик и подходов к инженерным расчетам современных функционально и технически сложных изделий микроэлектронной техники (МЭТ) с учетом влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на надежность и работоспособность изделий является актуальной задачей. Для расчетов и моделирования функционально и технически сложных изделий МЭТ применяются системы автоматизированного проектирования, среди которых широкое распространение получили вычислительные программные комплексы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ). К преимуществам МКЭ относятся возможность расчета конструкций произвольной геометрии и формы, в том числе из разнородных материалов, способность определения значений в любых точках конструкций с учетом свойств и формы конструкционных материалов, высокая эффективность моделирования [1–3].

На основе МКЭ созданы программные комплексы для конечно-элементного моделирования и анализа влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на характеристики изделий. Разработка моделей для конечно-элементного моделирования основывается на использовании достоверных физико-механических характеристик конструкционных материалов, выявлении наиболее значимых факторов, использовании неравномерной сетки конечных элементов. Это обеспечивает необходимые точность, продолжительность и информативность моделирования [4–7]. Точность и достоверность получаемых результатов зависят от качества исходных данных и степени соответствия моделей реальным изделиям. Поэтому для проверки результатов конечно-элементного моделирования, полученных в вычислительных программных комплексах, целесообразно использовать аналитические методы оценки и расчета, а также проводить испытания образцов изделий.

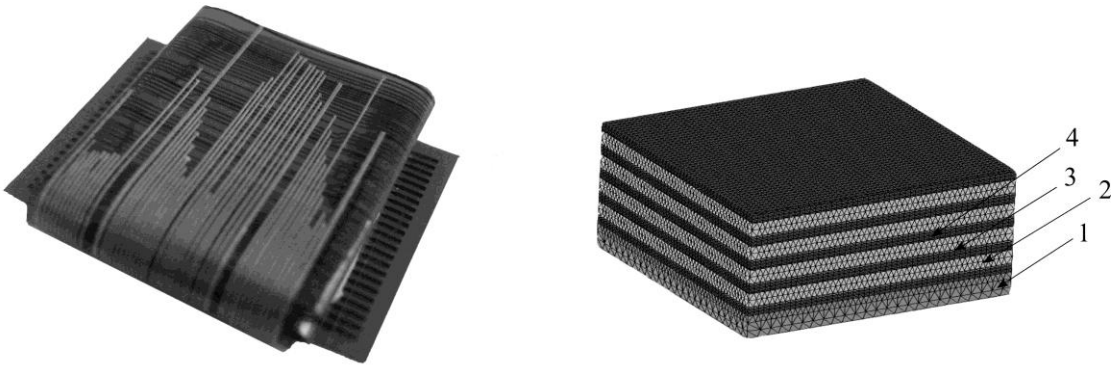
Цель настоящей работы – разработать практический подход к проведению инженерных расчетов и моделированию узлов и сборок изделий МЭТ для комплексного учета влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние (НДС), механическую прочность, тепловой режим и другие характеристики изделий.

Методика инженерных расчетов. Методика инженерных расчетов, моделирования и проектирования конструкций с применением МКЭ заключается в следующем [8]:

- разработка расчетной схемы конструкции;
- разработка модели объекта и задание характеристик материалов конструкции;
- выбор типов конечных элементов и разбиение модели на конечные элементы;
- задание граничных условий, налагаемых на объект;
- формирование системы нагрузок, задание их значений, функциональных зависимостей;
- проверка корректности и редактирование модели;
- моделирование и расчет конструкции, сбор результатов выходных данных;
- анализ полученных результатов и разработка конструктивно-технологических решений.

Согласно данной методике при разработке конечно-элементных моделей проводится аппроксимация исследуемых конструкций путем исключения несущественных деталей, редукции сложных элементов. Именно на этапе аппроксимации и разработки моделей конструкций закладываются наиболее важные факторы и характеристики изделий, а также могут возникать критические ошибки, влияющие на достоверность инженерных расчетов. Точность моделирования зависит от правильности выбора геометрии моделей, построения сетки конечных элементов, задания граничных условий и воздействий, достоверности свойств материалов.

На примере узлов и сборок МЭТ рассмотрен подход к аппроксимации конструкций при разработке компьютерных моделей на основе МКЭ для изучения различных конструктивно-технологических вариантов изделий и воздействий на них. На рис.1,*а* представлена трехмерная многокристальная сборка, аппроксимация которой показала, что основным элементом конструкции является многоуровневая упаковка, состоящая из чередующихся проводящих, диэлектрических и полупроводниковых слоев. Полученная конечно-элементная модель для изучения устойчивости исследуемой трехмерной сборки к механическим и климатическим воздействиям представлена на рис.1,*б*. Модель сборки, устанавливаемой опционально на жестком основании, включает в себя кремниевые кристаллы, смонтированные на коммутационной плате. Межуровневые соединения, изоляция и герметизация компонентов в составе упаковки обеспечиваются применением клеевых материалов.



а ***б***

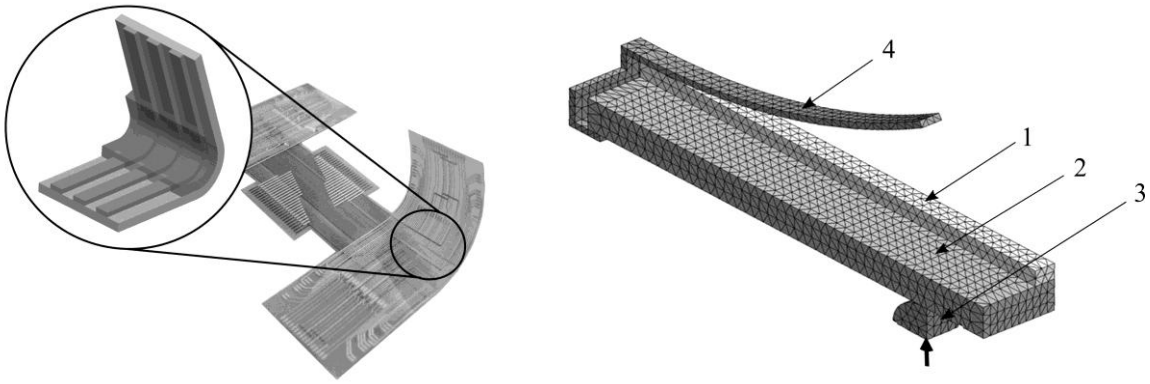
Рис.1. Трехмерная многокристальная сборка (*а*) и ее конечно-элементная модель (*б*):
1 – основание; 2 – кристалл; 3 – коммутационная плата; 4 – клеевой материал
Fig.1. Three-dimensional multichip assembly (*a*) and its finite-element model (*b*):
1 – bottom; 2 – chip; 3 – interconnection board; 4 – adhesive material

Для аналитической оценки термомеханических напряжений σ многослойной трехмерной сборки используется следующее выражение [9]:

$$\sigma = \frac{E_1\left(E_2h_2\left(\left(\alpha_1-\alpha_2\right)\Delta T+W\right)+E_3h_3\left(\alpha_1-\alpha_3\right)\Delta T\right)}{E_1h_1+E_2h_2+E_3h_3},$$

где E_1, E_3 – модули упругости соединяемых материалов; E_2 – модуль упругости клеевого материала; α_1, α_3 – температурные коэффициенты линейного расширения соединяемых материалов; α_2 – температурный коэффициент линейного расширения клеевого материала; ΔT – перепад температуры при нагреве или охлаждении; W – усадка клеевого материала при полимеризации; h_1, h_3 и h_2 – толщины соединяемых и клеевого материалов соответственно.

В результате аппроксимации гибкой коммутационной платы (рис.2,*а*) разработана конечно-элементная модель для изучения устойчивости конструкции к механическим воздействиям и оценки малоцикловой долговечности при перегибах. Для оптимизации объемов вычислений из платы выделен типовой узел в виде балки (рис.2,*б*), закрепленной консольно и состоящей из проводника, сформированного на гибком основании. Свободно закрепленный конец балки опирается на подвижную опору таким образом, чтобы при перегибах за счет вертикального перемещения опоры балка повторяла профиль ложемента, расположенного над ней.



а ***б***

Рис.2. Гибкая коммутационная плата (*а*) и ее конечно-элементная модель (*б*):
1 – проводник; 2 – гибкое основание; 3 – подвижная опора; 4 – ложемент
Fig.2. Flexible interconnection board (*a*) and its finite-element model (*b*):
1 – conductor; 2 – flexible base; 3 – movable fulcrum; 4 – saddle

Долговечность гибкой коммутационной платы при перегибах рассчитывается согласно критерию Коффина – Мэнсона [10], для которого в работе [11] определены коэффициенты в установленной зависимости малоцикловой долговечности проводников от механических деформаций в них:

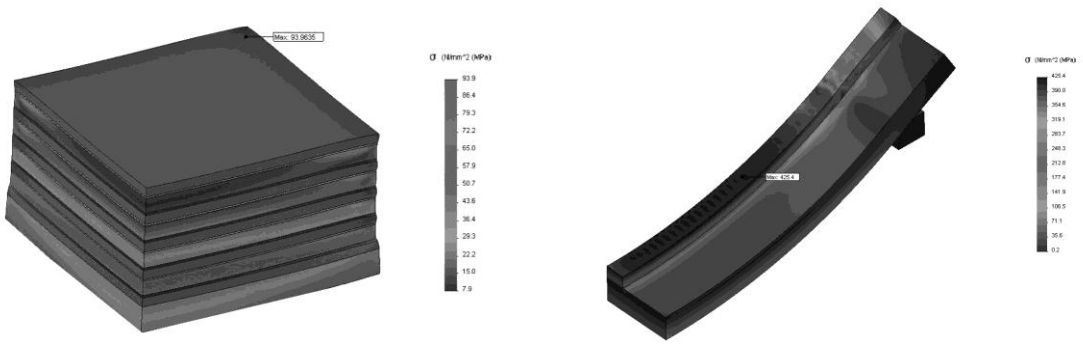
$$N = 9,7 \cdot 10^{-4} (\varepsilon_{pl})^{-2,185},$$

где N – долговечность; ε_{pl} – пластическая деформация при перегибах.

На основе конечно-элементных моделей разрабатываются конструктивно-технологические варианты исследуемых конструкций и проводится моделирование для изучения влияния свойств материалов, конструктивных, технологических параметров, внешних воздействий и других факторов на характеристики изделий. Результаты моделирования систематизируются путем оценки влияния различных параметров и воздействий на характеристики изделий, затем формируются в виде выходных данных. Далее проводятся анализ и проверка полученных результатов, выбираются оптимальные варианты и разрабатываются конструктивно-технологические рекомендации и решения.

Моделирование и анализ конструкций. Распределение напряжений в разработанных конечно-элементных моделях узлов и сборок МЭТ под воздействием температурных и механических нагрузок представлено на рис.3. По результатам компьютерного моделирования на основе МКЭ определено НДС конструкций, установлены значения напряжений материалов. На рис.3,*а* показано распределение напряжений в трехмерной многокристальной сборке при воздействии повышенной температуры среды, равной 60 °С, на рис.3,*б* – распределение напряжений в типовом узле гибкой коммутационной платы в результате воздействия перегибов с малыми радиусами (1–5 мм).

Полученные данные позволили определить концентраторы напряжений, влияние на характеристики изделий свойств материалов, конструктивных параметров и внешних воздействий. Так, в результате инженерных расчетов конструктивных вариантов трехмерной многокристальной сборки, различающихся по параметрам и используемым материалам, определено НДС и проведена оценка прочности изделий при температурных воздействиях. Варьировались следующие параметры: толщина клеевых швов (300; 150 и 50 мкм); толщина кристаллов (500 и 300 мкм); жесткость клеевого материала.



а *б*

Рис.3. Напряженно-деформированное состояние конечно-элементных моделей трехмерной многокристальной сборки (*а*) и гибкой коммутационной платы (*б*)
Fig.3. Stress-strain state of finite-element models three-dimensional multichip assembly (*a*) and flexible circuit board (*b*)

Анализ НДС моделей показал, что максимальные напряжения достигают 78,5–78,6 МПа на краях кремниевых кристаллов, что в 8,7 раза больше напряжения в центре кристаллов (рис.4,*а*). Установлено, что применение эластичных клеевых материалов (кремнийорганических теплопроводных и кремнийорганических) обеспечивает возможность перераспределения нагрузок в конструкции. Это приводит к снижению напряжений в клеевых швах до 0,4–0,7 МПа и, соответственно, к уменьшению концентрации напряжений в сопрягаемых материалах сборки при температурных воздействиях (рис.4,*б*).

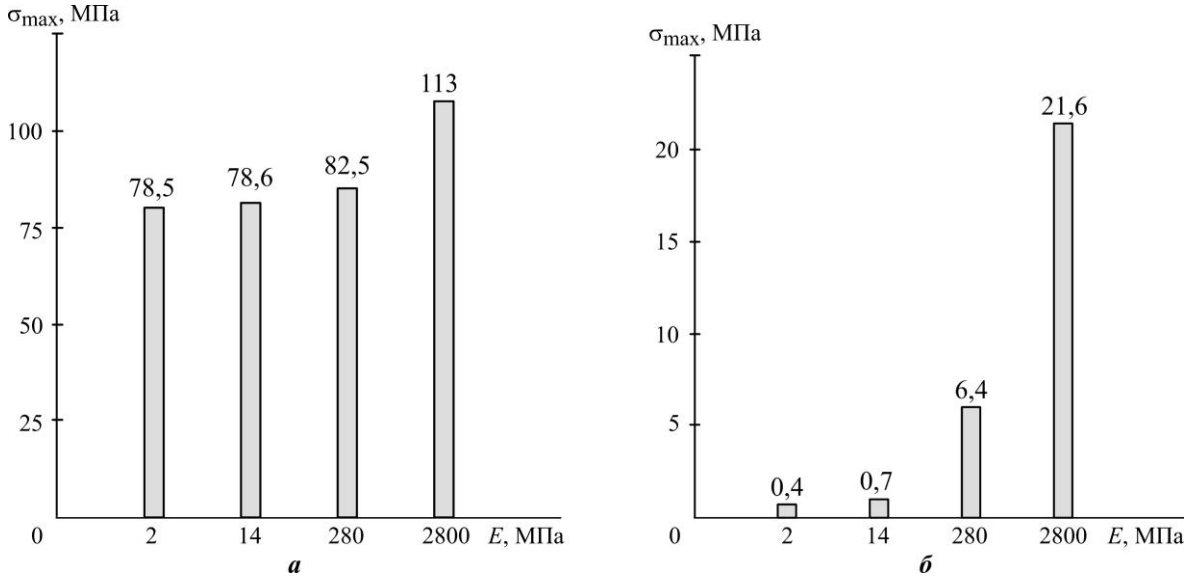


Рис.4. Зависимость максимальных напряжений σ_{max} материалов многокристальной сборки от модуля упругости *E* клеевых материалов при температурных воздействиях: *а* – в кремниевых кристаллах; *б* – в клеевых швах
Fig.4. The dependence of maximum stresses σ_{max} of materials of multichip assembly depending on the elastic modulus *E* of adhesive materials under temperature influences: *a* – in silicon chips; *b* – in adhesive joints

Жесткие клеевые материалы (эпоксидно-теплопроводный и эпоксидно-полиамидный) снижают возможность перераспределения нагрузок в конструкции сборки, что приводит к росту максимальных эквивалентных температурных напряже-

ний во всех материалах. Наблюдается кратный рост напряжений в податливых материалах и значительное повышение НДС: максимальные напряжения в клеевых швах равны 6,4 и 21,6 МПа соответственно, что близко к значениям допустимых напряжений для этих материалов, а напряжения в кремниевых кристаллах составляют 82,5–113 МПа. Уменьшение толщины клеевых швов до 50 мкм и толщины кристаллов с 500 до 300 мкм обусловило снижение напряжений в кристаллах на 20 и 27 % соответственно. Таким образом, менее жесткие клеевые соединения обеспечивают более равномерное распределение напряжений, а толщины клеевых швов, равные 50–150 мкм, достаточны для перераспределения нагрузок в конструкции сборки.

Аналитическая оценка термомеханических напряжений многослойной трехмерной сборки показала хорошее согласование полученных значений и техническую обоснованность применения утоненных материалов. Такое решение не оказывает существенного влияния на термомеханическую прочность и улучшает массогабаритные характеристики сборки. Испытания на влияние повышенной температуры среды (+60 ^{o}C) подтвердили способность изделий сохранять конструктивную целостность при термомеханических воздействиях, а также эффективность разработанных рекомендаций по созданию термопрочных конструкций.

По результатам исследования конструктивных вариантов гибкой платы определено НДС материалов для расчета малоцикловой долговечности конструкции. Варьировались следующие параметры: наличие защитного лакового покрытия; радиус перегибов платы (1, 3 и 5 мм); ширина проводника (80, 160 и 320 мкм); толщина проводника (15, 25 и 35 мкм). Результаты моделирования НДС материалов и расчетов долговечности гибких плат представлены на рис.5.

Установлено, что наиболее эффективными способами повышения долговечности проводников являются нанесение на коммутационные платы защитных амортизирующих покрытий и ограничение числа перегибов с малыми радиусами. Так, нанесение на поверхность плат такого защитного амортизирующего покрытия, как лак АД-9103, обеспечивает эффект уменьшения деформации проводников в 2,5 раза (до 0,0080) и повышение долговечности конструкции с 5 до 37 циклов нагружения. Увеличение радиуса перегибов с 1 до 5 мм позволяет уменьшить пластическую деформацию медных проводников в 25 раз (с 0,0203 до 0,0008) и повысить малоцикловую долговечность гибких плат в 1134 раза (с 5 до 5670 циклов нагружения) (рис.5,*а*). Изменение геометрических размеров проводников, в частности увеличение ширины с 80 до 320 мкм и уменьшение толщины до 15 мкм, обеспечивает уменьшение пластической деформации в 1,39 раза (до 0,0144) и в 1,26 раза (до 0,0190) соответственно (рис.5,*б*,*в*). Это позволяет повысить малоцикловую долговечность гибких плат до 10 циклов нагружения при перегибах с минимальным радиусом, равным 1 мм.

Для проверки полученных результатов проведены испытания гибких плат на устойчивость к перегибам с помощью приспособления с неподвижным основанием и прижимными винтами для закрепления сменных пластин. Платы укладывались на основание приспособления и прижимались пластинами заданной толщины таким образом, чтобы линии изгибов проводников плат были перпендикулярны торцевым краям пластин. Радиусы перегибов равны 1; 3 и 5 мм, платы перегибались вокруг сменных пластин заданной толщины с диаметрами закругления краев $2 \pm 0{,}1$; $6 \pm 0{,}1$ и $10 \pm 0{,}1$ мм соответственно. Затем платы перегибались под углом 180° с визуальным осмотром зон перегибов до выявления в местах перегибов таких дефектов, как трещины лакового покрытия, обрывы и другие повреждения проводников.

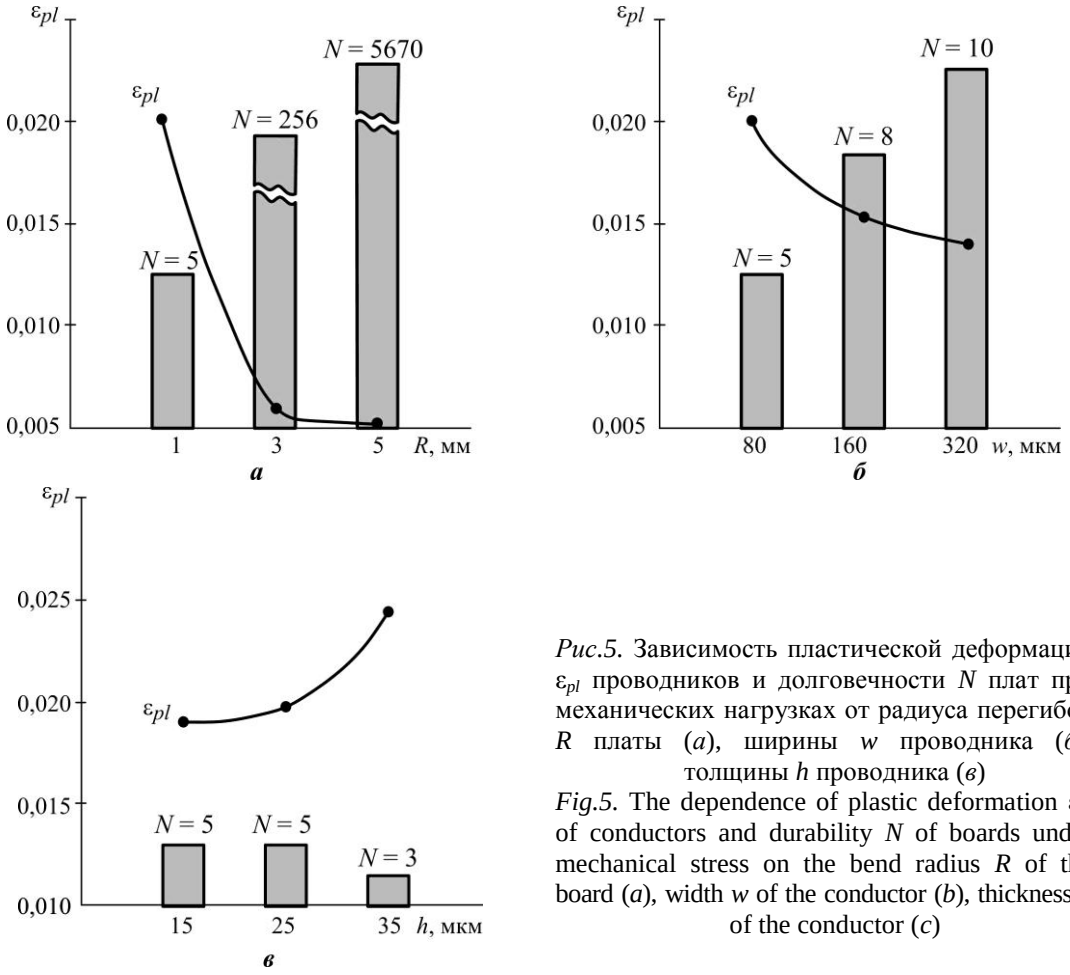


Рис.5. Зависимость пластической деформации ε_{pl} проводников и долговечности N плат при механических нагрузках от радиуса перегибов R платы (*а*), ширины w проводника (*б*), толщины h проводника (*в*)

Fig.5. The dependence of plastic deformation ε_{pl} of conductors and durability N of boards under mechanical stress on the bend radius R of the board (*a*), width w of the conductor (*b*), thickness h of the conductor (*c*)

По результатам испытаний установлено, что для плат, не защищенных лаковыми покрытиями, число перегибов с минимально допустимым радиусом 1 мм составляет (5±1) циклов. С ростом радиуса перегибов до 3 мм долговечность плат возрастает до (250±15) циклов, а при радиусе 5 мм составляет (5 000±300) циклов. Испытания на устойчивость к перегибам плат с защитным покрытием АД-9103 толщиной 50 мкм, равной толщине полимерной подложки, показали, что долговечность плат с шириной проводников 80–320 мкм и толщиной 15–35 мкм при перегибах с радиусом 1 мм достигает 50 циклов. При перегибах плат с радиусом 3 мм долговечность составляет до 2500 циклов, а с радиусом 5 мм платы выдерживают не менее 8000 циклов.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало достаточно хорошее их согласование. Это подтверждает эффективность рекомендованных конструктивно-технологических решений, позволяющих уменьшать НДС материалов и повышать малоцикловую долговечность гибких коммутационных плат. Полученные результаты обеспечивают устойчивость изделий к исследуемым воздействиям и дают возможность оптимизировать конструкции узлов и сборок МЭТ [11, 12].

Заключение. Разработанный комплексный подход к инженерным расчетам и моделированию изделий МЭТ на основе МКЭ позволяет сократить число ошибок при проектировании, найти рациональные проектные решения с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов.

Применение в трехмерных многокристальных сборках эластичных клеевых материалов обеспечивает перераспределение нагрузок в конструкциях, что снижает напряжения в клеевых швах и уменьшает концентрацию напряжений в сопрягаемых материалах сборки при температурных воздействиях. Для повышения устойчивости гибких коммутационных плат к механическим воздействиям ограничено число перегибов с малыми радиусами. Использование защитного амортизирующего покрытия АД-9103 обеспечивает уменьшение деформации проводников в 2,5 раза и повышение долговечности конструкции в 7 раз.

Предложенные конструктивные решения позволяют учесть влияние свойств материалов, внешних нагрузок, температурных полей и других параметров изделий и обеспечивают уменьшение НДС материалов, повышение термомеханической прочности, малоцикловой долговечности узлов и сборок МЭТ.

Литература

1. ***Кондрашин А.А., Лямин А.Н., Слепцов В.В.*** Современные технологии изготовления трехмерных электронных устройств: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2019. 210 с.

2. ***Самогин Ю.Н., Хроматов В.Е., Чирков В.П.*** Метод конечных элементов в задачах сопротивления материалов / под ред. В.П. Чиркова. М.: Физматлит, 2012. 200 с.

3. ***Müzel S., Bonhin E., Guimarães N., Guidi E.*** Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review // Polymers. 2020. Vol. 12. No. 4. P. 818. DOI: https://doi.org/10.3390/polym12040818

4. ***Жилкин В.А.*** Моделирование и расчет изделий из анизотропных и композитных материалов в MSC Patran-Nastran: учеб. пособие. СПб.: Проспект Науки, 2019. 312 с.

5. ***Алямовский А.А.*** SolidWorks/COSMOSWorks 2006/2007. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2007. 784 с.

6. ***Калганов А.А., Лисенко В.Г., Калганова А.П.*** Методика моделирования тепловых процессов для радиоэлектронной аппаратуры // Инженерный вестник Дона. 2020. № 6. 9 с. URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6500 (дата обращения: 15.02.2021).

7. ***Karvatskii A., Mikulionok I., Leleka S., Solovei V.*** Numerical simulation of elasto-plastic behavior of isotropic composite materials // Advances in Design, Simulation and Manufacturing III: Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (Kharkiv, Ukraine, June 9–12, 2020). Cham: Springer Nature, 2020. Vol. 1. P. 492–501. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_48

8. ***Погалов А.И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю, Небусов В.М.*** Методы инженерных расчетов и проектирования многокристальных микромодулей // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2011. № 3. С. 42– 45.

9. ***Гуськов Г.Я., Блинов Г.А., Газаров А.А.*** Монтаж микроэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1986. 176 с.

10. ***Мэнсон С.*** Температурные напряжения и малоцикловая усталость: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1974. 343 с.

11. ***Погалов А.И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю.*** Выносливость гибких печатных плат на полиимидных пленках при производстве и эксплуатации устройств электронной техники // Изв. вузов. Электроника. 2014. № 6 (110). С. 73–78.

12. ***Pogalov A.I., Blinov G.A., Chugunov E.Yu.*** Structural strength and temperature condition of multichip modules // Russian Microelectronics. 2018. Vol. 47. Iss. 7. P. 460–464. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739718070090

Поступила в редакцию 24.06.2020 г.; после доработки 18.03.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

Чугунов Евгений Юрьевич – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), chugunov-eu@inbox.ru

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

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. Kondrashin A.A., Lyamin A.N., Sleptsov V.V. *Modern technologies for manufacturing three-dimensional electronic devices.* 2nd ed., rev. and corr. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2019. 210 p. (In Russian).

2. Samogin Yu.N., Khromatov V.E., Chirkov V.P. (auth. and ed.). *The finite element method in the problems of strength of materials.* Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 200 p. (In Russian).

3. Müzel S., Bonhin E., Guimarães N., Guidi E. Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 818. DOI: https://doi.org/10.3390/polym12040818

4. Zhilkin V.A. *Modeling and calculation of products from anisotropic and composite materials in MSC Patran-Nastran.* Saint Petersburg, Prospekt Nauki Publ., 2019. 312 p. (In Russian).

5. Alyamovskiy A.A. *SolidWorks/COSMOSWorks 2006/2007. Engineering analysis by the finite element method.* Moscow, DMK Press Publ., 2007. 784 p. (In Russian).

6. Kalganov A.A., Lisienko V.G., Kalganova A.P. Technique of modeling thermal processes for electronic equipment. *Engineering Journal of Don*, 2020, iss. 6. 9 p. (In Russian). Available at: http://ivdon.ru/en/magazine/archive/N6y2020/6500 (accessed 15.02.2021).

7. Karvatskii A., Mikulionok I., Leleka S., Solovei V. Numerical simulation of elasto-plastic behavior of isotropic composite materials. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III, Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. Cham, Springer Nature, 2020. Vol. 1, pp. 492–501. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_48

8. Pogalov A.I., Blinov G.A., Chugunov E.U., Nebusov V.M. The methods of multichip micromodules engineering calculations and design. *Oboronnyj kompleks – naucno-tehniceskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*, 2011, no. 3, pp. 42–45. (In Russian).

9. Gus'kov G.Ya., Blinov G.A., Gazarov A.A. *Mounting of microelectronic devices.* Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 176 p. Radio Electronic Equipment Designer/Technologist's Library Series. (In Russian).

10. Manson S.S. *Thermal stress and low-cycle fatigue.* New York, McGraw-Hill, 1966. 404 p.

11. Pogalov A.I., Blinov G.A., Chugunov E.Y. Fatigue life of flexible printed-circuit boards on polyimide films in manufacture and operation of electronic engineering devices. *Proceedings of Universities. Electronics*, 2014, no. 6 (110), pp. 73–78.

12. Pogalov A.I., Blinov G.A., Chugunov E.Y. Structural strength and temperature condition of multi-chip modules. *Russian Microelectronics*, 2018, vol. 47, iss. 7, pp. 460–464. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739718070090

Received 24.06.2020; Revised 18.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

Eugeniy Y. Chugunov – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), chugunov-eu@inbox.ru

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

УДК 613.6.02:[621.3.049.77:658] DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-265-272

Оценка профессиональных рисков в технологических помещениях на предприятии микроэлектроники

В.И. Каракеян, Н.Р. Харламов, А.С. Рябышенков

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

ryabyshenkov@mail.ru

В современной системе обеспечения безопасного производства процедура оценки и управления профессиональными рисками как вероятностью причинения ущерба здоровью при выполнении трудовых обязанностей приобрела для предприятий микроэлектроники обязательный характер. Эта процедура предусматривает применение системных методов идентификации, мониторинга и анализа риска, фиксации полученных результатов, их интерпретацию и составление необходимой отчетности. В работе выполнен анализ рисков в технологических помещениях на предприятии микроэлектроники. Предложены корректирующие организационные мероприятия, позволяющие минимизировать вероятность возникновения опасного события и последующий ущерб. Процедура оценки профессиональных рисков осуществлена методом Файна – Кинни. Данный метод является наиболее информативным и учитывает тяжесть происшествия, а также его экономические последствия для предприятия. Установлено, что источники значительного риска в основном связаны с недостатками в планировке помещений, нарушением сроков лицензирования на работу с рентгеновским оборудованием, отсутствием вытяжной вентиляции, морально устаревшей системой сбора отработанной шлифовальной суспензии. Устранение этих недостатков дает возможности для понижения класса опасности профессиональных рисков и пересмотра тарифов в сторону их уменьшения.

Ключевые слова: опасное событие; идентификация опасностей; профессиональные риски; оценка уровня рисков; метод Файна – Кинни; экономическая оценка риска

Для цитирования: Каракеян В.И., Харламов Н.Р., Рябышенков А.С. Оценка профессиональных рисков в технологических помещениях на предприятии микроэлектроники // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 265–272. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-265-272

© В.И. Каракеян, Н.Р. Харламов, А.С. Рябышенков, 2021

Occupational Risk Assessment in Engineering Spaces at the Microelectronics Enterprise

V.I. Karakeyan, N.R. Kharlamov, A.S. Ryabyshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

ryabyshenkov@mail.ru

Abstract: In the modern system of process safety management, the procedure for occupational risk assessment and management as a probability of causing damage to health in the performance of work duties has become mandatory for microelectronics enterprises. This procedure involves the use of systematic methods for risk identification, monitoring and analysis, obtained results recording and interpretation, and the necessary reporting preparation. This paper analyzes the risks in the main structural divisions of the microelectronics enterprise and suggests corrective organizational measures to minimize the likelihood of a dangerous event and subsequent damage. The procedure was carried out using the Fine – Kinney method, the most informative approach to risk assessment, taking into account the severity of the incident and its economic consequences for the enterprise. It has been established that the sources of significant risk are typically related to space planning flaws, failure to meet the time limit for X-ray equipment work licensing, absence of draw ventilation, and outmoded system of used lapping slurry collection. These shortcomings elimination opens up the opportunities for occupational hazard class lowering and downward revision in tariffs.

Keywords: hazardous event; hazard identification; occupational safety hazards; hazard rate estimation; risk assessment; Fine – Kinney method; economic evaluation of hazard

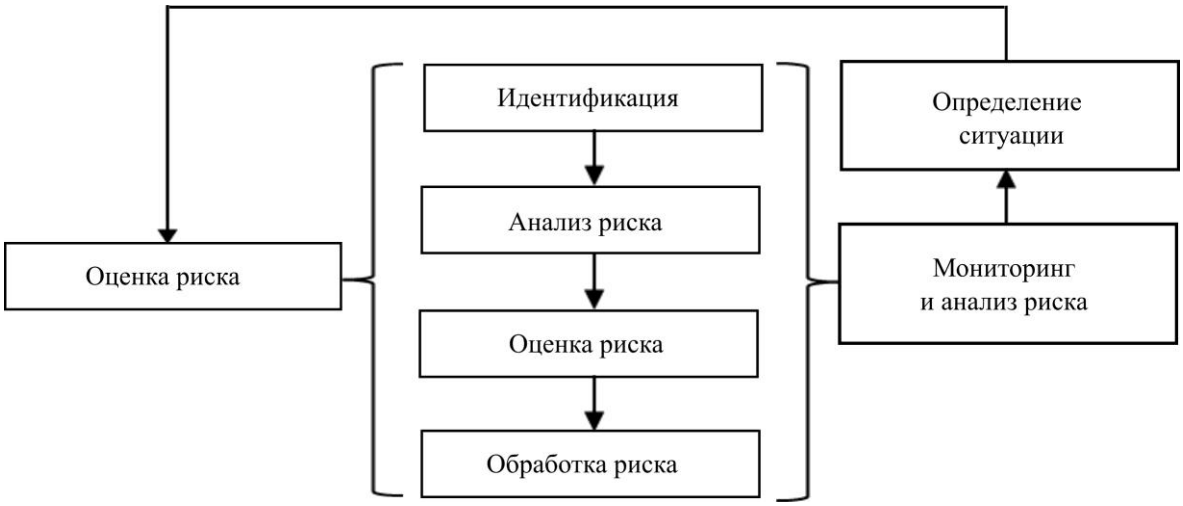
For citation: Karakeyan V.I., Kharlamov N.R., Ryabyshenkov A.S. Occupational risk assessment in engineering spaces at the microelectronics enterprise. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 265–272. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-265-272

Введение. В техносфере происходит постоянное взаимодействие человека, машин и окружающей среды. Качество функционирования человека в техносфере зависит от параметров среды и принятой технологии, и, наоборот, качество среды и технология могут изменяться в зависимости от качества функционирования человека. В такой системе предпосылками происшествий могут быть ошибки человека, отказы техники и неблагоприятные условия среды. На сегодняшний день существуют два основных направления обеспечения безопасности человека в техносфере. Первое состоит в полном отказе или минимизации энергоемких систем и недопущении условия для происшествий, что ограниченно реализуемо в условиях роста экономики. Второе направление предполагает решение задач, связанных в числе других с трудовым процессом и возможными ошибочными действиями человека и отказами техники.

В процессе системного анализа проблемы безопасности предприятия микроэлектроники [1, 2] установлено, что одна из причин неблагополучия в этой сфере – несоответствие условий труда санитарно-гигиеническим требованиям. Как следствие, возникают профессиональные риски. В современной системе обеспечения безопасного

производства процедура оценки и управления профессиональными рисками как вероятностью причинения ущерба здоровью при выполнении трудовых обязанностей приобрела для предприятий обязательный характер, а ее игнорирование влечет за собой административную ответственность работодателя. Правильно организованная процедура оценки профессиональных рисков позволяет решить следующие основные задачи: управление производственными рисками; предотвращение инцидентов, аварий, внештатных ситуаций; снижение риска возникновения профзаболеваний; выявление и своевременное принятие мер по обеспечению безопасности; снижение ущерба предприятия при несчастных случаях.

Методология исследования. В настоящее время в РФ нет единой утвержденной методики оценки профессиональных рисков, поэтому в настоящей работе руководствовались рекомендациями ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Методы оценки риска» [3], содержащего более 30 подходов к оценке профессиональных рисков. При идентификации профессиональных рисков составляется индивидуальный реестр опасностей для основных производственных участков предприятия на основе ГОСТ Р 51901.22-2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения» [4, 5]. Документ регламентирует следующий порядок оценки риска: 1) идентификация опасностей и условий их проявления; 2) оценка уровней риска; 3) разработка мероприятий для уменьшения профессионального риска. Последовательность идентификации риска показана в виде схемы на рисунке.



Последовательность идентификации риска
Risk identification sequence

Для идентификации опасностей на предприятии микроэлектроники создается комиссия из нечетного числа участников в составе, например, главного инженера, заместителя главного инженера, главного механика, главного энергетика, начальника отдела охраны труда и экологии.

В реальном производственном процессе состав и уровень опасностей могут меняться, поэтому процедура оценки риска требует постоянного контроля и мониторинга [6, 7]. Это позволяет иметь оперативную многостороннюю и достоверную информацию о системе и ее недостатках, которые проявляются в ходе трудовой деятельности.

Исходя из цели получения наиболее полной оценки профессиональных рисков на предприятии, выбран метод Файна – Кинни, который в отличие от других подходов, оперирующих, как правило, двумя параметрами (тяжестью и вероятностью) рассматривает три показателя – характер воздействия опасности во времени, прогноз вероятности несчастного случая и тяжесть последствий. Суть метода заключается в последовательной оценке рисков как произведения трех составляющих – вероятности возникновения угрозы на рабочем месте C, степени подверженности работника воздействию опасности на рабочем месте S и тяжести последствий для работников в том случае, если опасность возникнет P:

$$R = CSP,$$

где R – индивидуальный производственный риск.

Основой метода Файна – Кинни является балльная оценка вероятности возникновения события, его возможного негативного воздействия и тяжести последствий для пострадавшего (табл.1).

Таблица 1

Определение индивидуальных производственных рисков по методу Файна – Кинни

Table 1

Determination of individual production risk by the Fine – Kinney method

Вероятность возникновения угрозы на рабочем месте	Баллы	Подверженность работника воздействию опасности на рабочем месте	Баллы	Тяжесть последствий для работника в том случае, если опасность возникнет	Баллы
Ожидаемо, это случится	10	Постоянно (чаще одного раза в день или более 50 % времени смены)	10	Катастрофы, много жертв	100
Очень вероятно	6	Регулярно (ежедневно)	6	Разрушения, есть жертвы	40
Нехарактерно, но возможно	3	От случая к случаю (еженедельно – до шести раз в неделю)	3	Очень тяжелые, один смертельный случай	15
Невероятно	1	Иногда (ежемесячно два-три раза в месяц)	2	Потеря трудоспособности, инвалидность, профзаболевания	7
Можно представить, но невероятно	0,5	Редко (до 11 раз в год)	1	Случаи временной нетрудоспособности	3
Почти невозможно	0,2	Очень редко (до одного раза в год)	0,5	Легкая травма, достаточно оказания первой помощи	1
Фактически невозможно	0,1	–	–	–	–

В зависимости от полученной балльной оценки и итоговой классификации профессионального риска расставляются приоритеты в отношении мер, которые необходимо принять для устранения или снижения риска для здоровья персонала (табл.2).

Таблица 2

Уровни оценки риска и срочность мероприятий по их профилактике

Table 2

Risk assessment levels and urgency of prevention measures

Оценка риска	Значимость риска	Приоритет мероприятий по снижению риска
0–20	Малый риск	Специальных мер не требуется. Следует контролировать уровень опасности
20–70	Умеренный риск	Следует спланировать и выполнять мероприятия по снижению риска
70–200	Значительный риск	Необходимо запланировать и выполнять мероприятия по снижению риска в сжатые сроки
200–400	Высокий риск	Необходимо принять экстренные меры по снижению риска
Свыше 400	Сверхвысокий риск	Необходимо прекратить деятельность до устранения опасности или снижения риска

В результате идентификации профессиональных рисков комиссией проведена их систематизация для каждого технологического помещения. На предприятии существуют 939 малых рисков, не требующих специальных мер (табл.3), но обязательных для постоянного контроля уровня опасности, 294 умеренных риска, подлежащих минимизации за счет организационных мероприятий, а также 15 значительных рисков, требующих особого внимания.

При управлении безопасностью для планирования первоочередных мероприятий по минимизации профессиональных рисков необходим анализ размеров ущерба, наносимого предприятию происшествиями [8, 9]. Детализированный экономический ущерб предприятию от нарушений в области безопасности труда $U_{\text{б.т}}$ в общем случае должен учитывать все разнообразие последствий происшествия для пострадавшего:

$$U_{\text{б.т}} = \sum_{i=1}^{6} U_{\text{б.т}_i} + H_{\text{п}},$$

где $\sum_{i=1}^{6} U_{\text{б.т}_i}$ – сумма потерь возмещения в связи с несчастными случаями, травмами, профессиональными заболеваниями, руб.; $H_{\text{п}}$ – потери, связанные с недополучением продукции из-за отсутствия работника (стоимость недополученной продукции), руб.

Сумма потерь возмещения складывается из значительного числа составляющих, определяемых последствиями происшествия (временной нетрудоспособностью, инвалидностью, потерей кормильца, переводом на другую работу, переобучением и т.д.). Практика показывает, что в годовом балансе таких выплат преобладают затраты на возмещение вреда от временной нетрудоспособности, а остальные составляющие суммы занимают незначительное место. Тогда ущерб может быть рассчитан по формуле

$$U_{\text{б.т}_i} = U_{\text{т}_i} + U_{\text{з}_i},$$

где $U_{\text{т}}$, $U_{\text{з}}$ – расходы на выплату пособий по временной нетрудоспособности, обусловленной травмами и заболеваниями, если нетрудоспособность возникла по вине предприятия, организации, руб.

Таблица 3

Количество опасностей по уровню риска в технологических помещениях на предприятии микроэлектронки

Table 3

The number of hazards by the level of risk in the engineering spaces at the microelectronics enterprise

Технологическое помещение	Малый риск (0–20)	Умеренный риск (20–70)	Значительный риск (70–200)
Участок шлифовки / полировки	44	10	–
Участок резки кристаллов	28	16	–
	15	7	–
	13	4	–
Энергобюро	17	7	–
Ремонтно-механический цех	13	4	1
	12	9	–
	11	3	1
	17	4	–
Участок эпитаксии	7	2	–
	13	3	1
	11	2	–
Лаборатория перспективных разработок	9	2	–
	8	1	–
	11	1	-
	9	1	-
Участок по выращиванию кристаллов	12	5	-
	9	4	-
	9	4	1
Участок вспомогательного производства	671	198	11
Итого	939	294	15

В реальном производстве в соответствии с Федеральным законом №179-ФЗ от 22.12.2005 г. [10] деятельность в 15 рассматриваемых случаях значительного риска (см. табл.3) следует отнести к 3-му классу профессионального риска на страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний, тариф для которого составляет 0,4 % от фонда оплаты труда.

Как следует из характера работ в технологических помещениях, потенциальные опасности и вредности, создающие значительные риски, в основном связаны с недостатками в планировке помещений, нарушением сроков лицензирования на работу с рентгеновским оборудованием, отсутствием вытяжной вентиляции, морально устаревшей системой сбора отработанной шлифовальной суспензии. Устранение этих недостатков создает возможности для понижения класса опасности профессиональных рисков и пересмотра тарифов в сторону их уменьшения. Отметим, что недостатки вентиляции воздуха и устаревшая система сбора и удаления отходов шлифования, создающие проблемы внутри производства, имеют также немаловажный экологический аспект в связи с проблемой выбросов, сбросов и обращения с отходами производства.

Заключение. Оценка профессиональных рисков в технологических помещениях на предприятии методом Файна – Кинни позволяет установить наиболее значимые опас-

ности и возможные экономические последствия от происшествий. Снижение профессиональных рисков в некоторых структурных подразделениях предприятия имеет не только социально-экономический, но и экологический характер. При выполнении рекомендаций по снижению профессиональных рисков на предприятии микроэлектроники следует предусматривать и исследование рассеивания выбросов, и обоснованность санитарно-защитной зоны предприятия.

Литература

1. ***Рябышенков А.С., Каракеян В.И., Харламов Н.Р.*** Структурно-целевая модель обеспечения экологической безопасности предприятия микроэлектроники // Современные проблемы цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 25 дек. 2020 г.). Махачкала: Дагестанский территориальный институт профессиональных бухгалтеров, 2020. С. 229–236. DOI: https://doi.org/10.34755/IROK.2020.87.90.251

2. ***Харламов Н.Р., Рябышенков А.С., Каракеян В.И., Никулина И.М.*** Обеспечение производственно-экологической безопасности предприятия микроэлектроники // Современные научные исследования: сб. науч. тр. по материалам XXVII Междунар. науч.-практ. конф. (Анапа, 16 дек. 2020 г.). Анапа: Изд-во «НИЦ ЭСП» в ЮФО, 2020. С. 115–122.

3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска = Risk management. Risk assessment methods: Национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2012. IV, 69 с.

4. ГОСТ Р 51901.22-2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения = Risk management. Risk register. Principles of development: Национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2014. IV, 15 с.

5. ***Величенко А.Р.*** Реестр рисков в испытательной лаборатории // Молодой ученый. 2020. № 20 (310). С. 90–91.

6. Приказ Минтруда России от 19.08.2016 № 438н и приказ Роструда от 21.03.2019 № 77 «Об утверждении Методических рекомендаций по проверке создания и обеспечения функционирования системы управления охраной труда». URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=363981 (дата обращения: 06.02. 2021).

7. Приказ Минтруда России от 19.08.2016 № 438н «Об утверждении Типового положения о системе управления охраной труда». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_205968/ (дата обращения: 06.02. 2021).

8. Федеральный закон от 24.07.1998 № 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний». URL: https://mintrud.gov.ru/docs/laws/66 (дата обращения: 09.02. 2021).

9. ***Каракеян В.И., Никулина И.М.*** Безопасность жизнедеятельности: учеб. и практ. для академического бакалавриата. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2014. 330 с.

10. Федеральный закон от 22.12.2005 г. № 179-ФЗ. «О страховых тарифах на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний на 2006 год». URL: https://mintrud.gov.ru/docs/laws/13 (дата обращения: 10.02. 2021).

Поступила в редакцию 09.03.2021 г.; после доработки 09.03.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

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

Харламов Николай Романович – магистрант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kolya.kharlamov2017@yandex.ru

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

References

1. Ryabyshenkov A.S., Karakeyan V.I., Kharlamov N.R. Structural and target model of ensuring environmental safety of microelectronics enterprises. *Sovremennyye problemy tsivilizatsii i ustoychivogo razvitiya v informatsionnom obshchestve, Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Moscow, 25 Dec. 2020), Makhachkala, Dagestan Territorial Institute of Professional Accountants, 2020, pp. 229–236.
(In Russian). https://doi.org/10.34755/IROK.2020.87.90.251

2. Kharlamov N.R., Ryabyshenkov A.S., Karakeyan V.I., Nikulina I.M. Ensuring industrial and environmental safety of microelectronics enterprises. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya, Sbornik nauchnykh trudov po materialam XXVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Anapa, 16 Dec. 2020), Anapa, NITs ESP v YuFO Publ., 2020, pp. 115–122. (In Russian).

3. *GOST R ISO / IEC 31010-2011 Risk Management. Risk Assessment Methods.* Moscow, Standartinform Publ., 2012. iv, 69 p. (In Russian).

4. *GOST R 51901.22-2012 Risk Management. Risk Register. Principles of Development.* Moscow, Standartinform Publ., 2014. iv, 15 p. (In Russian).

5. Velichenko A.R. The register of risks in the testing laboratory. *Molodoy Uchenyy = Young Scientist*, 2020, no. 20 (310), pp. 90–91. (In Russian).

6. *Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation of August 19, 2016 No. 438n and Order of Rostrud of March 21, 2019 No. 77 «On Approval of Instructional Guidelines for Checking the Creation and Operation of the Labor Protection Management System»*. Available at: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=363981 (accessed: 06.02. 2021). (In Russian).

7. *Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation of August 19, 2016 No. 438n «On Approval of the Model Provisions on the Occupational Health and Safety Management System»*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_205968/ (accessed: 06.02. 2021). (In Russian).

8. RF Federal Law «On Mandatory Social Insurance against Industrial Accidents and Occupational Diseases» of July 24, 1998 No. 125-FZ. Available at: https://mintrud.gov.ru/docs/laws/66 (accessed: 09.02. 2021). (In Russian).

9. Karakeyan V.I., Nikulina I.M. *Life Safety.* 2nd ed., rev. and enlarg. Moscow, Yurayt Publ., 2014. 330 p. Bachelor's Degree, Academic Course Series. (In Russian).

10. *Federal Law No. 179-FZ of 22.12.2005. «On the insurance rates for compulsory social insurance against industrial accidents and occupational diseases for 2006»*. Available at: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=363981 (accessed: 06.02. 2021).

Received 09.03.2021; Revised 09.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

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

Nikolay R. Kharlamov – Master's degree student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kolya.kharlamov2017@yandex.ru

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

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 621.372.852.5 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-273-281**

High Accuracy Two-Step Flash ADC with Changeable Comparison Range Using Latch Based Comparator

***V.Sh. Melikyan*[1], *V.S. Gevorgyan*[1,2]**

[1]*Synopsys Armenia Educational Department, Yerevan, Armenia*
[2]*National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia*

vazgenm@synopsys.com

Abstract: Due to the technology development and decreasing supply voltages, undesirable effects on sensitive analog signals like noise, kickback are becoming more expressed. Mentioned issues are present in analog to digital converters (ADC) and design of high accuracy ADCs is becoming more complex. In this work, a circuit was proposed based on a latch comparator and comparison range shifter, which increased the accuracy of a two-step flash ADCs by excluding the chance of incorrect coarse conversion, when the input analog voltage is close to separating points of the comparison range of first stage of the ADC. The proposed circuit was constructed using an 16nm FinFET process, the simulations were done with HSpice simulator. The idea was to increase the accuracy of an already designed two-step flash ADC by adding the proposed circuit, which was done by shifting the comparison range during the coarse conversion, for the difference of input voltage and separating points not to be smaller than the offset of comparators used in ADC. It was established that the use of the proposed circuit increased the comparison time, as the sampled input analog voltage firstly should be compared with comparison range separating points, but on the other hand the ADC became more sensitive to its input change (up to 4mV offset) and was performing stable, excluding the chance of wrong coarse conversion. It has been shown that proposed architecture allows avoiding the use of low offset and high accuracy complex comparators in two-step flash ADCs, which greatly reduces the layout area.

Keywords: offset; latch; comparator; comparison range; sample and hold

For citation: Melikyan V.Sh., Gevorgyan V.S. High accuracy two-step flash ADC with changeable comparison range using latch based comparator. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 273–281. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-273-281

© V.Sh. Melikyan, V.S. Gevorgyan, 2021

Высокоточный двухступенчатый АЦП с изменяемым диапазоном сравнения с использованием компаратора на основе защелки

В.Ш. Меликян[1], В.С. Геворгян[1,2]

[1]Учебный департамент Синопсис Армения, г. Ереван, Армения
[2]Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван, Армения

vazgenm@synopsys.com

В связи с развитием технологий производства ИС и снижением напряжения питания в аналого-цифровых преобразователях (АЦП) наблюдаются нежелательные воздействия, например шума, других сигналов, на чувствительные аналоговые сигналы. Разработка высокоточных АЦП становится все более актуальной задачей. В работе рассмотрена схема с использованием компаратора на основе защелки и переключателя диапазона сравнения, повышающая точность двухступенчатых АЦП за счет исключения некорректного грубого преобразования, когда входное аналоговое напряжение близко к разделительным точкам диапазона сравнения первой ступени АЦП. Предлагаемая схема построена с использованием 16-нм FinFET-технологии, моделирование выполнено с помощью симулятора HSpice. Показано, что применение предложенной архитектуры позволяет избежать использования сложных компараторов с малым смещением и высокой точностью в двухступенчатых АЦП, в результате чего значительно уменьшается площадь компоновки. Рассмотренная схема для двухступенчатого АЦП выполнена путем сдвига диапазона сравнения во время грубого преобразования, для того чтобы разница входного напряжения и точки разделения не была меньше, чем смещение используемых в АЦП компараторов. Установлено, что использование предложенной схемы приводит к увеличению времени сравнения, так как дискретизированное входное аналоговое напряжение в первую очередь должно сравниваться с точками разделения диапазона сравнения, АЦП становится более точным (смещение до 4 мВ) и работает стабильно за счет исключения вероятности некорректного грубого преобразования.

Ключевые слова: смещение; защелка; компаратор; диапазон сравнения; выборка и хранение

Для цитирования: Меликян В.Ш., Геворгян В.С. Высокоточный двухступенчатый АЦП с изменяемым диапазоном сравнения с использованием компаратора на основе защелки // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 273–281. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-273-281

Introduction. Nowadays, technologies are developing and reaching down to 3 nm, supply voltages are becoming 0.75 V and lower. This means that any undesirable effects are becoming more expressed, such as leakage currents, noises on sensitive analog nets, kickback effects etc. [1–3]. Above mentioned effects are highly expressed in analog to digital converters (ADC) and digital to analog converters (DAC) [4, 5], because they are directly working with sensitive analog signals, especially in applications where high accuracy is required. That

is why it is becoming more important to develop methods that would help to increase accuracy of the circuits that are directly working with sensitive analog voltages.

Particularly, above mentioned effects affect the ADC performance. As known, the main operating block of the flash ADCs are comparators, as well as in two-step flash ADCs. To increase conversion accuracy, it is obvious that more accurate comparators should be used. That is to use operational amplifiers with small offset and high gain. Although to design an operational amplifier with better working parameters compared with a typical one with a conventional differential pair, it is needed larger layout area, complicated matching techniques and complex design methods. In two-step flash ADC the accuracy issue is becoming more fatal, because if the first stage ADCs' comparator will fail the comparison, in case when the ADC input voltage is closer to separating points, the output of the ADC will be unexpected and not even close to a correct code. The idea is to use an additional circuit to increase the accuracy of the ADC without using complicated comparator designs. In other words, circuit addition to already balanced and tested ADC reduces its chance of failing when the input voltage is close to first stage's separating points.

There are several methods of designing low offset comparators, namely: comparators where its inputs are reconfigured from the typical structure along with a use of restricted clock for the tail current [6]; latch type comparators with elimination of usage of preamplifier stages before latch stage which was used to overcome latch offset voltage [7]; using offset cancelation by storing it on the input capacitors of differential pair [8, 9] and interpolation [10, 11]. In this study, the idea is to increase the conversion accuracy of an already designed two-step flash ADC by adding a latch based comparator, instead of replacing all its comparators with more precise ones.

The main idea of the proposed architecture is to compare the input voltage with the first stage's separating points and, if the difference is close to comparator offset used in ADC, to shift the input range by some step, for the input to already be near to the middle of the separating points. Clearly, the comparison cannot be done with a low offset comparator, otherwise the whole approach would be useless, because we would be able to use that lower offset comparator directly inside the two-step ADC. The comparison would be done with a latch based comparator, described in [12].

Proposed circuit concept. High accuracy two-step flash ADC is presented, with adjustable comparison range, using a latch based comparator on the input (Fig.1). The main idea of the proposed circuit is to increase the accuracy of the two-step flash ADC when the input voltage is close to separating points of the conversion range, when coarse converting the most significant bits (MSB). In other words, when the input voltage and separating point difference is close to offset of the comparator used in MSBs converting part of the ADC, the chance of false coarse conversion lowers.

Sample and hold circuit is used to capture the analog signal and hold its value until the ADC will completely process the information. The analog signal after sample/hold block goes to latch based comparator, to be compared with separating points. That comparator's output signal is controlling the supply voltage shifter. It decides the comparison range for the whole two-step flash ADC, particularly for MSB coarse conversion. Supply voltage shifter generates the new supplies for the whole ADC as well as the control voltages for switches. The switches then are connecting the already defined voltages to higher and lower edges of the comparison range. In the proposed example the comparison range is shifting higher by ΔV amount. ΔV can be defined depending on the comparison range and the number of bits of MSB. For example, if we have a comparison range of 400 mV and 2-bit MSB converter, each section of the

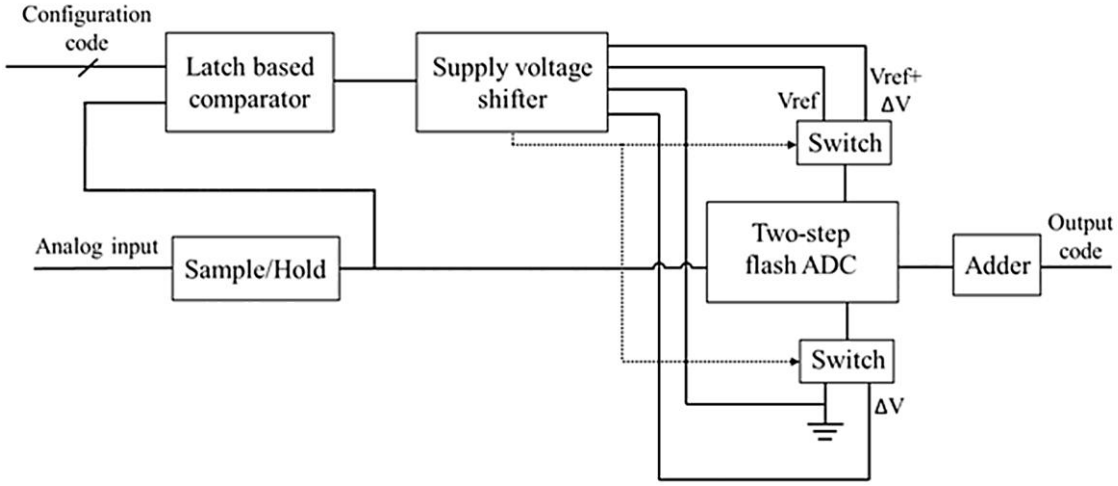


Fig.1. Block diagram of the proposed architecture

conversion range is equal to 100 mV and the separating points are 100 mV, 200 mV and 300 mV. In this case the ΔV can be set to 50 mV, for the input voltage to surely be in the middle of above mentioned sections after shifting. Then the two-step ADC will function as usual (detailed description is given in next sections), but with already shifted range. When the output code would be ready, the last thing to do is to sum the output code and the code corresponding to ΔV voltage. Note that the initial comparison with latch based comparator should be done only for inner separating points. For the higher and lower edges there is no reason for the comparison, because if the input would be close to Vref or ground, incorrect MSB conversion is not possible.

Higher accuracy for two-step flash ADC is achieved by lowering the possibility of a wrong coarse conversion, when the input voltage is close to separating points. It is done by some additional circuits, which are the latch based comparator, the circuit which shifts the comparison range and an adder to compensate the range shift.

Latch based comparator. To compare the sampled input a latch based comparator (Fig.2) is used [12]. The first stage converts the input voltage to current, that should charge the configurable capacitance. The main purpose of the first stage is to multiply a small input change to a much larger one on the output. Depending on the reference voltage, the input transistor is being kept in the linear operating region, to have the same change in drain current for a step change on gate, for different regions of the input swing. The reference voltage is defined by the total capacitance, which is set with the configuration code. Higher number of possible comparison reference voltages leads to more area of the configurable capacitance layout (more parallel capacitance fingers are needed). The switch control signals have a predefined timing, which is defined for some particular operation. During that time window the charges that managed to be accumulated on the capacitance will define the voltage going to

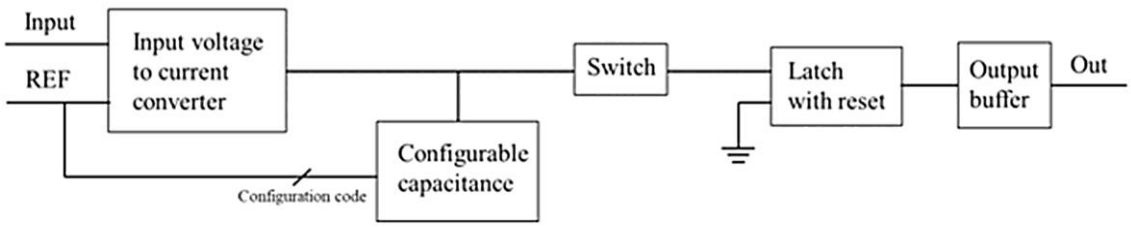


Fig.2. Block diagram of the latch based comparator

the latch input. The second input of the latch is connected to ground. By that the signals on the latch input are becoming like differential signals. And if the accumulated charge is enough, the latch will switch, which means that the difference between the input and reference voltages is bigger than the sensitivity margin. To exclude weak latch output switchings, a buffer is placed on the output to filter the latch output signal.

Implementation of the proposed method. Proposed circuit is implemented by integration of latch based comparator in two-step flash ADC circuit (Fig.3). The circuit consists of latch based comparator, the circuit which switches the comparison range, two-stage flash

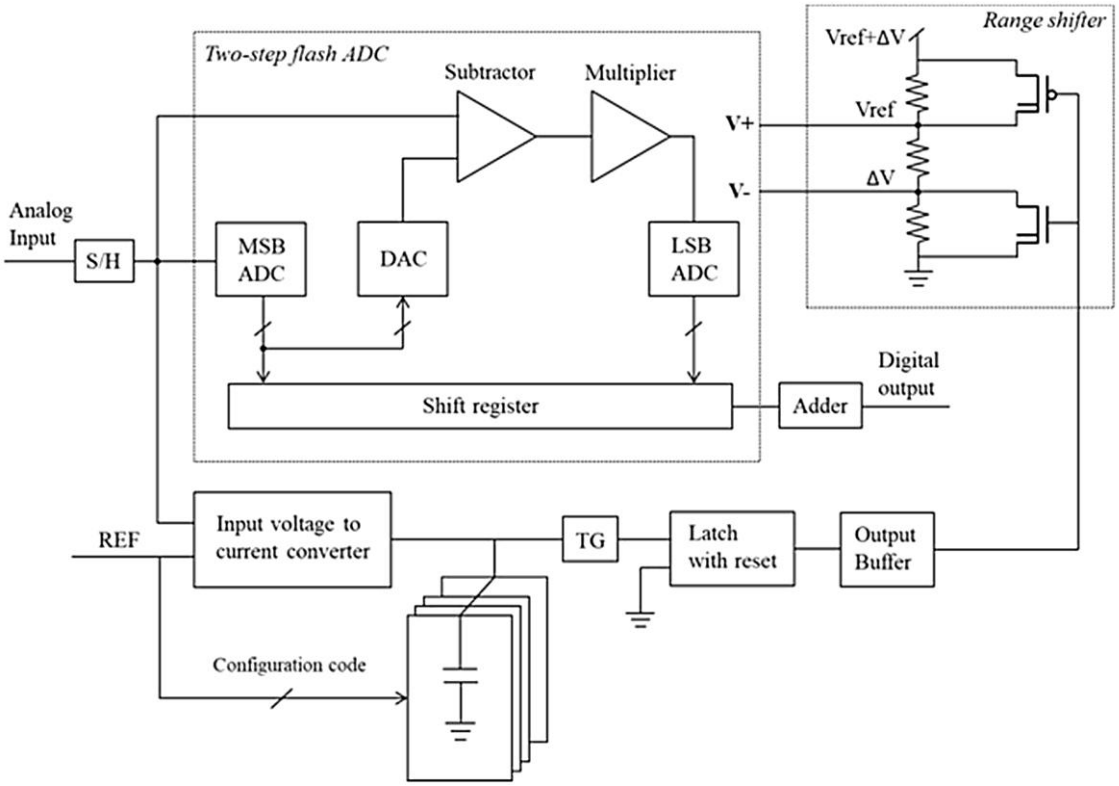


Fig.3. Implementation of the proposed architecture

ADC and an adder. Consider 2-bit MSB ADC. Number of least significant bits (LSB) ADC is not principal. In Fig.4 the comparison range and the separating points are shown. At the beginning of the conversion cycle the input analog voltage sampled with sample and hold circuit. As described in previous sections, the input voltage needs to be compared with V1, V2 and V3. At first the configuration code of the capacitor is selected to compare the input voltage with V1. After, the capacitor configuration code is changing to compare the input voltage with V2 and then with V3. In case if the analog voltage is neither close to V1 nor V2 nor V3, the two-step flash ADC functions as always, with comparison range from ground to Vref. If the input voltage is close to V1 or V2 or V3 (the difference is smaller than the initially defined value), the comparison range of the ADC should be

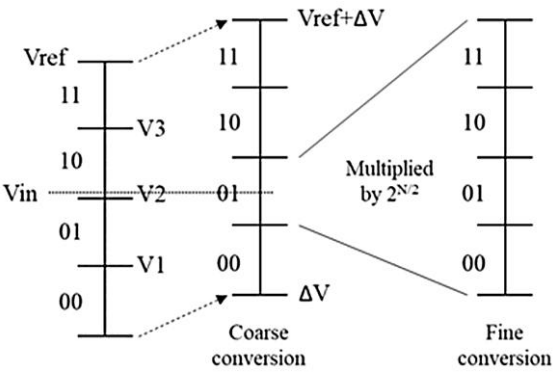


Fig.4. Conversion range shifting

shifted by some ΔV and become from ΔV to Vref + ΔV. V+ and V– depicted in the Fig.3 are the upper and lower edges of the comparison range. Range shifter circuit is used to shift the comparison range. The resistor sizes are set, for middle points to be equal to ΔV and Vref. A pair of NMOS and PMOS devices are used in range shifter. Depending on the voltage on the output of the latch based comparator, the V– and V+ would be connected respectively to 0 and Vref or ΔV and Vref + ΔV (one of the NMOS/PMOS pair would be shorted). ΔV can be defined by the following equation:

$$\Delta V = \frac{1}{2}\mathrm{Vref}\,\frac{1}{2^N} = \frac{\mathrm{Vref}}{2^{N+1}}. \quad (1)$$

By that after shifting the comparison range, the input voltage will be just about in the middle of separating points and the coarse conversion will be accurate, as depicted in Fig.4. And all the conversion up to the end would be done with shifted range. When the final code would be in the shift register, the code corresponding to ΔV would be added to get the ADC output by the adder.

Consider a case where the input voltage is close to V2 (Fig.4). In case of conventional ADC there is a probability that the MSB could be set to 01 and the whole conversion would be incorrect. In this case the comparison range is shifting and, as shown in Fig.4, the input voltage now is clearly in 01 range. After, the fine conversion would be performed and the code with shifted range would be defined. As the range is shifted up, and the obtained code is corresponding to a lower voltage than the input one, the adder would add the digital code of the ΔV to obtain the final code corresponding to input analog voltage.

Simulation results. The circuit of Fig.5 is implemented in the 16nm FinFET technology. All transistors in the circuit are regular voltage/threshold transistors. Simulations are done with HSpice simulator [13]. Supply voltage is 0.9 V, which is the nominal voltage for regular transistors.

The main components in Fig.5 are sample/hold block, latch based comparator, its output buffer, D flip-flop (DFF), range shifter and the flash ADC. Transient analysis is performed, as in the circuit non-parasitic capacitance is present. The input voltage sweeps from 600 mV to 610 mV with 1 mV step (delta on the waveforms). Capacitance value is set for the input voltage to be compared with 600 mV. The waveforms on Fig.6(*a*) show the latch performance. Latch buffered output (out 3), latch output (out 1), latch input (net 8), voltage on configurable capacitance (outin), transmission gate select signal (sel) and latch output enable signals (en_n) are shown. As can be seen from out 3 signals, the latch buffered output stops switching when input is 604 mV and lower. Detailed description of the latch-based comparator function can be found in [12].

The waveforms on Fig.6(*b*) show the range shifter performance. Latch buffered output (out3), clock signal of the DFF (clk), non-inversed output of the DFF (dff_out), lower (vl) and upper (vh) edges of the comparison range for the two-step flash ADC are shown. A two-step flash ADC is considered with a normal (non-shifted) comparison range from 400 mV to 800 mV and with 2-bit coarse conversion MSB ADC. The DFF is switching with a rise slope. Initially it is considered that the DFF output is logical 1 and the comparison range is from 400 mV to 800 mV. DFF is used to catch the latch buffered output value at the end of the comparison cycle. If the difference of the input and reference voltages is smaller than the sensitivity margin (4 mV), the configurable capacitance is not managing to accumulate enough energy to switch the latch, and the voltage on out 3 net remains 0. DFF catches the 0 on out 3 net, and its output is switching to 0. By (1) equation if the range is 400 mV and the MSB ADC is 2 bit, the range should be shifted by 50 mV. In range shifter block, the supplies

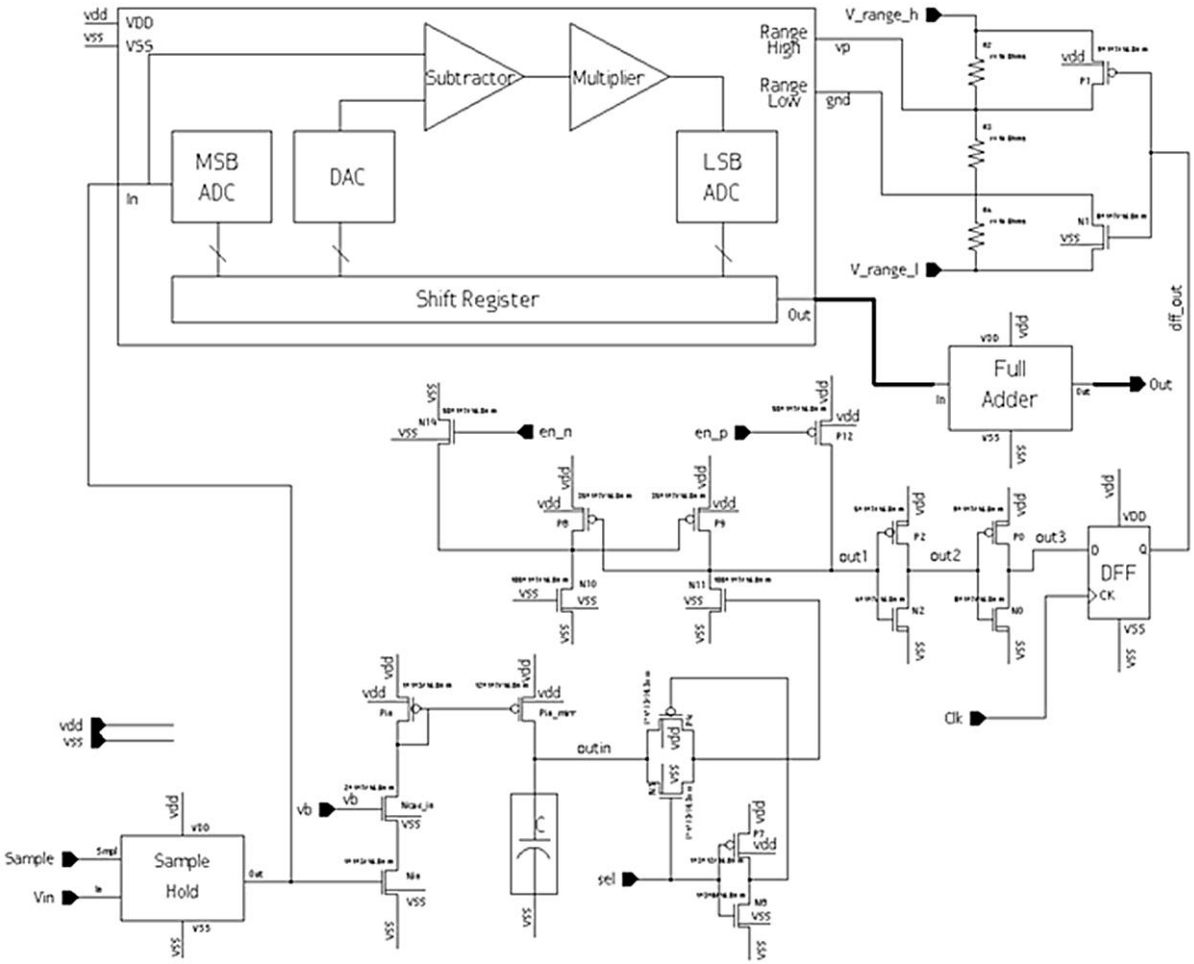
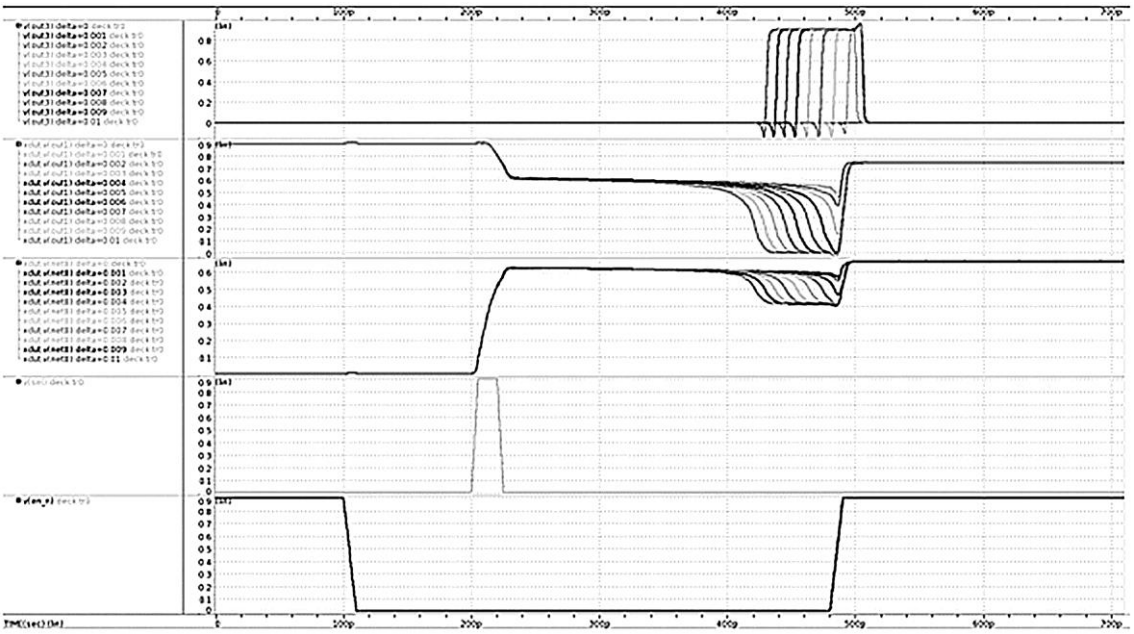


Fig.5. Schematic view of the proposed architecture

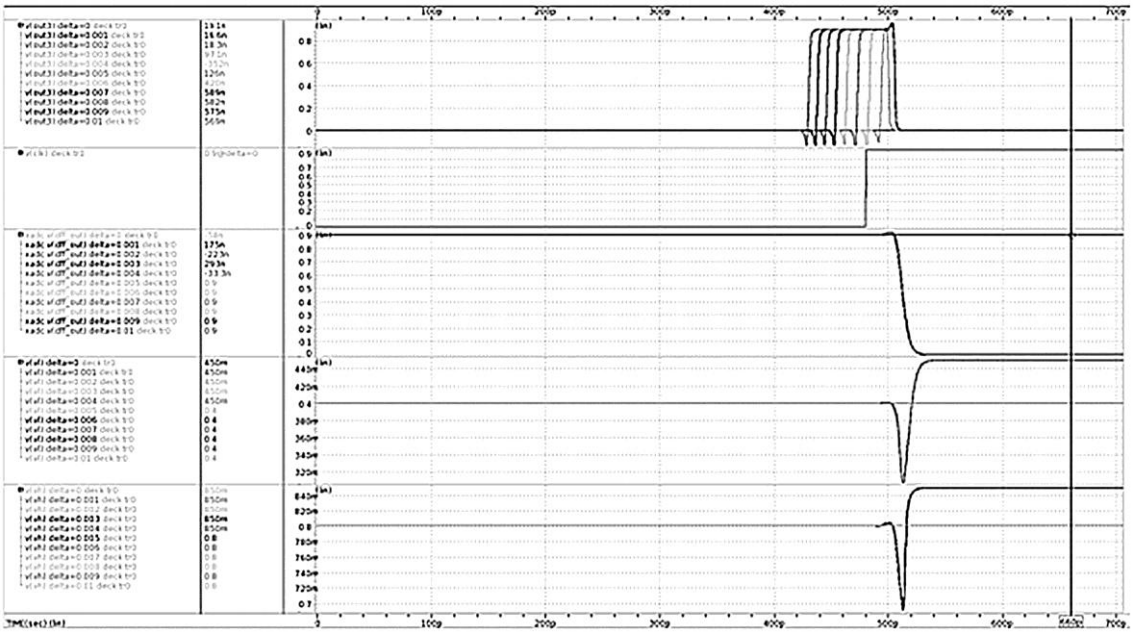
(V_range_h and V_range_l) are 850 mV and 400 mV respectively. The resistors sizes are chosen for the middle points to be 800 mV and 450 mV. When the DFF output is switching to 0, the PMOS is opening and NMOS is cutting off. By that on vh and vl nets the voltage is becoming 850 mV and 450 mV respectively. And if the input voltage would be close to 600 mV the adjacent separating points would be shifted to 550 mV and 650 mV. As can be seen from vl and vh waveforms, the range is shifting for delta values lower than 5 mV. For delta values 5 mV and above comparison range remains from 400 mV to 800 mV.

Same actions should be performed for every separating point (500 mV, 600 mV, 700 mV). And if the input voltage is close to either one of them, the range is shifting. When on the output of the two-step ADC the code would be available, the full adder would add the code corresponding to 50 mV and on its output the code corresponding to input voltage would be obtained.

In the simulated case a comparison cycle for one separating point lasts 400 pS. So, for 2-bit MSB ADC there are 3 separating points, and for this case comparison time will increase by 1.2 nS. For general case, the comparison duration increase would be $(2^N–1)\cdot 400$ pS, where N is the number of bits of MSB ADC. Area of the given circuit equals to around 53.6 μm^2 (excluding the full adder). Area is a strong function of the size of configurable capacitance, which means that the more combinations the configurable capacitance would have, the larger would be the circuit area.



а



б

Fig.6. Latch based comparator performance (*a*) and range shifter performance (*b*)

Conclusion. A high accuracy two-step flash ADC with changeable input range has been presented, using a latch based comparator. To avoid designing low offset sensitive comparators, which will require complicated design and layout process and using them in ADCs will dramatically increase the ADC area, by adding the latch based comparator the accuracy of an already designed conventional two-step flash ADC can be increased. Compared with conventional two-step ADCs the comparison duration is increasing by $(2^N–1)\cdot 400$ pS, where N is the number of bits of MSB ADC, as the sampled input analog voltage firstly should be compared with comparison range separating points. For simulated configuration the area increase equals to 53.6 μm^2 (area has a strong dependence on configurable capacitance size). On the other

hand, the ADC is becoming more sensitive to its input change (4 mV offset) and can be used in designs where a high accuracy and a comparison reliability are critical, for it excludes the chance of wrong coarse conversion.

References

1. Razavi B. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 2015. 782 p.
2. Sedra A.S., Smith K.C. *Microelectronic Circuits.* 7th ed. Oxford, Oxford University Press, 2014. 1488 p.
3. Baker R.J. *CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation.* 3rd ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2010. 1173 p.
4. Razavi B. *Principle of Data Conversion System Design.* New York, Chichester, Weinheim et al., Wiley-IEEE Press, 1995. 272 p.
5. Gustavsson M., Wikner J.J., Nianxiong Tan. *CMOS Data Converters for Communications.* New York, Springer, 2002. xxii, 378 p. DOI: https://doi.org/10.1007/b117690
6. Katyal V., Geiger R.L., Chen D.J. A new high precision low offset dynamic comparator for high resolution high speed ADCs. *2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, Singapore, 4–7 Dec. 2006. Piscataway, NJ, IEEE, 2006, pp. 5–8. DOI: https://doi.org/10.1109/APCCAS.2006.342249
7. Khosrov D. A new offset cancelled latch comparator for high-speed, low-power ADCs. *2010 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*. Kuala Lumpur, IEEE, 2010, pp. 13–16. DOI: https://doi.org/10.1109/APCCAS.2010.5774892
8. Liu J., Li F., Li W., Jiang H., Wang Z. A flash ADC with low offset dynamic comparators. *2017 International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, Hsinchu, IEEE, 2017, pp. 1–2. DOI: https://dx.doi.org/10.1109/EDSSC.2017.8126480
9. Nasrollahpour M., Sreekumar R., Hamedi-Hagh S. Low power comparator with offset cancellation technique for Flash ADC. *2017 14th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, Giardini Naxos, IEEE, 2017, pp. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/SMACD.2017.7981602
10. Oh D., Kim J., Jo D., Kim W., Chang D., Ryu S. A 65-nm CMOS 6-bit 2.5-GS/s 7.5-mW 8 x time-domain interpolating flash ADC with sequential slope-matching offset calibration. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, vol. 54, no. 1, pp. 288–297.
11. Yang X., Bae S.-J., Lee H.-S. An 8-bit 2.8 GS/s flash ADC with time-based offset calibration and interpolation in 65 nm CMOS. *IEEE 45th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*, Poland, IEEE, 2019, pp. 305–308.
12. Gevorgyan V. A small area and low power voltage comparator based on a latch with configurable sensitivity. *Proceedings of National Academy of Sciences of Republic of Armenia and National Polytechnic University of Armenia, Series of Technical Sciences*, 2020, pp. 30–39.
13. *HSPICE Reference Manual.* Synopsys Inc., 2017. 846 p.

Received 16.02.2021; Revised 16.02.2021; Accepted 14.04.2021.

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), vazgenmelikyan56@gmail.com

Vazgen S. Gevorgyan – student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan 105), Analog and Mixed Signal Layout Engineer, Engr. II «Synopsys Armenia» CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), vgevorg@synopsys.com

УДК 621.3.049.77:681.518.5 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-282-290

Особенности интерфейса устройства тестового диагностирования памяти DDR SDRAM

С.В. Волобуев, В.Г. Рябцев

Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград, Россия

sergey-aspir14@yandex.ru

Схема синхронизации при вводе-выводе играет важную роль с целью достижения максимальной скорости и достоверности передачи данных при функционировании памяти. В работе представлена архитектура интерфейса устройства тестового диагностирования синхронной памяти с двойной скоростью передачи данных (DDR SDRAM). Показано, что предлагаемые компоненты интерфейса обеспечивают формирование двунаправленного синхросигнала для стробирования записываемых и считываемых данных при выполнении тестового диагностирования микросхем и устройств памяти DDR SDRAM. По сравнению с традиционными методами предлагаемые компоненты интерфейса выполнены на интегральных электронных элементах, что позволяет уменьшить их габариты и снизить энергопотребление. Установлено, что при применении многофазной системы синхронизации для реализации интерфейса можно исключить использование линий задержки, недостатками которых являются большие габаритные размеры и сложность изменения времени задержки. Рассмотренные компоненты интерфейса предназначены для применения в устройствах тестового диагностирования, имеющих мультипроцессорную структуру, что способствует повышению быстродействия формирования тестовых воздействий и эталонных реакций. Выполненное функциональное моделирование и отладка формирователей стробирующих сигналов подтверждают осуществимость конструкций. Предлагаемый интерфейс позволяет выполнять тестовое диагностирование современных быстродействующих микросхем и модулей полупроводниковой памяти на рабочей частоте, в связи с чем повышается уровень достоверности полученных результатов. Компоненты интерфейса могут применяться при производстве средств тестового диагностирования современных быстродействующих запоминающих устройств.

Ключевые слова: интерфейс; память DDR SDRAM; передача данных; устройство тестового диагностирования

Для цитирования: Волобуев С.В., Рябцев В.Г. Особенности интерфейса устройства тестового диагностирования памяти DDR SDRAM // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 282–290. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-282-290

© С.В. Волобуев, В.Г. Рябцев, 2021

Interface Features of the DDR SDRAM Memory Test Diagnostic Device

S.V. Volobuev, V.G. Ryabtsev

Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

sergey-aspir14@yandex.ru

Abstract: The I/O synchronization scheme plays an important role in achieving maximum speed and reliability of data transmission during memory operation. This paper presents the interface architecture of the DDR SDRAM test diagnostic device. It was demonstrated that the proposed interface components provide the formation of a bidirectional synchro signal for gating written and read data when performing test diagnostics of chips and DDR SDRAM memory devices. Compared to traditional methods, the proposed interface components were made on integrated electronic elements, which reduced the size and power consumption. It has been established that the use of a multiphase synchronization system to implement the interface eliminated the use of delay lines, the disadvantages of which are large dimensions and the complexity of changing the delay time. The interface components under consideration are intended for use in test diagnostics devices that have a multiprocessor structure, which increases the speed of forming test actions and reference reactions. The performed functional modeling and debugging of strobe signal generators confirmed the feasibility of the designs. The proposed interface of the test diagnostics device allows performing test diagnostics of modern high-speed chips and semiconductor memory modules at the operating frequency, which increases the reliability of the results obtained. Interface components can be used by manufacturers of test diagnostics tools for modern high-speed storage devices.

Keywords: interface; DDR SDRAM memory; data transfer; test diagnostics device

For citation: Volobuev S.V., Ryabtsev V.G. Interface features of the DDR SDRAM memory test diagnostic device. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 282–290. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-282-290

Введение. Технология полупроводниковой памяти, являясь наиболее быстрорастущим сегментом электронной промышленности, постоянно совершенствуется с целью повышения плотности, эффективности и скорости передачи данных [1, 2]. Синхронная память с двойной скоростью передачи данных (DDR SDRAM) в настоящее время используется в таких устройствах, как ноутбуки, компьютеры, мобильные устройства, а также в современных серверах, автомобильных и облачных приложениях.

При производстве полупроводниковых запоминающих устройств с высокой скоростью передачи данных возникает проблема создания и определения характеристик интерфейса устройства тестового диагностирования (УТД) памяти [3, 4]. Интерфейс микросхем DDR SDRAM требует применения двунаправленного синхросигнала Dqs для стробирования записываемых и считываемых данных. Синхросигнал Dqs может подтверждать прием 4 или 8 бит данных. Фундаментальное преимущество использования синхросигнала Dqs – реализация высокой скорости передачи данных на выводы за счет сокращения времени доступа к памяти и уменьшения задержки распространения сигналов между памятью и контроллером памяти.

При выполнении тестирования интерфейс синхронной динамической оперативной памяти DDR SDRAM в режиме записи обеспечивает прием данных Dq по стробу передачи данных (Dqs), который формируется УТД, а фронты данного строба совпадают с центрами принимаемых данных. В режиме считывания данные Dq от памяти DDR SDRAM передаются в УТД, а фронты строба приема данных, формируемого оперативной памятью, совпадают с фронтами считанных данных. В известных контроллерах DDR SDRAM, реализованных на ПЛИС Xilinx серии Spartan-3 и др., для преобразования данного сигнала в сигналы, обеспечивающие запись данных в приемные регистры, применяются управляемые напряжением линии задержки (Voltage-Controlled Delay Line), программные модели которых отсутствуют, а технологические приемы для их реализации недоступны. Актуальность задачи, решаемой при проектировании интерфейса УТД, подтверждается разработкой интеллектуального ядра (IP Core), формирующего строб синхросигнала Dqs, реализованного на программируемой логической схеме с возможностью многократного использования с перепрограммированием параметров [5].

Целостность данных, обрабатываемых информационными управляющими системами, такими как серверы, базы данных, компьютеры и т.д., имеет решающее значение для их надежной работы. Для отказоустойчивых приложений важна целостность данных, хранящихся в памяти, а любые ошибки памяти могут представлять угрозу точности сложных операций и/или вызывать сбои системы, затрагивающие большое количество пользователей [6, 7]. Для обеспечения высокой надежности оперативной памяти необходимо выполнять эффективное тестовое диагностирование на реальной рабочей частоте. Методы повышения быстродействия УТД оперативной памяти предложены в работах [8, 9], в частности рассматривается применение мультипроцессорной структуры устройства, содержащего многоканальные формирователи кодов адреса и данных. В результате происходит одновременное формирование тестовых воздействий для нескольких смежных тактов за один период сигнала синхронизации. Однако принципы построения интерфейса УТД, обеспечивающего сопряжение с оперативной памятью DDR SDRAM, сформулированы недостаточно полно.

Цель настоящей работы – исследование особенностей архитектуры интерфейса памяти DDR SDRAM для корректного сопряжения с УТД, обеспечивающего доступ к данным в пакетном режиме.

Методика проектирования. Мультипроцессорная структура УТД оперативной памяти DDR SDRAM приведена на рис.1. В ее составе – контроллер, микропрограммная память, многоканальные формирователи кодов адреса (КА), кодов данных (КД) и кодов операций (КО), мультиплексоры КА, КД и КО, компараторы данных, формирователь строба передачи данных Dqs_w и формирователь стробов приема данных CER.

Работой УТД управляет контроллер по командам, поступающим из микропрограммной памяти со сложным форматом команд и микроопераций [10, 11]. Для управления режимами работы УТД для четырехканальных формирователей КА, КД и КО предусмотрено следующее множество команд рабочих операций:

$$M_{a\lg} = \{W_{a\lg_0}, W_{a\lg_1}, W_{a\lg_2}, W_{a\lg_3}, R_{a\lg_0}, R_{a\lg_1}, R_{a\lg_2}, R_{a\lg_3}, A_{a\lg_0}, A_{a\lg_1}, A_{a\lg_2}, A_{a\lg_3}\},$$

где $W_{a\lg_0}, W_{a\lg_1}, W_{a\lg_2}, W_{a\lg_3}$ – команды записи данных для четырех смежных тактов диагностирования; $R_{a\lg_0}, R_{a\lg_1}, R_{a\lg_2}, R_{a\lg_3}$ – команды считывания данных; $A_{a\lg_0}, A_{a\lg_1}$, $A_{a\lg_2}, A_{a\lg_3}$ – команды сравнения считанных и эталонных данных.

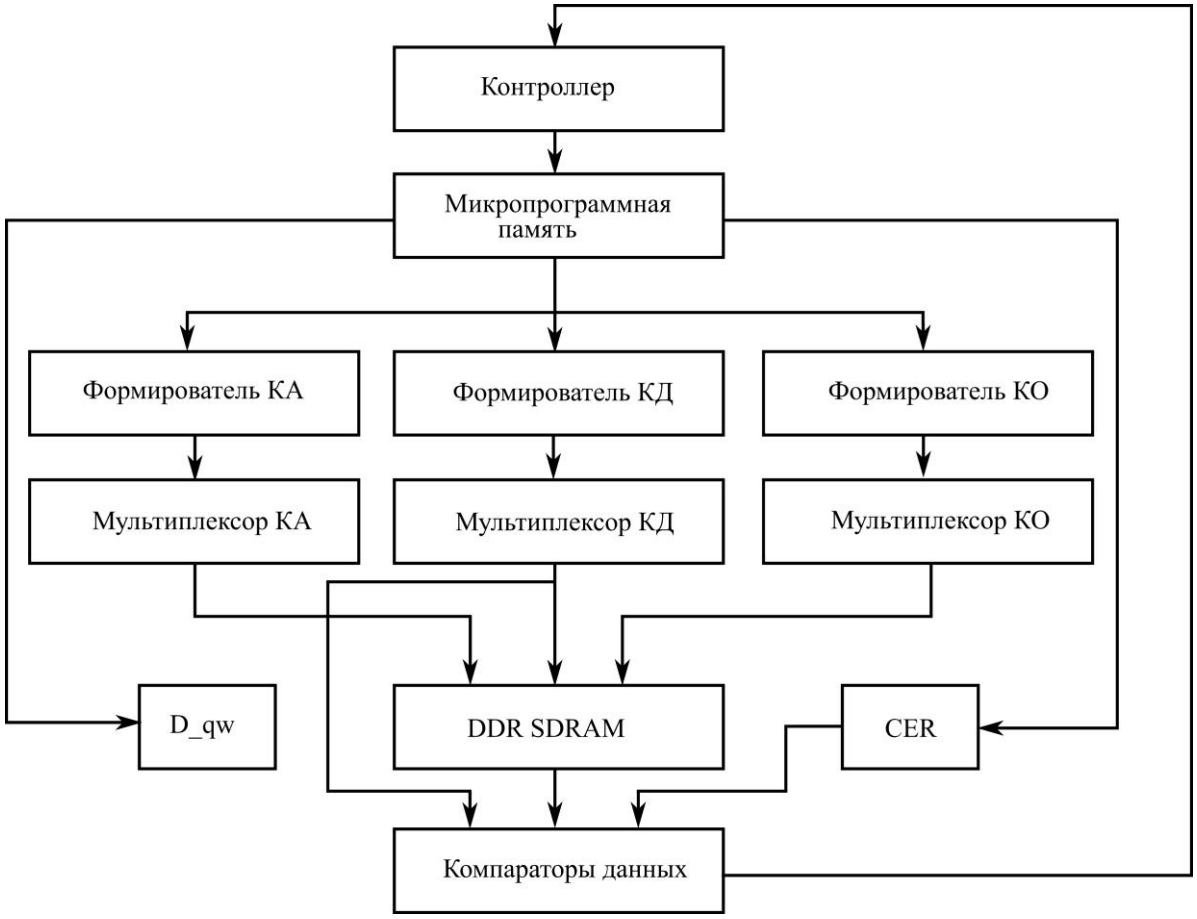


Рис.1. Структура устройства тестового диагностирования памяти DDR SDRAM
Fig.1. Structure of the DDR SDRAM memory test diagnostic device

Для задания режимов работы памяти DDR SDRAM применяется следующее множество команд:

$$M_{RAM} = \{We_0, We_1, We_2, We_3, Cas_0, Cas_1, Cas_2, Cas_3, Ras_0, Ras_1, Ras_2, Ras_3\},$$

где We_i, Cas_i, Ras_i, $i = \overline{0,3}$ – сигналы для задания режимов работы микросхемы памяти в четырех смежных тактах диагностирования.

Передача тестовых воздействий на входы памяти осуществляется на реальной частоте за счет применения мультиплексоров. При этом снижаются требования по быстродействию к основным блокам УТД и увеличивается частота формирования тестовых воздействий и обработки эталонных реакций. Частота работы контроллера снижается пропорционально количеству каналов формирования КА, КД и КО.

Для циклического повторения фрагментов тестов используются следующие признаки ветвления программ:

$$A_i \neq NA, \quad A_i \neq GA, i = \overline{0,3},$$

где NA – код конечного адреса тестируемой памяти; GA – код начального адреса тестируемой памяти.

Для выбора номера адресного формирователя A_i, признаки ветвления которого используются в данном такте диагностирования, применяются коды специального поля микропрограммной памяти.

Проектирование компонентов средства связи УТД с микросхемой памяти. Для реализации интерфейса связи УТД с микросхемой памяти DDR-типа применена многофазная система синхронизации: сигнал Clk_alg обеспечивает синхронизацию работы УТД, сигнал CLK_1 синхронизирует работу микросхемы памяти, а сигнал CLK_shift обеспечивает работу элементов, формирующих сигнал Dqs_w в режиме записи. Схема формирователя сигнала Dqs_w в режиме записи приведена на рис.2,*а*. Она состоит из двухразрядного счетчика, *D*-триггера и логических элементов.

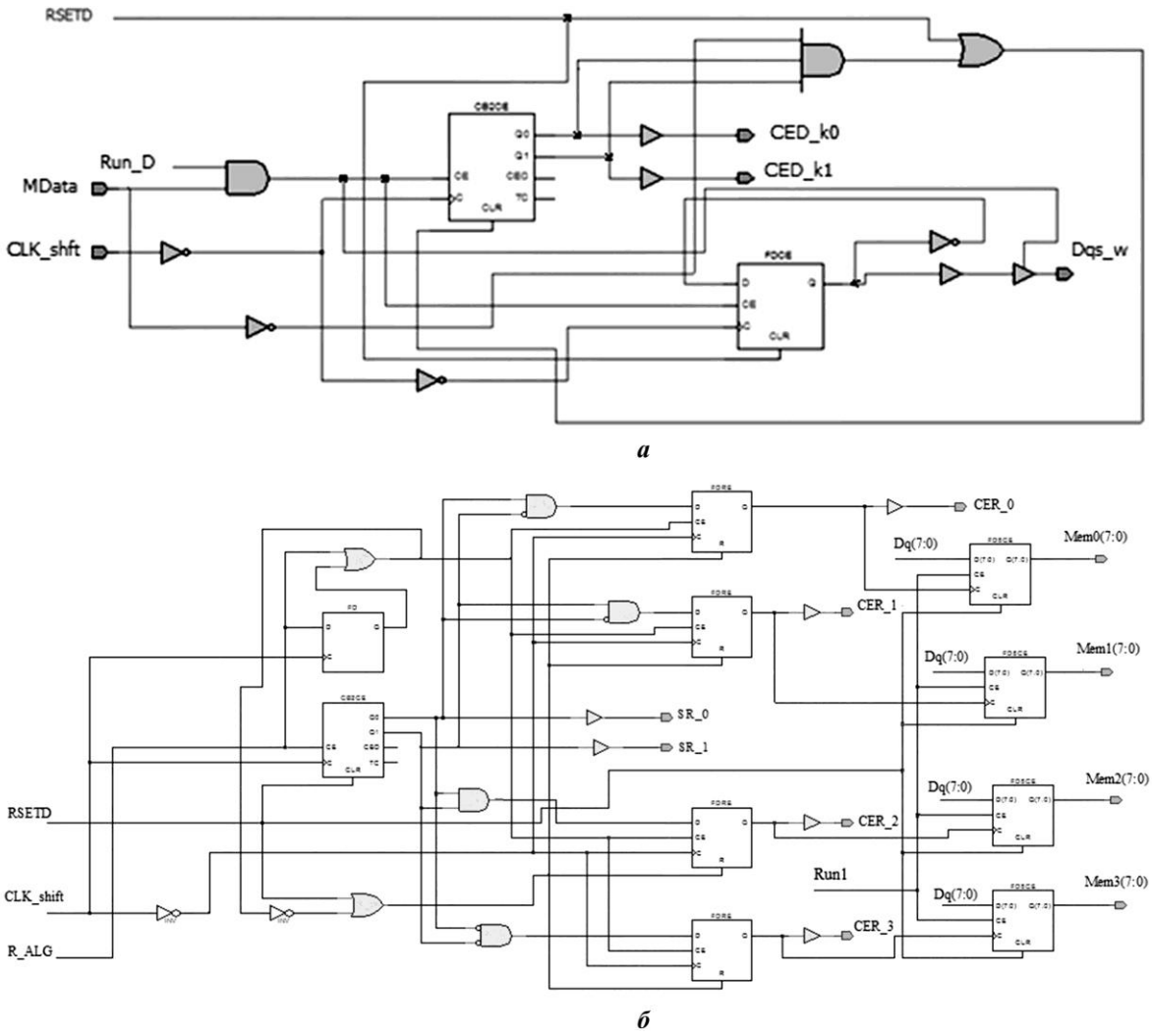


Рис.2. Схемы формирователя сигнала Dqs_w в режиме записи (*а*) и сигналов CER_0-CER_3 (*б*)
Fig.2. Diagram of the Dqs_w signal generator in recording mode (*a*) and of the signals generator CER_0-CER_3 (*b*)

В исходное состояние счетчик и *D*-триггер переключаются сигналом RSETD. При поступлении на вход формирователя сигналов Run_D и MData двухразрядный счетчик формирует сигналы CED_k0 и CED_k1, а *D*-триггер начинает работать в счетном режиме под управлением высокочастотного синхронизирующего сигнала CLK_shift и на выходе схемы формируется сигнал Dqs_w. После того как счетчик по синхросигналу CLK_shift досчитает до трех, счетчик и *D*-триггер переключаются в нулевые состояния и формирование сигнала Dqs_w прекращается. При нулевом состоянии сигнала на входе MData сигнал Dqs_w переключается в отключенное (третье) состояние.

Схема формирователя сигналов CER_0-CER_3 приведена на рис.2,*б*. Высокочастотный синхросигнал CLK_shift активизирует работу двухразрядного счетчика, который формирует сигналы SR_0 и SR_1. Их сочетание обеспечивает формирование сигналов CER_0-CER_3, определяющих моменты приема пачки считанных данных, состоящей из четырех 8-разрядных слов. Данные Dq(7:0), считанные из микросхемы памяти, в моменты времени, определяемые сформированными стробами CER_0-CER_3, заносятся в приемные регистры, с выходов которых сигналы Mem0(7:0)–Mem3(7:0) передаются на входы компараторов для сравнения с эталонными данными.

С помощью навигатора проектов Xilinx ISE разработана программная модель УТД микросхем памяти DDR SDRAM. Структура проекта УТД и основные процедуры процесса его имплементации в ПЛИС приведены на рис.3. Сообщение, выведенное на экран монитора, свидетельствует о завершении процесса программирования ПЛИС.

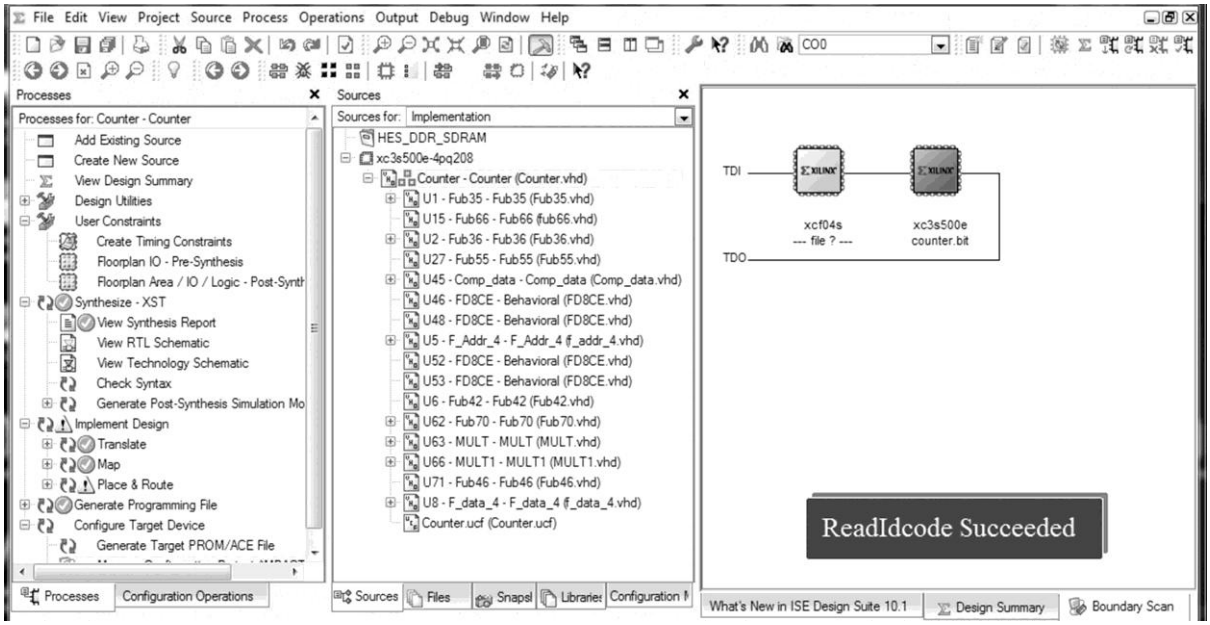


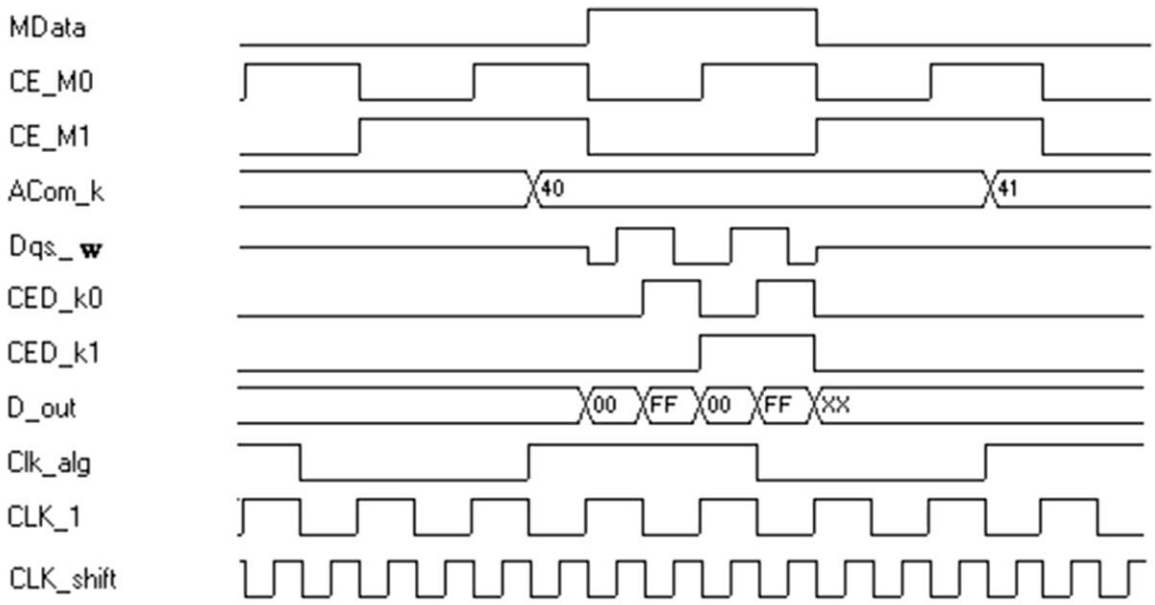
Рис.3. Структура проекта УТД и основные процедуры его имплементации в ПЛИС
Fig.3. Project structure of the test diagnostics device and procedure for its implementation in FPGA

Результаты и их обсуждение. Получены следующие параметры УТД, имплементированного в ПЛИС XC3S500E: количество входов-выходов 56 из 158 (35 %); число синхросигналов GCLKs 4 из 24 (16 %); минимальный период 14,764 нс (максимальная частота 67,732 МГц); потребляемая мощность 159 МВт; емкость памяти конфигурации проекта 188 МВ.

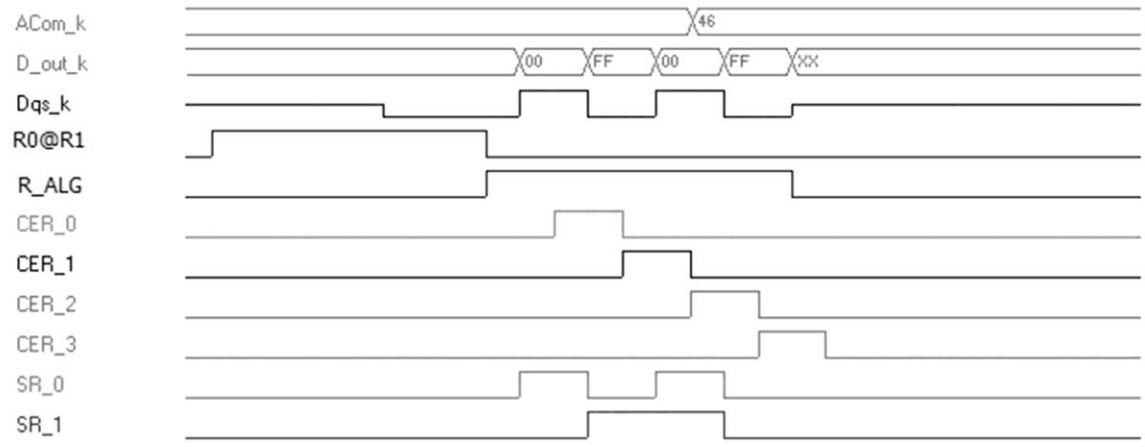
Для проверки работоспособности проекта УТД выполнено его моделирование в различных режимах работы. Временная диаграмма формирования сигнала Dqs_w в режиме записи пакета данных приведена на рис.4,*а*.

Частота сигнала Clk_shift в два раза выше, чем частота сигнала CLK_1. С использованием двухразрядного счетчика формируются сигналы CED_k0 и CED_k1, которые разделяют период УТД на четыре полупериода. По команде ACom_k=40 УТД выдает сигнал записи, разрешающий формирование сигнала Dqs_w. В режиме считывания данных микросхема памяти формирует сигнал Dqs_k, фронты которого совпадают с фронтами считанных данных D_out_k. Однако преобразовать строб Dqs_k для приема

считанных данных операторами задержки WAIT FOR и after невозможно, так как программируемые линии задержки не реализуются в интегральном исполнении. Для приема считанных данных УТД формирует сигнал R0@R1, разрешающий считывание данных в двух смежных тактах. С помощью группы *D*-триггеров сигнал R0@R1 преобразуется в сигнал R_ALG, активизирующий работу схемы, которая формирует стробирующие сигналы CER_0-CER_3. Эти сигналы определяют моменты приема считанных данных (рис.4,*б*).



а



б

Рис.4. Временные диаграммы формирования сигнала Dqs_w (*а*) и сигналов CER_0-CER_3 (*б*)
Fig.4. Time diagrams of the Dqs_w signal generation (*a*) and of the signals forming CER_0-CER_3 (*b*)

Заключение. Ввиду сложной и строгой логики управления и высоких требований к синхронизации необходима детальная разработка интерфейса УТД для его правильной реализации при подключении к памяти DDR SDRAM.

Проект УТД, выполняющего тестовое диагностирование памяти DDR SDRAM, реализован в интегральном исполнении, что позволяет уменьшить его габаритные раз-

меры и сократить материальные затраты на изготовление. При применении соответствующих драйверов, можно сформировать дифференциальные сигналы для подключения к УТД современных быстродействующих микросхем памяти LPDDR5-типа.

Литература

1. ***Белоусов С., Мёрдок Б.*** Особенности памяти LPDDR5 и ее поддержка // Электроника: наука, технология, бизнес. 2020. № 4 (195). С. 70–77. DOI: https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.195.4.70.77

2. DDR5/4/3/2: How Memory Density and Speed Increased with each Generation of DDR / VIP Central // SYNOPSYS: [Web] / Synopsys, Inc. 27.02.2019. URL: https://blogs.synopsys.com/vip-central/2019/02/27/ddr5-4-3-2-how-memory-density-and-speed-increased-with-each-generation-of-ddr/ (дата обращения: 16.08.2020).

3. ***Махаджан Р.*** Принципы проектирования интерфейсов памяти, лежащие в основе перехода от DDR2 к DDR3 / пер. с англ. Г. Городецкой // Компоненты и технологии. 2010. № 9 (110). С. 135–138.

4. ***Islam M.A., Arafath M.Y., Hasan M.J.*** Design of DDR4 SDRAM controller // 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). Dhaka: IEEE, 2014. P. 148–151. DOI: https://doi.org/10.1109/ICECE.2014.7026950

5. ***Bonatto A.C., Soares A.B., Susin A.A.*** DDR SDRAM controller IP designed for reuse // Design & Reuse: [Web] / Design and Reuse. 2014. URL: https://www.design-reuse.com/articles/20146/ddr-sdram-controller-ip.html (дата обращения: 06.04.2020).

6. ***Bonatto A.C., Soares A.B., Susin A.A.*** DDR SDRAM memory controller validation for FPGA synthesis // LATW2008: Proceedings of the 9th IEEE Latin-American Test Workshop. Puebla: IEEE, 2008. P. 177–182.

7. ***Sirisha G., Subhakararao B.*** Design and implementation of DDR SDRAM controller based on FPGA in satellite navigation system // International Journal of Research in Advent Technology. 2015. Vol. 3. No. 1. P. 90–95.

8. ***Евдокимов А.П., Рябцев В.Г., Меликов А.В.*** Принципы проектирования устройств тестового диагностирования быстродействующих микросхем и модулей полупроводниковой памяти // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 2. С. 23–30. DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-2-23-30

9. Методы и средства повышения надежности модулей памяти компьютеров: монография / ***С.В. Волобуев, А.П. Евдокимов, А.В. Меликов и др***. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2018. 280 с.

10. ***Ryabtsev V.G., Almadi M.*** New technology for memory tests design // International Journal of Modern Trends in Engineering and Research. 2015. Vol. 2. Iss. 7. P. 520–526.

11. ***Ryabtsev V., Evseev K., Almadi M.*** The concept of memory device diagnosis algorithm design // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). 2016. Vol. 3. Iss. 10. P. 5771–5774.

Поступила в редакцию 24.02.2020 г.; после доработки 22.03.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

Волобуев Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и электрохозяйства предприятий АПК Волгоградского государственного аграрного университета (Россия, 400002, г. Волгоград, Университетский пр-т, 26), sergey-aspir14@yandex.ru

Рябцев Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования и электрохозяйства предприятий АПК Волгоградского государственного аграрного университета (Россия, 400002, г. Волгоград, Университетский пр-т, 26), akim.onoke@mail.ru

References

1. Belousov S., Murdock B. LPDDR5 features and support. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2020, no. 4 (195), pp. 70–77. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.195.4.70.77

2. Experts, V.I.P. DDR5/4/3/2: How memory density and speed increased with each generation of DDR: Synopsys. *VIP Central*. 27.02.2019. Available at: https://blogs.synopsys.com/vip-central/2019/02/27/ddr5-4-3-2-how-memory-density-and-speed-increased-with-each-generation-of-ddr/ (accessed: 16.08.2020).

3. Mahajan R. Memory design considerations when migrating to DDR3 interfaces from DDR2. *Design & Reuse.* 2010. Available at: https://www.design-reuse.com/articles/15699/ddr3-ddr2-interfaces-migration.html (accessed: 06.04.2020).

4. Islam M.A., Arafath M.Y., Hasan M.J. Design of DDR4 SDRAM controller. *8th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, Dhaka, IEEE, 2014, pp. 148–151. DOI: https://doi.org/10.1109/ICECE.2014.7026950

5. Bonatto A.C., Soares A.B., Susin A.A. DDR SDRAM controller IP designed for reuse. *Design & Reuse.* 2014. Available at: https://www.design-reuse.com/articles/20146/ddr-sdram-controller-ip.html (accessed: 06.04.2020).

6. Bonatto A.C., Soares A.B., Susin A.A. DDR SDRAM memory controller validation for FPGA synthesis. *LATW2008: Proceedings of the 9th IEEE Latin-American Test Workshop*, Puebla, IEEE, 2008, pp. 177–182.

7. Sirisha G., Subhakararao B. Design and implementation of DDR SDRAM controller based on FPGA in satellite navigation system. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 90–95.

8. Evdokimov A.P., Ryabtsev V.G., MelikovA.V. Principles of designing devices for test diagnosing of high-speed microchips and semiconductor memory. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- i Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2018, no. 2, pp. 23–30. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-2-23-30

9. Volobuyev S.V., Evdokimov A.P., Melikov A.V., Ryabtsev V.G., Shubovich A.A. *Methods and Means of Increasing the Reliability of Computer Memory Modules*, monograph. Volgograd, Volgograd State Agricultural University, 2018. 280 p. (In Russian).

10. Ryabtsev V.G., Almadi M. New technology for memory tests design. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 2015, vol. 2, iss. 7, pp. 520–526.

11. Ryabtsev V., Evseev K., Almadi M. The concept of memory device diagnosis algorithm design. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 2016, vol. 3, issue 10, pp. 5771–5774.

Received 24.02.2020; Revised 22.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

Sergey V. Volobuev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electrical Equipment and Electrical Facilities of Agricultural Enterprises Department, Volgograd State Agrarian University (Russia, 400002, Volgograd, Universitetskiy ave., 26), sergey-aspir14@yandex.ru

Vladimir G. Ryabtsev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electrical Equipment and Electrical Enterprises of Agriculture Department, Volgograd State Agrarian University (Russia, 400002, Volgograd, Universitetskiy ave., 26), akim.onoke@mail.ru

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

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2020 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 004.93’1:004.932:004.021 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-291-301**

Оценка вероятности выполнения целевых функций автомата видеоконтроля

Н.В. Степанов

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

stepanov@olvs.miee.ru

Качество работы систем автоматического видеоконтроля определяется оптическими характеристиками видеокамеры и особенностями самого алгоритма видеообработки. Критерием эффективности применения автоматического видеоконтроля может служить вероятность выполнения заданной целевой функции. В работе предложен способ оценки эффективности работы автоматической аппаратуры видеоконтроля фоноцелевой обстановки – определение вероятности выполнения целевых функций (обнаружения, захвата и автосопровождения объекта). Теоретическая оценка вероятности выполнения целевых функций построена на базе критерия Джонсона и с использованием модели оптимального приемника. Результаты экспериментальной проверки предложенного способа показали, что обнаружение объекта происходит при уровне отношения сигнал/шум более 6. Данный уровень можно рассматривать как нижний уровень гарантированного обнаружения объекта с вероятностью 0,9.

Ключевые слова: обработка изображений; обнаружение объекта; захват объекта; автосопровождение объекта; вероятность обнаружения объекта; распознавание изображений

Для цитирования: Степанов Н.В. Оценка вероятности выполнения целевых функций автомата видеоконтроля // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 291–301. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-291-301

© Н.В. Степанов, 2021

Estimation of the Automated Video Control Device's Target Functions Performance Probability

N.V. Stepanov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

stepanov@olvs.miee.ru

Abstract: Operating quality of automated video control systems depends on optical specifications of video camera and peculiar features of video algorithm. Specified target function performance probability can serve as criterion of automated video control use efficiency. In this work, a new performance efficiency estimation method for automated equipment of target environment video control is suggested: to estimate the probability of target functions' (object detection, capture, and auto tracking) performance. Theoretical prediction of target functions performance probability was built upon Johnson's criterion and the use of optimal receiver model. The results of suggested method's experimental verification have shown that target detection occurred when signal/noise ratio level was above 6. This level can be regarded as low value to ensure that object is detected with probability 0.9.

Keywords: image processing; object detection; object capture; object auto tracking; target detection probability; image recognition

For citation: Stepanov N.V. Estimation of the automated video control device's target functions performance probability. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 291–301. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-291-301

Введение. Автоматическая обработка видеоданных от объектов широко применяется в системах видеонаблюдения и видеоконтроля [1, 2]. Развитию автоматизации таких систем способствуют рост числа различных алгоритмических методов распознавания изображений, прежде всего алгоритмов глубокого обучения (Deep Leaning) [3], а также появление нового класса вычислительного оборудования – микросуперкомпьютеров, например NVidia Jetson [4]. Качество работы систем автоматического видеоконтроля во многом определяется как оптическими характеристиками видеокамеры, так и особенностями самого алгоритма видеообработки. Поэтому эффективность применения таких систем следует оценивать с учетом параметров видеосенсора для рационального выбора типа и оптической конструкции источника входных данных. При этом критерием эффективности может служить вероятность выполнения заданной целевой функции (ЦФ).

Рассматриваемой проблеме посвящен ряд работ [5–7], в которых подробно исследуются вопросы выбора рабочего диапазона систем видеонаблюдения, определения типа и требований к фотоприемнику, дается оценка качества и дальности обнаружения объектов. При этом основное внимание уделяется оптической части системы без учета специфики дальнейшей обработки видеоизображения. В настоящей работе предлагается упрощенный способ оценки эффективности применения систем автоматического видеоконтроля, в которых роль человека сведена к минимуму. Такой подход к оценке автоматических видеосистем представляется актуальным.

Способы решения проблемы получения качественного исходного видеоизображения. Выбор видеокамеры для автоматических систем видеонаблюдения и видеоконтроля, или автомата видеоконтроля (АВК), как правило, начинается с подбора параметров объектива и видеоматрицы [8–10]. Выбрать оптическую и электронную части АВК для конкретных условий применения помогают специальные калькуляторы [11]. Для определения требуемых характеристик видеокамеры используются следующие соотношения геометрической оптики [12]:

$$F = hL/H, \tag{1}$$

где F – фокусное расстояние объектива; h – размер изображения объекта на видеоматрице; L – дальность до объекта; H – размер (габарит) объекта;

$$\omega = 2\text{arctg}(R/(L+R)), \tag{2}$$

где ω – угловое поле зрения видеокамеры; R – радиус поля зрения.

Размер изображения можно представить как

$$h = dn/N, \tag{3}$$

где d, n – минимальные габариты соответственно видеоматрицы и изображения в пикселях; N – число пикселей в столбце видеоматрицы.

Выражения (1) и (2) можно представить в виде

$$F = dnL/H, \tag{4}$$

$$\omega = 2\text{arctg}(HN/(2Ln+HN)). \tag{5}$$

Таким образом, задавая требуемый размер изображения в пикселах и выбирая соответствующую видеоматрицу, можно оценить оптические характеристики АВК или по заданным оптическим и геометрическим параметрам выбрать параметры видеоматрицы. Отметим, что данный подход к оценке характеристик видеокамер достаточно широко распространен на практике. Однако для точного расчета требуются учет дополнительных условий съемки и специальное программное обеспечение, например Zemax [13].

Определив минимальный габарит изображения объекта на фокальной плоскости в пикселах видеоматрицы, можно оценить вероятность выполнения ЦФ АВК (функций обнаружения, захвата и автосопровождения). Такая оценка может проводиться как теоретически, так и экспериментально. Для теоретической оценки вероятности ЦФ предлагается применять способы, основанные на критерии Джонсона. Экспериментальная оценка опирается на результаты исследования качества работы созданного в МИЭТ автомата видеоконтроля, при этом используются специально разработанные тестовые видеопоследовательности.

Теоретическая оценка вероятности выполнения ЦФ. Исходя из того, что алгоритмы выполнения ЦФ (обнаружения, захвата и автосопровождения) основаны на общем принципе сравнения характеристик «эталона» и объекта, можно сделать вывод о возможности применения единой теоретической оценки вероятности принятия правильного решения для всех ЦФ.

Оценка вероятности выполнения ЦФ по критерию Джонсона. Для оценки вероятности выполнения ЦФ используется критерий Джонсона [14], широко применяемый в телевизионной технике для расчета характеристик оптических систем наблюдения. Данный критерий предполагает участие оператора и основан на использовании возможностей зрения человека в части решения задачи распознавания образов. Приме-

нение критерия Джонсона для систем автоматического обнаружения и сопровождения дает возможность сравнивать качество выполнения ЦФ человеком и аппаратурой.

Оценим вероятность принятия правильного решения при выполнении ЦФ АВК. Предполагается, что искомый объект обязательно находится в поле зрения фотоприемника. Согласно критерию Джонсона общую задачу классификации объектов целесообразно разбить на три подзадачи (обнаружение, распознавание и идентификация цели) и проводить отдельную оценку вероятности верного решения этих подзадач. Под верным решением понимается правильное определение:

- координат некоторого похожего на «эталон» объекта (обнаружение);
- класса обнаруженного объекта в соответствии с «эталоном» (распознавание);
- типа обнаруженного объекта в соответствии с «эталоном» (идентификация).

Термин «верное решение» означает субъективную оценку результата действия человека-наблюдателя и не имеет четкого математического определения, хотя суммарный результат «верного решения» оценивается строго статистически по результатам практики. Под определением класса понимается отнесение объекта к определенному отличительному виду на видеоизображении, например это характерные видимые размеры, форма. Под определением типа понимается более детальная идентификация объекта, например выделение отдельных характерных признаков (наличие определенных элементов одежды, положение частей тела человека, наличие характерных элементов конструкции объекта), пестрота видимого профиля изображения. Решение задачи обнаружения сводится к определению местоположения объекта, задачи распознавания – к определению того, что найденный объект может представлять интерес, задачи идентификации – к распознаванию его типа для принятия эффективного решения.

При выполнении конкретных расчетов зададим типовые габариты целевого объекта, например составляющие 2 × 1 м. Будем считать, что данные параметры мало отличаются для разных целевых объектов. Тогда, учитывая определенное на основе соотношений (4) и (5) разрешение оптической системы АВК (матрица 1,27", фокусное расстояние объектива 7 мм, дальность до объекта 250 м, угол обзора 25º), составляющее 7 пикселей/м, типовые размеры целевого объекта будут составлять 14 × 7 пикселей.

Для применения критерия Джонсона необходимо задать критический (наименьший) видимый размер целевого объекта и выразить его в парах линий разрешения видеоизображения (разделить на 2). В рассматриваемом случае критический размер объекта составит 3,5 пар линий разрешения. С учетом ±25 % разброса полученных экспериментально результатов применения критерия Джонсона минимальное разрешение принимается равным 2,5 пар линий для наихудшего случая. Далее, используя таблицу, в которой показана зависимость вероятности обнаружения объекта от неравномерности фона и разрешения изображения (в парах линий), дадим теоретическую оценку вероятности выполнения ЦФ. В данном случае применяется упрощенная модель фоноцелевой обстановки: фон разделен на три группы по показателю неравномерности.

Вероятность обнаружения объекта по критерию Джонсона
Probability of object detection by the Johnson criterion

Вероятность обнаружения	Неравномерность фона		
	низкая (*SCR* > 10)	средняя (1 < *SCR* < 10)	высокая (*SCR* < 1)
1,0	1,7	2,8	–
0,95	1,0	1,9	–
0,9	0,9	1,7	7,0
0,8	0,75	1,3	5,0
0,5	0,5	1,0	2,5

Неравномерность фона определяется по следующей формуле:

$$SCR = \frac{M - m_n}{\sqrt{(\sum_{i=1}^{N} \sigma_i^2 / N)}}, \quad (6)$$

где *SCR* (Signal to Clutter Ratio) – отношение сигнала к фону; M – максимальная интенсивность излучения целевого объекта; m_n – математическое ожидание интенсивности фона; σ_i – среднеквадратическое отклонение интенсивности фона i квадрата; N – число квадратов разбиения фона.

При использовании формулы (6) предполагается, что весь фон разбивается на N смежных квадратов со стороной, равной удвоенному критическому размеру целевого объекта в пикселах. Полагая, что среднеквадратические отклонения интенсивности квадратов разбиения приблизительно равны, а также, что M больше среднеквадратического отклонения интенсивности целевого объекта σ_n, получаем $SCR > SNR$, где *SNR* (Signal to Noise Ratio) – отношение сигнал/шум (ОСШ), которое определяется как

$$SNR = \frac{m_o - m_n}{\sigma_n}. \quad (7)$$

Заменив в таблице показатель *SCR* на *SNR* и задав типичное значение $SNR > 6$, определим вероятность выполнения ЦФ для заданной неравномерности фона и полученного разрешения целевого объекта. При наименьшем допустимом *SNR* оценочная вероятность обнаружения объекта составляет 0,95.

Отметим, что приведенная оценка относится только к одной из функций АВК – обнаружению. Согласно критерию Джонсона для надежного распознавания требуемое разрешение необходимо увеличить в 4 раза, что приведет к эквивалентному уменьшению оценки числа пар линий на критический размер. Значит, при использовании данного критерия для распознавания разрешение объекта необходимо принять равным 0,6 пар линий. Тогда наибольшая вероятность выполнения ЦФ составит только 0,5 для равномерного фона $SCR > 10$. Для идентификации требуется уже шестикратное уменьшение оценки числа пар линий на критический размер, что приводит к выводу о невозможности достоверного выполнения ЦФ. Таким образом, данная видеосистема может быть использована только для обнаружения и распознавания.

Оценка вероятности выполнения ЦФ с использованием модели эквивалентного оптимального приемника. В отличие от систем видеонаблюдения, где наблюдателем является человек, для АВК оценку вероятности выполнения ЦФ необходимо проводить на основе теоретической модели эквивалентного оптимального приемника, которая не предполагает участия человека [15]. Такая модель первоначально строится для фоноцелевой обстановки (ФЦО) с равномерным фоном, а затем учитывается неравномерность яркости окружения. При этом основное соотношение, определяющее искомую вероятность обнаружения объекта P_o, имеет вид

$$P_o = \Phi\,(q_s/2), \quad (8)$$

где Ф – интеграл вероятности Лапласа; q_s – суммарное ОСШ оптимального фотоприемника, которое вычисляется на основе учета уровней помехи пространственной дискретизации и случайного шума:

$$q_s = \frac{q_1 q_2}{\sqrt{q_1^2 + q_2^2}}. \quad (9)$$

Здесь q_1 и q_2 – ОСШ соответственно пространственной дискретизации и остальных шумовых составляющих.

Согласно теоретическим оценкам и практической проверке, выполненных в АО «НИИ ОЭП» (г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.), составляющие ОСШ могут быть определены следующим образом [15]:

$$q_1 = 4A,$$
$$q_2 = \frac{\sqrt{A}\cdot|N_o - N_f|}{\sqrt{(N_o + N_f + 2N_m)/2 + N_p^2 + N_c^2}}, \qquad (10)$$

где A – площадь объекта, выраженная в элементах разрешения; N_o – абсолютная максимальная яркость (интенсивность) объекта; N_f – абсолютная яркость равномерного фона; N_m – средняя яркость свечения монитора; N_p – средняя оценка шума фотоприемника; N_c – оценка шума квантования фотоприемника.

В рассматриваемом случае использование средств отображения информации не предполагается, поэтому полагаем $N_m = 0$. Кроме того, шум квантования и собственный шум фотоприемника будут достаточно малы, так как видеодатчик реализует 12-разрядное преобразование, а в системе используются только восемь старших разрядов и выполняется калибровка. Следовательно, $N_p = 0$ и $N_c = 0$.

Используя принятую модель изображения, зададим площадь объекта $A = 14 \times 7$ элементов разрешения. Яркость равномерного фона можно считать равной $N_f = 128$ (середина 8-разрядной шкалы), что достигается при калибровке фотоприемника. Диапазон изменения яркости объекта принимаем как $N_o = 128\ldots255$ (объект ярче, чем фон).

Итоговое значение интеграла вероятности по формуле (8) получим, проведя подстановку $x = (N_o–B)/B$, где $B = N_f$ и $y = P_o(N_o)$. Подстановка по оси x выполнена для сопоставления данных результатов с полученными ранее, так как соотношение $(N_o–B)/B$ эквивалентно ОСШ для равномерного фона без учета пространственной дискретизации и дополнительных шумов. На рис.1 показана зависимость вероятности выполнения ЦФ от ОСШ для обнаружения, распознавания и идентификации объекта на равномерном фоне, на фоне средней и высокой неравномерности.

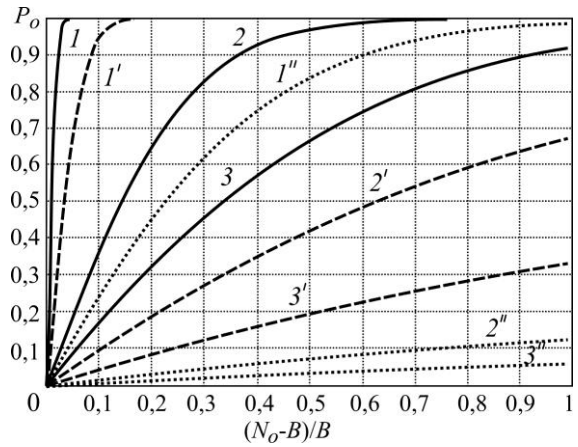


Рис.1. Оценка вероятности выполнения ЦФ: —— равномерный фон; ----- средняя неравномерность фона; ····· высокая неравномерность фона (*1*, *1′*, *1″* – обнаружение; *2*, *2′*, *2″* – распознавание; *3*, *3′*, *3″* – идентификация)

Fig.1. Estimation of the probability of performing target function: —— uniform background; ----- average background unevenness; ····· high background unevenness (*1*, *1′*, *1″* – detection; *2*, *2′*, *2″* – recognition; *3*, *3′*, *3″* – identification)

В случае распознавания объекта в соответствии с критерием Джонсона суммарное ОСШ оптимального фотоприемника q_s уменьшено в 4 раза. Аналогично, исходя из того же критерия для идентификации, q_s уменьшено в 6 раз. Таким образом, для рассматриваемой ФЦО можно достигнуть очень высокой вероятности распознавания ($P_o > 0{,}99$) при ОСШ более 6,0.

Дополнительно для учета неравномерности фона суммарное ОСШ уменьшено в 2 и 5 раз (см. рис.1). В результате при ОСШ, равном 0,6, задача обнаружения решается с вероятностью 0,9 для всех типов фона, а задачи распознавания и идентификации решаются с высокой вероятностью лишь для равномерного фона.

Полученный результат совпадает с ранее проведенной оценкой вероятности выполнения ЦФ по критерию Джонсона. При этом если для АВК необходимо выполнять автоматическую идентификацию объектов заданных размеров (2 × 1 м), то оптическая система должна иметь разрешение в 2,5 раза выше (см. рис.1).

Оценка вероятности выполнения ЦФ для малых углов наблюдения. Для определения качества работы АВК необходимо провести оценку вероятности выполнения ЦФ для углов наблюдения объектов менее 60° (малых углов) относительно плоскости размещения объекта. Очевидно, что влияние малых углов на вид изображения приводит к искажению наблюдаемой формы и полному или частичному его пропаданию. Во время пропадания видимого изображения объекта реализовать ЦФ невозможно и оценка вероятности обнаружения или автосопровождения теряет смысл. Поэтому в качестве мешающего фактора ФЦО будем рассматривать только искажение формы.

Искажение формы зависит от ориентации объекта. Фактор ориентации объекта непосредственно влияет на вероятность выполнения ЦФ, которая оценивается по критерию Джонсона. При этом целевой объект классифицируется как протяженный (отношение длины к ширине составляет более 2). Тогда, если текущая ориентация объекта при малых углах дает искажение, которое приближается к видимой боковой проекции, эквивалентное уменьшение оценки числа пар линий на критический размер составит 30 %. В результате для целевого объекта при малых углах оценочное видимое разрешение составит 1,7 пар линий. Согласно таблице вероятность обнаружения в данном случае равна 0,9 для средней неравномерности ($SNR > 6$), вероятность распознавания будет менее 0,5, и надежная идентификация вообще невозможна. В случае когда искажение формы объекта для малых углов будет приближаться к изображению, соответствующему передней проекции (наименьший габарит), эквивалентное уменьшение числа пар линий на критический размер составит приблизительно 55 %. Тогда оценочное видимое разрешение составит 1,1 пар линий. Из таблицы получаем вероятность выполнения ЦФ, равную 0,5 для средней неравномерности фона, и вероятность обнаружения, равную 0,95 для низкой неравномерности фона. В этом случае оценка вероятности распознавания и идентификации будет очень низкой и надежное выполнение этих функций не гарантируется.

Таким образом, при малых углах наблюдения и заданном наименьшем допустимом ОСШ оценка вероятности обнаружения объекта для наихудшего случая составляет 0,5, что является недопустимым для систем видеоконтроля.

Оценить вероятность выполнения ЦФ для малых углов наблюдения, используя модель эквивалентного оптимального приемника, можно, задав соответствующую видимую площадь объекта A. Если положить, что $A = 14 \times 5$ элементов разрешения (типовой объект виден в проекции по максимальной длине, 5 элементов составляет высота), и использовать для расчетов формулы (8)–(10), то получим оценки вероятности выполнения ЦФ в виде графиков для задач обнаружения, распознавания и идентификации объекта на равномерном фоне, на фоне средней и высокой неравномерности (рис.2,*а*).

Представленные графики позволяют сделать вывод о том, что в данном случае задача обнаружения (см. рис.2,*а*, кривые *1*, *1'*, *1''*) может быть решена достаточно достоверно для фона с любой неравномерностью. Для задач распознавания и идентификации имеется достаточная вероятность выполнения ЦФ только в случае равномерного фона.

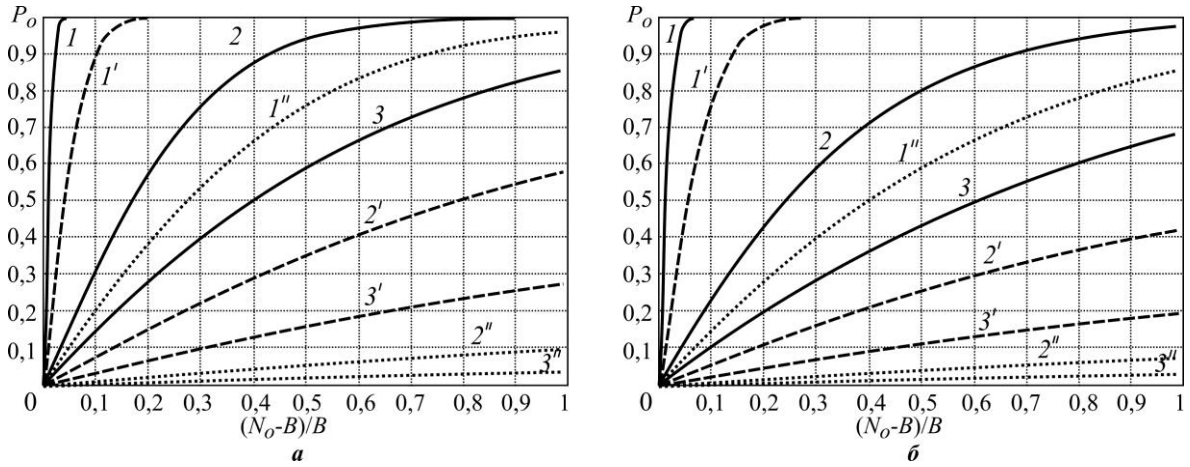


Рис.2. Оценка вероятности выполнения ЦФ для малых углов (*а*) и в наихудшем случае (*б*): —— равномерный фон; ----- средняя неравномерность фона; ····· высокая неравномерность фона (*1*, *1′*, *1″* – обнаружение; *2*, *2′*, *2″* – распознавание; *3*, *3′*, *3″* – идентификация)

Fig.2. Estimation of the probability of performing target function for small angles (*a*) and in the worst case (*b*): —— uniform background; ----- average background unevenness; ····· high background unevenness (*1*, *1′*, *1″* – detection; *2*, *2′*, *2″* – recognition; *3*, *3′*, *3″* – identification)

Значит, для реализации идентификации разрешение АВК должно быть повышено в 5 раз. Наихудшая ситуация возникает, если объект виден в проекции по меньшему геометрическому размеру при малом угле. Тогда $A = 7 \times 5$ элементов разрешения и результат расчета по (8)–(10) будет таким, как на рис.2,*б*. Анализ графиков показывает, что и в данном случае достаточная вероятности выполнения ЦФ имеется лишь для задачи обнаружения.

Таким образом, проведенная с использованием модели эквивалентного оптимального приемника теоретическая оценка вероятности выполнения ЦФ для малых углов наблюдения объекта в целом совпадает с аналогичной оценкой по критерию Джонсона. Для реализации идентификации в этом случае разрешение АВК должно быть повышено в 10 раз.

Экспериментальная оценка вероятности выполнения ЦФ с использованием аппаратуры АВК. Для экспериментальной оценки вероятности выполнения функций обнаружения, захвата и автосопровождения объектов, которые реализуются алгоритмом работы аппаратуры АВК, были разработаны 37 тестовых видеопоследовательностей на основе фотографий реальных объектов, их моделей и натурной видеосъемки. Тестирование выполнялось с использованием аппаратуры АВК, программного обеспечения и методик испытаний изделия, разработанных в рамках технического проекта системы видеоконтроля.

Оценка вероятности выполнения ЦФ проводилась по трем группам тестов:

- видеосъемка движущейся модели объекта с расстояния около 3 м (9 тестовых видеопоследовательностей);

- видеопоследовательности, созданные путем синтеза изображений на основе реальных фотографий различных объектов с расстояния примерно 250 м (8 тестовых видеопоследовательностей);

- набор тестов, полученных редактированием результатов видеосъемки объектов с расстояния примерно 250 м и редактированием фотоматериала с учетом изменения масштаба реальных изображений целей с расстояния менее 250 м (20 тестовых последовательностей).

Тестовые видеопоследовательности включают в себя целевые объекты (один или несколько, размер изображения объекта не менее 14 × 7 элементов) на ФЦО с различным заданным ОСШ (больше или меньше 6). При тестировании изделия на видеопоследовательностях с ОСШ больше 6 объект имеет достаточное видимое разрешение, поэтому при захвате выполняется надежное сопоставление с «эталоном», а при сопровождении полученное изображение позволяет достаточно точно определять положение объекта. Если ОСШ меньше 6, то из-за относительно низкого качества изображения объектов и наличия в кадре других артефактов схожей яркости, происходит захват ложного объекта. Можно сделать вывод, что обнаружение целевого объекта при таком ОСШ на изображении носит случайный характер и негарантированно.

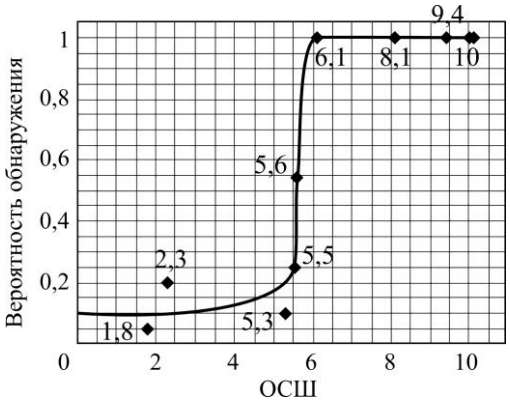


Рис.3. Результаты экспериментальной проверки работы АВК
Fig.3. Results of the experimental verification of automatic video monitoring

После проведения серии экспериментов на различных тестовых наборах выявлена зависимость вероятности обнаружения объекта от уровня ОСШ (рис.3). На данном рисунке точками с числовыми значениями отмечены усредненные результаты проверок. В качестве примера одного из наборов тестов, использованных для экспериментов, можно привести видеоданные, опубликованные в [16].

Заключение. Результаты оценки качества обнаружения объекта, включающие в себя проверки при его масштабировании (изменении видимых размеров), имитация масштабирования на синтезированных видеопоследовательностях и натурная съемка, выполненные в соответствии с параметрами ФЦО, показали следующее. Обнаружение объекта достоверно происходит при уровне ОСШ более 6 (из более двух десятков проверок нет ни одного ложного захвата). Данный уровень ОСШ можно рассматривать как нижний уровень гарантированного обнаружения объекта с вероятностью 0,9.

В результате тестирования определено, что вероятность успешного нахождения на изображении целевого объекта превышает 0,9 при увеличении уровня ОСШ до 6.

Сопоставление теоретической оценки и экспериментальных проверок работы АВК показывает схожесть полученных результатов.

Литература

1. ***Ворона В.А., Тихонов В.А.*** Технические средства наблюдения в охране объектов. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 188 с.

2. ***Смирнов В.М.*** Технические средства телевизионных систем наблюдения: монография. СПб.: ГУАП, 2016. 329 с.

3. ***Будума Н.*** Основы глубокого обучения: создание алгоритмов для искусственного интеллекта следующего поколения / пер. с англ. А. Коробейникова. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2020. 298 с.

4. NVIDIA Jetson: ИИ-платформа для любых автономных устройств // NVIDIA Россия [Электронный ресурс] / NVIDIA Corporation. Cop. 2021. URL: https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/ (дата обращения: 10.02.2020).

5. ***Кулакова Н.Н., Мишин С.В.*** Анализ результатов расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации тепловизионной системы по двум методикам // Контенант. 2015. № 3. С. 24–30.

6. ***Новиков С.Н., Поликанин А.Н.*** Методика расчета дальности действия тепловизора на основе объединенных параметров температурной чувствительности и разрешения // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 6–14. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-4-6-14

7. ***Сельвесюк Н.И., Веселов Ю.Г., Гайденков А.В., Островский А.С.*** Оценка характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля // Труды МАИ. 2018. № 103. С. 21.

8. ***Тульева Н.Н.*** Киносъемочная оптика: учеб. пособие. СПб.: СПбГИКиТ, 2017. 141 с.

9. ***Khorokhorov A.M., Piskunov D.E., Shirankov A.F.*** First-order method of zoom lens design by means of generalized parameters // Journal of the Optical Society of America A. 2016. Vol. 33. No. 8. P. 1537–1545. DOI: https://doi.org/10.1364/JOSAA.33.001537

10. Как выбрать камеру видеонаблюдения – характеристики видеокамер // Video-Rec [Электронный ресурс]. Cop. 2010. URL: http://video-rec.ru/helpful-information/cctv/characteristics-of-cctv-cameras/ (дата обращения: 12.02.2020).

11. IP video system design tool // JVSG: CCTV Design Software: [Web] / IPICA Software LLC. Cop. 2021. URL: https://www.jvsg.com/ (дата обращения: 12.02.2020).

12. ***Слюсарев Г.Г.*** Геометрическая оптика. Изд. 2-е. М.: URSS: Ленанд, 2019. 331 с.

13. Zemax: Design for Manufacturability: [Web] / ZEMAX LLC. Cop. 2021. URL: https://www.zemax.com/ (дата обращения 14.02.2020).

14. ***Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.*** Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 443 с.

15. ***Абакумова А.А., Малинова Т.П., Меденников П.А., Павлов Н.И.*** Программно-алгоритмический комплекс имитационного моделирования для исследования и разработки оптико-электронных систем наблюдения // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 8. С. 56–64. DOI: https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-08-56-64

16. Laboratoire d'interprétation et de traitement d'images et vidéo (LITIV) codes and datasets // Polytechnique Montréal Technical University: [Web] / Polytechnique Montréal. Cop. 2021. URL: https://www.polymtl.ca/litiv/en/codes-and-datasets (дата обращения: 20.02.2020).

Поступила в редакцию 21.04.2020 г.; после доработки 01.02.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

Степанов Николай Викторович – кандидат технических наук, системный инженер Научно-исследовательского института вычислительных систем и средств управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), stepanov@olvs.miee.ru

References

1. Vorona V.A., Tikhonov V.A. *Technical Means of Surveillance in the Protection of Objects.* Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2018. 188 p. (In Russian).

2. Smirnov V.M. *Technical Means of Television Surveillance Systems,* monograph. Saint Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation, 2016. 329 p. (In Russian).

3. Buduma N., Locascio N. (contrib.) *Fundamentals of Deep Learning: Designing Next-Generation Machine Intelligence Algorithms.* Beijing, O'Reilly Media, 2017. 298 p.

4. NVIDIA Jetson: AI-platform for any autonomous devices. (In Russian). *NVIDIA Embedded Systems for NEXT-GEN Autonomous Machines.* Available at: https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/ (accessed 10.02.2020).

5. Kulakova N.N., Mishin S.V. Analysis of the results of the calculation ranges of detection, recognition and identification of thermal imaging system by two methods. *Kontenant,* 2015, no. 3, pp. 24–30. (In Russian).

6. Novikov S.N., Polikanin A.N. Calculation method of the thermal-imaging equipment operation range based on the united parameters: the temperature sensitivity and resolution. *Proceedings of Telecommunication Universities,* 2019, vol. 5, no. 4, pp. 6–14. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-6-14

7. Selvesyuk N.I., Veselov Yu.G., Gaydenkov A.V., Ostrovsky A.S. Performance evaluation of objects detection and identification on an image from special optoelectronic systems for airfield observations. *Trudy MAI,* 2018, no. 103, p. 21. (In Russian).

8. Tulyeva N.N. *Camera Optics.* Saint Petersburg, St. Petersburg State Institute of Film and Television, 2017. 141 p. (In Russian).

9. Khorokhorov A.M., Piskunov D.E., Shirankov A.F. First-order method of zoom lens design by means of generalized parameters. *JOSA A,* 2016, vol. 33, no. 8, pp. 1537–1545. DOI: https://doi.org/10.1364/JOSAA.33.001537

10. How to choose a CCTV camera – Characteristics of cameras. (In Russian). *Video-Rec*. Available at: http://video-rec.ru/helpful-information/cctv/characteristics-of-cctv-cameras/ (accessed 12.02.2020).
11. CCTV Design Software. *JVSG*. Available at: https://www.jvsg.com/ (accessed 12.02.2020).
12. Slyusarev G.G. *Geometrical Optics.* 2nd ed. Moscow, URSS, Lenand, 2019. 331 p. (In Russian).
13. Design for Manufacturability. *Zemax*. Available at: https://www.zemax.com/ (accessed 14.02.20).
14. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Watch-Type Infrared Systems.* Moscow, Logos Publ., 2004, 452 p. (In Russian).
15. Abakumova A.A., Malinova T.P., Medennikov P.A., Pavlov N.I. Algorithmic simulation-modeling software complex for the investigation and development of optoelectronic observation systems. *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, no. 8, pp. 503–509. DOI: https://doi.org/10.1364/JOT.86.000503
16. Laboratoire d'Interprétation et de Traitement d'Images et Vidéo (LITIV). Codes and Datasets. *Polytechnique Montréal Technical University.* Available at: https://www.polymtl.ca/litiv/en/codes-and-datasets (accessed 20.02.2020).

Received 21.04.2020; Revised 01.02.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the author:

Nikolay V. Stepanov – Cand. Sci. (Eng.), System Engineer of the Research Institute of Computational Systems and Controls, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), stepanov@olvs.miee.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

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

УДК 517.926.7 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-302-313

Исследование управляемости билинейных систем с ограниченным управлением

Л.Г. Гагарина, А.А. Доронина, Р.А. Фомин, Д.А. Чухляев

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

doronina.anna.a@mail.ru

В прикладных задачах теории оптимального управления и автоматического регулирования возникает вопрос управляемости билинейных систем с ограниченным управлением. Задачи оптимального управления, как правило, решаются численными методами для нахождения экстремума функционала, для системы дифференциальных уравнений решается краевая задача. С математической точки зрения синтез оптимальных систем управления представляет собой задачу нелинейного программирования в функциональных пространствах. В работе исследованы задачи о вполне управляемости билинейной управляемой динамической системы (УДС) на плоскости. Рассмотрена управляемость УДС как с неограниченным, так и с ограниченным управлением. Определено несколько критериев вполне управляемости УДС с ограниченным управлением. Приведены доказательства теорем управляемости систем, имеющих замкнутую траекторию. Предложены условия вполне управляемости УДС с их алгебраическим обоснованием.

Ключевые слова: билинейные системы; ограничения; вполне управляемость; управляемая динамическая система

Для цитирования: Гагарина Л.Г., Доронина А.А., Фомин Р.А., Чухляев Д.А. Исследование управляемости билинейных систем с ограниченным управлением // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 302–313. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-302-313

© Л.Г. Гагарина, А.А. Доронина, Р.А. Фомин, Д.А. Чухляев, 2021

Study of Controllability of Bilinear Systems with Limited Control

L.G. Gagarina, A.A. Doronina, R.A. Fomin, D.A. Chukhlyaev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

doronina.anna.a@mail.ru

Abstract: Optimal control is closely related to the choice of the most advantageous control modes for complex objects, which are described using ordinary differential systems. The problem of optimal control consists in calculating the optimal control program and synthesizing the optimal control system. This problem arises in the applied field of the optimal control theory, in the case when control is based on the principle of feedback and in automatic control systems. Optimal control problems, as a rule, are calculated by numerical methods to find the extremum of a functional or to solve a boundary value problem for a differential equation system. From a mathematical standpoint, the synthesis of optimal control systems is a nonlinear programming problem in functional spaces. In this study the problem of complete controllability of a bilinear control system on the plane was considered. The controllability of bilinear systems with both unlimited and limited control was studied. The evidences of closed trajectory systems controllability theorems were produced. The authors have defined multiple criteria of complete controllability for bilinear system with limited control. The complete controllability conditions of bilinear control system have been proposed with their algebraic reasoning. In the contemporary context of universal robotization of production, completely controllable systems matter in navigation, as well as in modeling of a number of economic and social processes.

Keywords: bilinear systems; constraints; complete controllability; controlled dynamical system

For citation: Gagarina L.G., Doronina A.A., Fomin R.A., Chukhlyaev D.A. Study of controllability of bilinear systems with limited control. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 302–313. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-302-313

Введение. Оптимальное управление тесно связано с выбором наиболее выгодных режимов управления сложными объектами, которые описываются с помощью систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Цель оптимального управления – расчет наилучшей программы управления и синтез самой системы оптимального управления.

Задачи о вполне управляемости билинейной управляемой системы на плоскости как с неограниченным, так и с ограниченным управлением возникают в прикладной области теории оптимального управления в случае, когда управление строится по принципу обратной связи, а также в системах автоматического регулирования. Решение данных задач актуально в условиях всеобщей роботизации производства, в области навигации, а также при моделировании экономических и социальных процессов.

Основные понятия. Динамическая система является управляемой (управляемая динамическая система, УДС), если описывается уравнением

$$\dot{x} = f\left(x, t, u\right), \tag{1}$$

где x – вектор-столбец с координатами $x^1,...,\ x^n$ в n-мерном пространстве состояний УДС $\{x\}$; f – вектор-функция с координатами $f^1,\ ...,\ f^n$, заданная и определенная для любых значений своих аргументов [1; 2, с. 79–82].

Для того чтобы однозначно определить решение системы (1) (функции $x(t),\ t_0 \le t$), необходимо задать начальный момент времени t_0 и начальное состояние системы – точку x_0, которая является состоянием системы в момент времени $t = t_0$:

$$x(t_0) = x_0. \tag{2}$$

Необходимо также определить управление УДС, представляющее собой функцию $u(t)$, принимающую свои значения из множества U и определенную на отрезке времени $[t_0,t_1]$. Если управление $u(t),\ t_0 \le t \le t_1$, принадлежит определенному классу измеримых кусочно-непрерывных функций, определенных на том же отрезке времени $[t_0,\ t_1]$, то такое управление $u(t) \in A(t_0,t_1),\ u \in U$ называется допустимым [3].

Предположим, что, как только заданы некоторое допустимое управление $u(t)$ и начальное условие (2), уравнение (1) имеет собственное и, по крайней мере, абсолютно непрерывное решение $x(t)$ на том же отрезке времени $t_0 \le t \le t_1$, удовлетворяющее начальному условию (2), т.е. почти всюду на $[t_0,\ t_1]$ существует единственное $\dot{x}(t)$.

Функцию $x(t),\ t_0 \le t \le t_1$, которая является решением уравнения (1) при некотором допустимом управлении $u(t),\ t_0 \le t \le t_1$, назовем допустимым движением УДС, соответствующим управлению $u(t)$. Таким образом, по определению каждому допустимому движению $x(t),\ t_0 \le t \le t_1$, соответствует, по крайней мере, одно допустимое управление $u(t),\ t_0 \le t \le t_1$, под действием которого получено движение $x(t)$.

Многообразие размерности $n-2$ на гиперповерхности траекторной воронки, которое разделяет локально участки этой поверхности с противоположно направленными штриховками, будем называть многообразием перемены штриховки на данной границе траекторной воронки.

Управляемость билинейных систем с неограниченным управлением. Пусть УДС представляет собой билинейную систему

$$\dot{x} = Ax + uBx, \quad x \in \{x\} = R^2, \tag{3}$$

где A и B – квадратные 2×2 матрицы с действительными элементами; u – скалярное управление.

Управление будет называться допустимым, если $u = u(t)$ – кусочно-непрерывная функция со значениями в R^1.

Пусть $M = R^2\{0\}$. Система (3) управляема, если из произвольного начального состояния $x_0 \in M$ изображающая точка системы (3) может за конечное время $T > 0$ перейти под действием допустимого управления $u = u(t),\ 0 \le t \le T$, в произвольное (заданное) конечное состояние x_1 [4, с. 34–36].

Пусть $x \in M$, тогда вектор Bx задает угол наклона касательной, проходящей через данную точку x, к траектории уравнения

$$\dot{x} = Bx. \tag{4}$$

Траектория уравнения (2) в множестве M является границей траекторных воронок УДС (3). Под действием допустимого управления можно двигаться сколь угодно близко к этой траектории, причем в обе стороны. В пределе при $u \to \infty$ можно считать, что допустимое движение возможно в обоих направлениях вдоль траектории уравнения (4), т.е. в обе стороны вдоль границы воронки УДС (3). Направление вектора Ax определяет штриховку этой границы в точке x.

Исследование свойств управляемости проводится отдельно для всех возможных случаев комбинаций двух собственных значений матрицы B, которая имеет: два равных между собой действительных собственных числа; два различных действительных собственных числа; два чисто мнимых собственных числа; два сопряженных комплексных собственных числа с действительными частями, отличными от нуля. Рассмотрим последовательно все случаи (рисунок).

Матрица B имеет два равных между собой действительных собственных числа. Предполагая, что УДС (1) приведена к виду

$$\dot{y} = A_1 y + uB_1 y, \tag{5}$$

где $B_1 = \begin{bmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}$ – жорданова форма матрицы; λ – кратное действительное собственное число матрицы.

Для исследования управляемости данной УДС рассматривается семейство траекторий уравнения

$$\dot{y} = B_1 y, \tag{6}$$

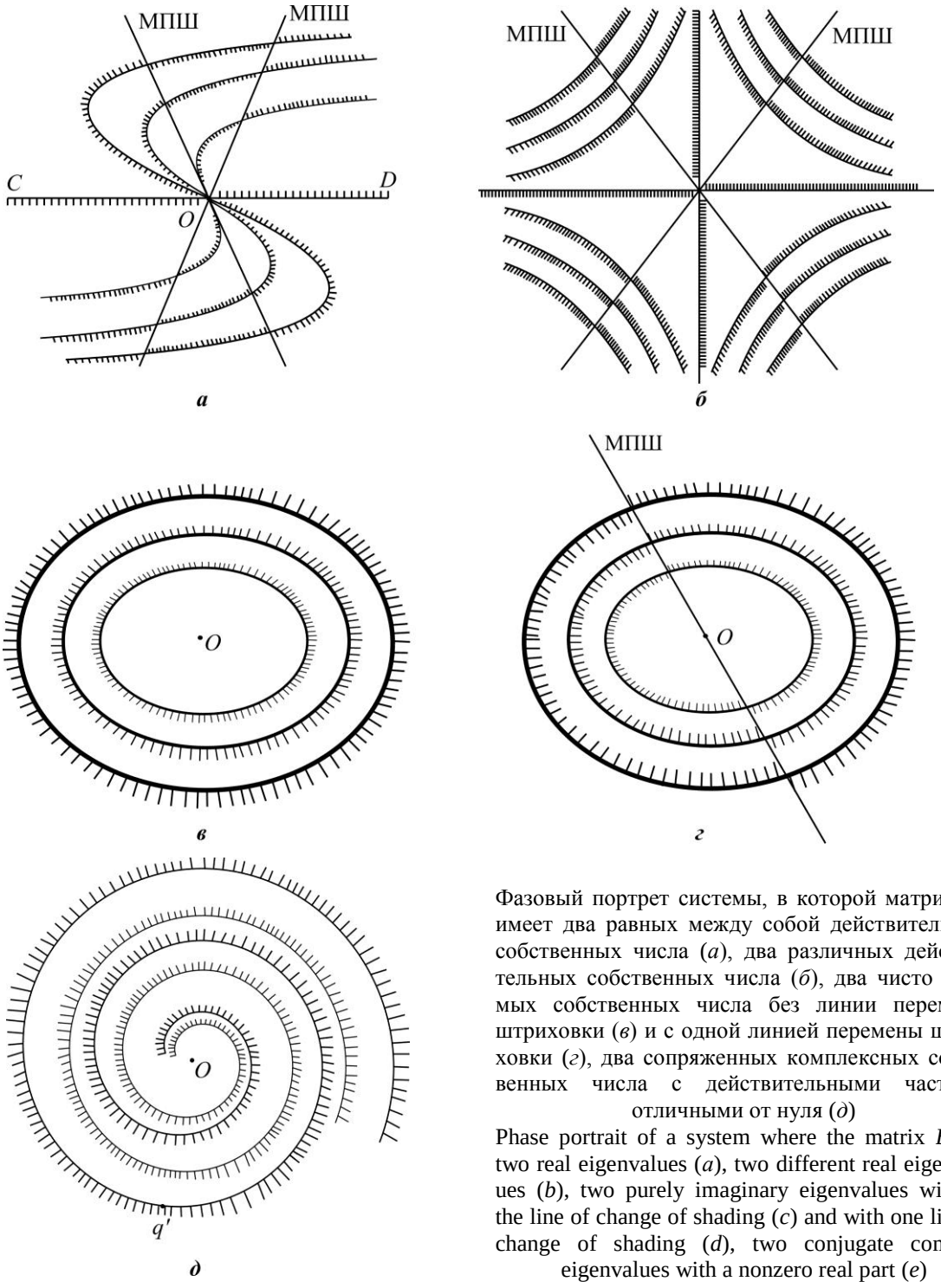
которые являются границами траекторных воронок УДС (5). Особая точка $y = 0$ уравнения (6) имеет вид узла. Можно показать, что для билинейной УДС (1) множествами перемены штриховки (МПШ) в множестве M могут быть только прямые линии, если они существуют, и притом не более двух.

С любой траектории уравнения (5), проходящей в верхней полуплоскости, можно перейти на другую траекторию, также проходящую в верхней полуплоскости, так как каждая траектория имеет особую точку, в которой штриховка меняет направление. Это утверждение справедливо и для двух произвольных траекторий (границ воронок), лежащих в нижней полуплоскости. Поскольку на прямой CD (рисунок *а*), принадлежащей семейству траекторий, штриховка определена, возможны переходы как с верхней полуплоскости в нижнюю, так и наоборот. Поэтому УДС (5) управляема. Заметим, что если на прямой CD штриховка не определена, то УДС (5) неуправляема.

Матрица B имеет два различных действительных собственных числа. Заменой переменных $y = Nx$, где N – некоторая невырожденная матрица второго порядка, от УДС (1) переходим к УДС вида

$$\dot{y} = A_1 y + uB_1 y, \tag{7}$$

где $A_1 = NAN^{-1}$; $B_1 = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}$ – диагональная матрица; λ_1, λ_2 – различные действительные собственные числа матрицы.



Фазовый портрет системы, в которой матрица B имеет два равных между собой действительных собственных числа (*а*), два различных действительных собственных числа (*б*), два чисто мнимых собственных числа без линии перемены штриховки (*в*) и с одной линией перемены штриховки (*г*), два сопряженных комплексных собственных числа с действительными частями, отличными от нуля (*д*)

Phase portrait of a system where the matrix B has two real eigenvalues (*a*), two different real eigenvalues (*b*), two purely imaginary eigenvalues without the line of change of shading (*c*) and with one line of change of shading (*d*), two conjugate complex eigenvalues with a nonzero real part (*e*)

Управляемость УДС (7) исследована в работах [5, с. 118–126; 6], где доказано, что УДС (7) управляема тогда и только тогда, когда элементы матрицы A_1 удовлетворяют условию

$$a_{12}\ a_{21} < 0. \qquad (8)$$

Условие (8) можно получить с помощью метода фазового портрета. В случае $\lambda_1\lambda_2 < 0$ семейство траекторий уравнения (4) имеет особую точку типа седла. Так как каждая траектория из этого семейства делит R^2 на две несвязные области, то для управляемости УДС (7) необходимо, чтобы на каждой такой траектории существовала точка, в которой штриховка траектории меняет направление. Это означает, что УДС (7) должна иметь две различные прямые линии перемены штриховки: $y^2 = k_1 y^1$ и $y^2 = k_2 y^1$ такие, что

$$k_1 k_2 < 0\,. \tag{9}$$

Уравнение линий перемены штриховки УДС (7) имеет вид

$$\lambda_2 a_{12}\left(y^2\right)^2 + \left(\lambda_2 a_{11} - \lambda_1 a_{22}\right) y^1 y^2 - \lambda_1 a_{21}\left(y^1\right)^2 = 0\,.$$

Так как приведенное уравнение не содержит членов, линейных по y^1, y^2, то линией перемены штриховки могут быть либо две различные прямые, проходящие через начало координат, либо одна такая прямая. Для выполнения условия (9) по теореме Виета необходимо, чтобы $a_{12}a_{21} < 0$. Если УДС (7) имеет две прямые линии перемены штриховки, то она имеет вид с точностью до направления штриховки (рисунок *б*). Видно, что УДС (7) полностью управляема [7].

Таким образом, если матрица B имеет два неравных между собой действительных собственных числа, то система (3) управляема тогда и только тогда, когда

$$\det\left[A, B\right] < 0\,. \tag{10}$$

Матрица B имеет два чисто мнимых собственных числа. В этом случае особая точка системы (4) имеет вид центра. Если у системы (3) нет линии перемены штриховки, то ее фазовый портрет имеет вид, представленный на рисунке *в*. Видно, что УДС неуправляема, так как, например, из окрестности особой точки нельзя попасть во все остальные точки пространства. Если у системы (3) существует хотя бы одна линия перемены штриховки, то с учетом свойства симметрии штриховки портрет имеет вид (с точностью до направления штриховки), показанный на рисунке *г*.

Система, имеющая хотя бы одну линию (прямую) перемены штриховки, полностью управляема, поскольку из любой точки множества M возможны управляемые переходы как в области, прилегающие к особой точке, так и в точки R^2, удаленные на любое расстояние от начала координат. Поэтому для рассматриваемых матриц B необходимое и достаточное условие управляемости – существование хотя бы одной линии перемены штриховки. Получим это условие в аналитическом виде. У билинейной системы уравнение прямых перемены штриховки имеет вид

$$\left|Ax \quad Bx\right| = 0\,. \tag{11}$$

Раскрывая выражение (11) и используя тот факт, что матрица B имеет чисто мнимые собственные числа, т.е. след матрицы $\operatorname{tr} B = 0$, получим необходимые и достаточные условия управляемости:

$$\det\left[A, B\right] + \left[\operatorname{tr} A\right]^2 \det B < 0\,. \tag{12}$$

Так как собственные числа матрицы B чисто мнимые, то $\det B > 0$. Поэтому необходимым условием управляемости является соотношение

$$\det[A, B] < 0. \tag{13}$$

Матрица B имеет два сопряженных комплексных собственных числа с действительными частями, отличными от нуля. В этом случае особая точка уравнения (4) имеет вид фокуса. Доказано, что если хотя бы в одной точке пространства штриховка определена, то система (3) управляема [2, 8].

Действительно, пусть штриховка определена в некоторой точке $x' \neq 0$. Из свойства симметрии штриховок следует, что в этом случае штриховка определена и во всех точках прямой, проходящей через точки q' и O (рисунок *д*). Следовательно, выходя из произвольной точки x_0 (она не изображена на рисунке *д*), можно по траектории уравнения (4) добраться до пересечения с прямой Ox_0. Так как в этой точке пересечения штриховка определена, то совершим согласно штриховке управляемый переход на спираль, проходящую через конечную точку x_1. Таким образом, для управляемости (3) в этом случае необходимо и достаточно, чтобы хотя бы в одной точке пространства была определена штриховка. Это условие управляемости эквивалентно условию

$$B \neq kA \tag{14}$$

для любого действительного числа.

Из соотношений (10), (12)–(14) вытекает необходимое и достаточное условие управляемости УДС (3):

- $\det[A, B] < 0$, если матрица B имеет действительные собственные числа и $B \neq kA$ при любом действительном числе k, где E – единичная матрица;

- $(\operatorname{tr} A)^2 - 4\det A < 0$, если $B = kA$ при некотором действительном числе k;

- $\det[A, B] + [\operatorname{tr} A]^2 \det B < 0$, если матрица B имеет чисто мнимые собственные числа;

- $B \neq kA$ для любого действительного числа k, если B имеют комплексные собственные числа с действительной частью, не равной нулю.

Из проведенного анализа вытекает еще одно следствие: если $\det[A, B] > 0$, то УДС (3) неуправляема.

Управляемость билинейной системы с ограниченным управлением. Исследована управляемость системы при ограниченном управлении. Пусть

$$\dot{x} = Ax + uBx, \quad \alpha \le u \le \beta. \tag{15}$$

Без ограничения общности полагаем, что $u \in [-1,1]$. Тогда достаточно рассматривать управление, принимаемое значения $u = -1$ и $u = 1$. Таким образом, возможен переход по траекториям систем [8, 9]. Тогда имеют место следующие теоремы.

Теорема 1. Для вполне управляемости необходимо и достаточно, чтобы существовала замкнутая периодическая траектория системы, окружающая начало координат, на которой штриховка меняет направление.

Доказательство. Пусть система (15) вполне управляема в $R^2 \setminus \{0\}$. Тогда для любого x_0 существует такое время τ и такое управление $\tilde{u}$, которое переводит точку x_0 в симметричную ей точку $-x_0$.

Рассмотрим систему уравнений

$$\dot{x} = \left(A + uB\right)x,$$

где $A + uB = \begin{pmatrix} a_1 + ub_1 & a_2 + ub_2 \\ a_3 + ub_3 & a_4 + ub_4 \end{pmatrix}$, $\dot{x}$, x – векторы.

Получаем систему

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1\left(a_1 + ub_1\right) + x_2\left(a_2 + ub_2\right), \\ \dot{x}_2 = x_1\left(a_3 + ub_3\right) + x_2\left(a_4 + ub_4\right) \end{cases}$$

с условиями $x\left(0\right) = x_0$, $x\left(\tau\right) = -x_0$.

Управление u переводит x_0 в $-x_0$, тогда в силу симметрии u переводит также $-x_0$ в x_0. Следовательно, существует замкнутая периодическая траектория системы [9–11].

Теорема 2. Система (15) вполне управляема в $R^2 \setminus \{0\}$, если существует такое управление $u^* \in [\alpha, \beta]$, что $p\left(u^*\right) = \mathrm{tr}\left(A + u^*B\right) = 0$, $q\left(u^*\right) = \det\left(A + u^*B\right) > 0$ и дискриминант уравнения $\det\left(Ax, Bx\right) = 0$ строго больше нуля, т.е. $N^2 - 4MK > 0$.

Доказательство. Даны матрицы

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix} \text{ и } B = \begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{pmatrix}, \quad A + uB = \begin{pmatrix} a_1 + ub_1 & a_2 + ub_2 \\ a_3 + ub_3 & a_4 + ub_4 \end{pmatrix}.$$

Характеристическое уравнение имеет вид

$$\chi\left(\lambda\left(u\right)\right) = \lambda^2 - \mathrm{tr}\left(A + uB\right)\lambda = \det\left(A + uB\right).$$

Пусть $p\left(u\right) = \mathrm{tr}\left(A + uB\right)$, $q\left(u\right) = \det\left(A + uB\right)$, тогда

$$\lambda_i = \frac{p \pm \sqrt{p^2 - 4q}}{2}.$$

Если существует управление, то собственные числа системы (15) чисто мнимые. Достаточными условиями будут $p = 0$, $q > 0$. Следовательно,

$$\mathrm{tr}\left(A + uB\right) = a_1 + a_4 + u\left(b_1 + b_4\right) = 0.$$

Если $b_1 + b_4 \neq 0$, то существует управление

$$u^* = -\frac{a_1 + a_4}{b_1 + b_4} = -\frac{\mathrm{tr}A}{\mathrm{tr}B},$$

при этом

$$\det\left(A + u^*B\right) = \left(\frac{\mathrm{tr}A}{\mathrm{tr}B}\right)^2 \det B - \frac{\mathrm{tr}A}{\mathrm{tr}B}\left(\begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_3 & b_4 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix}\right) + \det A > 0.$$

Если у системы (15) нет линии перемены штриховки, то УДС неуправляема, так как, например, из окрестности особой точки нельзя попасть во все остальные точки пространства. Определим МПШ уравнением $\det(Ax, Bx) = 0$.

Получаем

$$\begin{vmatrix} a_1x_1 + a_2x_2 & b_1x_1 + b_2x_2 \\ a_3x_1 + a_4x_2 & b_3x_1 + b_4x_2 \end{vmatrix} = 0,$$

$$x_1^2(a_1b_3 - a_3b_1) + x_1x_2(a_1b_4 + a_2b_3 - a_3b_2 - a_4b_1) + x_2^2(a_2b_4 - a_4b_2) = 0.$$

Обозначим $M = a_1b_3 - a_3b_1$, $N = a_1b_4 + a_2b_3 - a_3b_2 - a_4b_1$, $K = a_2b_4 - a_4b_2$. Следовательно,

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{-N \pm \sqrt{N^2 - 4MK}}{2M}.$$

Для существования линии перемены штриховки необходимо, чтобы $N^2 - 4MK > 0$.

Итак, система (1) является вполне управляемой, если $p = 0$, $q > 0$ и $N^2 - 4MK > 0$.

Теорема 3. Для любого управления $u^* \in [\alpha, \beta]$ такого, что $\operatorname{tr}(A + u^*B) \neq 0$ и $\det(A + u^*B) > 0$, система (15) не является вполне управляемой в $R^2 \setminus \{0\}$.

Доказательство. Даны матрицы (2). Характеристическое уравнение системы (1) имеет вид (3). По условию теоремы

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \operatorname{tr}(A + u^*B) \neq 0,$$
$$\lambda_1\lambda_2 = \det(A + u^*B) > 0.$$

Следовательно, оба собственных значения системы (1) будут либо положительными (отрицательными) действительными числами, либо комплексными с положительной (отрицательной) действительной частью:

$$\operatorname{Re}\lambda_i(u) > 0, \quad \operatorname{Re}\lambda_i(u) < 0.$$

Рассмотрим скалярное произведение $v = (x, \dot{x}) = x^T\dot{x}$. Матрица $(A + uB)$ знакоопределенная в силу уравнения (5), следовательно производная $\dot{v}$, согласно системе (1), имеет вид

$$\dot{v} = 2x^T\dot{x} = 2x^T(A + uB)x \geq 0.$$

Если $\operatorname{tr}(A + uB) \geq 0$, то все решения удаляются от начала координат и образуется «белая дыра». Если $\operatorname{tr}(A + uB) \leq 0$, то и $\dot{v} \leq 0$ для любых $u \in [\alpha, \beta]$. Тогда все решения будут только приближаться к началу координат. В связи с этим система (14) не является вполне управляемой.

Без ограничения общности полагаем, что $u \in [-1,1]$. Тогда в силу принципа максимума Понтрягина [3] достаточно рассматривать управление $u \in \{-1,1\}$, т.е. управление $\tilde{u}(t)$, принимаемое значения $u = -1$ и $u = 1$:

$$\dot{x} = (A + Bu)x = Ax + Bxu, \qquad |u| \le 1.$$

Таким образом, если возможен переход из x_1 в x_2 (исходя из теоремы 1) и существует кусочно-постоянное оптимальное управление $u^*(t) \in \{-1,1\}$, т.е. возможен переход по траекториям систем

$$\dot{x} = (A + Bu)x \quad (+), \qquad \dot{x} = (A - Bu)x \quad (-).$$

В случае когда фазовый портрет системы имеет вид центра, система всегда будет управляемой при наличии хотя бы одной МПШ, так как из любой точки возможны управляемые переходы на любое расстояние. В связи с этим справедлива теорема 1.

Теорема 4. Для того чтобы система была вполне управляема в $R^2 \setminus \{0\}$, достаточно, чтобы $\exists u^* \in [\alpha,\beta] : \lambda(A + Bu^*) = \pm i\beta$ и $S(x) = \det(Ax, Bx)$ не была знакоопределенной.

Доказательство. Согласно фазовому портрету особой точки типа центра на рисунке *в,* система, имеющая хотя бы одну линию (прямую) перемены штриховки, полностью управляема, поскольку из любой точки возможны управляемые переходы.

Заключение. В ходе проведенного исследования определено несколько критериев вполне управляемости УДС с ограниченным управлением.

Приведенные доказательства теорем вполне управляемости систем, имеющих замкнутую траекторию, и предложенные условия вполне управляемости УДС с их алгебраическим обоснованием актуальны при решении прикладных задач теории оптимального управления и задач автоматического регулирования.

Литература

1. Исследование управляемости билинейных систем на плоскости с неограниченным управлением / ***Л.Г. Гагарина, Ю.В. Мастерков, А.А. Доронина и др.*** // Системы компьютерной математики и их приложения. 2020. № 21. С. 94–101.

2. ***Бутковский А.Г.*** Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965. 476 с.

3. ***Коган Е.А.*** Обыкновенные дифференциальные уравнения и вариационное исчисление: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2020. 293 с.

4. ***Бутковский А.Г.*** Методы управления системами с распределенными параметрами: монография. М.: Наука, 1975. 568 с.: ил.

5. ***Бутковский А.Г.*** Фазовые портреты управляемых динамических систем: монография. М.: Наука, 1985. 136 с.

6. ***Зубова С.П., Раецкая Е.В.*** Решение одной задачи управления для динамической системы в частных производных // Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП-2020): сб. материалов VIII Междунар. науч.-техн. конф. Белгород: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2020. С. 456–460.

7. ***Доронина А.А., Фомин Р.А., Чухляев Д.А.*** Особенности разработки метода статического выявления определяющих параметров // Микроэлектроника и информатика – 2020. 27-я Всероссийская межвузовская науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (Зеленоград, 1–9 октября 2020 г.): тез. докл. М.: МИЭТ, 2020. С. 119.

8. ***Мастерков Ю.В.*** О локальной управляемости нелинейных систем в критическом случае // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2006. № 3 (37). С. 97–98.

9. ***Мастерков Ю.В., Родина Л.И.*** Условия локальной управляемости систем со случайными параметрами // Вестник Удмуртского университета. Математика. 2006. № 1. С. 81–94.

10. ***Юрина Т.А.*** Оптимальное управление: учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2020. 71 с.

11. ***Царькова Е.Г.*** Оптимальное управление и моделирование систем: монография. Пенза: Наука и просвещение, 2019. 126 с.

Поступила в редакцию 13.09.2020 г.; после доработки 13.09.2020 г.; принята к публикации 14.04.2021 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), gagar@bk.ru

Доронина Анна Александровна – магистрант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), doronina.anna.a@mail.ru

Фомин Роман Андреевич – магистрант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), roman.a.fomin@mail.ru

Чухляев Дмитрий Алексеевич – магистрант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), chukhlyaev.dmitry@mail.ru

References

1. Gagarina L.G., Masterkov Yu.V., Doronina A.A., Fomin R.A., Chukhlyaev D.A. Study of controllability of bilinear systems with unlimited control. *Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya,* 2020, no. 21, p. 94–101. (In Russian).

2. Butkovskiy A.G. *Theory of Optimal Control of Systems with Distributed Parameters.* Moscow, Nauka Publ., 1965. 476 p. (In Russian).

3. Kogan E.A. *Ordinary Differential Equations and Calculus of Variations.* Moscow, INFRA-M Publ., 2020. 293 p. (In Russian).

4. Butkovskiy A.G. *Methods of Control of Systems with Distributed Parameters*, monograph. Moscow, Nauka Publ., 1975. 568 p. (In Russian).

5. Butkovskiy A.G. *Phase Portraits of Controlled Dynamical Systems*, monograph. Moscow, Nauka Publ., 1985. 136 p. (In Russian).

6. Zubova S.P., Raetskaya E.V. Solution of the control problem for a dynamic system in partial derivatives. *Information Technologies in Science, Education and Production (ITNOP-2020), Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference.* Belgorod, Belgorod State University, 2020, pp. 456–460. (In Russian).

7. Doronina A.A., Fomin R.A., Chukhlyaev D.A. Features of the development of a method for static identification of defining parameters. *Microelectronics and Informatics – 2020. 27th All-Russian Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates (Zelenograd, 1–9 October 2020), Book of Abstracts.* Moscow, MIET, 2020, p. 119. (In Russian).

8. Masterkov Ju.V. On the local controllability of nonlinear systems in the critical case. *Proceedings of the Institute of Mathematics and Informatics at Udmurt State University*, 2006, no. 3 (37), pp. 97–98. (In Russian).

9. Masterkov Ju.V., Rodina L.I. The conditions of local controllability for linear systems with stochastic parameters. *The Bulletin of Udmurt University. Mathematics*, 2006, no. 1, pp. 81–94. (In Russian).

10. Yurina T.A. *Optimal Control.* Omsk, SibADI Publ., 2020. 71 p. (In Russian).
11. Tsar'kova E.G. *Optimal Control and Modeling of Systems.* Penza, Nauka i prosveshcheniye Publ., 2019. 126 p. (In Russian).

Received 13.09.2020; Revised 13.09.2020; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gagar@bk.ru

Anna A. Doronina – Master's student of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), doronina.anna.a@mail.ru

Roman A. Fomin – Master's student of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), roman.a.fomin@mail.ru

Dmitry A. Chukhlyaev – Master's student of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), chukhlyaev.dmitry@mail.ru

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

С тематическими указателями статей за 1996 - 2020 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

http://ivuz-e.ru

УДК 621.384.3:528.8:[004.6:912.4] DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-314-323

Исследование антропогенных изменений в городском ландшафте по данным инфракрасного диапазона Landsat-8

А.А. Гостева[1,2], А.К. Матузко[1], О.Э. Якубайлик[1,2]

[1]Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск, Россия
[2]Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск, Россия

AGosteva@icm.krasn.ru

Изменения в городском ландшафте можно обнаружить с помощью дистанционного зондирования в видимом и дальнем инфракрасном диапазонах. Для исследования и мониторинга природно-антропогенных объектов широко применяется тепловая съемка. Использование нескольких источников пространственных данных расширяет возможности анализа. В работе проведен анализ данных с умеренным пространственным разрешением и ежедневной съемкой, полученных от спутника MODIS, со средним пространственным разрешением и периодичностью съемки примерно один раз в 14 дней – от спутника Landsat и высоким разрешением с возможностью получения нескольких сцен в сутки – от спутника PlanetScope. Предложена методика выявления антропогенных преобразований в городском ландшафте по температуре земной поверхности. Выявлены три категории изменений: без изменений, незначительные изменения с разницей температур 1–3 ºС и значительные изменения с разницей температур более 4 ºС. При анализе участков температурной карты с максимальными изменениями отмечено, что динамика изменений связана со строительством новых микрорайонов, торговых центров. Также изменение температуры поверхности зависит от изменения лесных ландшафтов, например в местах вырубки древесных насаждений.

Ключевые слова: тепловые космические снимки; коллекция данных; спутники Landsat; PlanetScope; температура поверхности земли; климат городской среды

Для цитирования: Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Исследование антропогенных изменений в городском ландшафте по данным инфракрасного диапазона Landsat-8 // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 314–323. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-314-323

© А.А. Гостева, А.К. Матузко, О.Э. Якубайлик, 2021

Study of Anthropogenic Changes in the Urban Landscape Based on the Landsat-8 Infrared Range

A.A. Gosteva[1,2], A.K. Matuzko[1], O.E. Yakubailik[1,2]

[1]Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia
[2]Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Krasnoyarsk, Russia

AGosteva@icm.krasn.ru

Abstract: Changes in the urban landscape can be detected using visible and far infrared remote sensing. Thermal imagery is widely used for research and monitoring of natural and anthropogenic objects. Multiple data sources use enhances spatial analysis capabilities. These sources are, for example, MODIS satellite data with moderate spatial resolution and daily surveys, Landsat data collection with medium spatial resolution and survey frequency of about once every 14 days, and high-resolution PlanetScope data with the ability to acquire multiple scenes per day. This paper proposes the methodology for identifying anthropogenic transformations in the urban landscape by land surface temperature. Three categories of changes were identified: no changes, minor changes with a temperature difference of 1–3 ºC and significant changes with a temperature difference of more than 4 ºC. When analyzing areas with maximum temperature changes, it was noted that the dynamics of changes are associated with changes in urban development, namely, with the construction of new microdistricts and shopping centers. A change in surface temperature is also associated with a change in forest landscapes, for example, in places where tree plantations were cut down.

Keywords: thermal satellite imagery; data collection; Landsat; PlanetScope; land surface temperature; urban environment climate

For citation: Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Study of anthropogenic changes in the urban landscape based on the Landsat-8 infrared range. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 314–323. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-314-323

Введение. Спектральные характеристики данных дистанционного зондирования Земли применяются в системах мониторинга изменений различных компонентов экосистем, природных и антропогенных ландшафтов и пр. При решении практических задач часто пользуются гиперспектральными спутниковыми изображениями. Такие изображения позволяют распознавать объекты, но требуют специализированных технологий обработки. Задача поиска объекта или разделение всех объектов на классы [1] является достаточно типичной и в последнее десятилетие ставится перед специалистами дистанционного зондирования.

Ландшафты современного города относятся к преобразованным культурным, где элементы, привнесенные в результате деятельности человека, преобладают над естественными, природными. Реконструкция городского ландшафта влечет за собой изменение климата города, что напрямую влияет на изменение температуры земной поверхности. Оценить такие изменения возможно как прямыми измерениями, так и дистанционными методами. В качестве дистанционных методов применяются данные

космической съемки с тепловым каналом. При выборе источников спутниковых данных учитываются такие характеристики, как периодичность съемки и пространственное разрешение.

В настоящей работе предлагается методика обнаружения изменений температуры земной поверхности в пределах одной территории за определенный промежуток времени и рассматривается ее применимость для определения антропогенных изменений ландшафта. Изменения температуры земной поверхности на территории г. Красноярска за двухлетний период (с сентября 2016 г. по сентябрь 2018 г.) определяются с помощью космических снимков в тепловом инфракрасном излучении.

Исходные данные. Объектом исследования являются территория г. Красноярска и его окрестности. Для поиска городских изменений используются данные от спутников MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Landsat-8, PlanetScope с различными пространственными разрешениями и периодами съемки. Самые ранние снимки спутниковой группировки PlanetScope территории г. Красноярска датированы 2016 г., поэтому в работе не учтены более ранние снимки. Для поиска изменений подобран снимок с похожими метеоусловиями в 2018 г.

Температура земной поверхности – это температура первой сплошной поверхности, т.е. земли, вершин деревьев или крыш зданий [2]. Данные сканирующего спектрорадиометра среднего разрешения MODIS, расположенного на спутниках Terra и Aqua, начали поступать с марта 2000 г. Спектрорадиометр с умеренным разрешением системы наблюдения Земли производит суточные данные о температуре поверхности. С помощью семи доступных тепловых инфракрасных диапазонов этот алгоритм может корректировать погрешности в профилях температуры и водяного пара без одновременного извлечения данных о поверхности или профилей переменных атмосфер. Коэффициенты излучения также необходимы для эксплуатационного продукта, поэтому MODIS оценивает их на основе классификации по типам растительного покрова с использованием тепловых инфракрасных двунаправленных функций распределения отражения и моделирования [3].

Данные продукта MOD11A1 версии 6 содержат информацию о ежедневной дневной температуре земной поверхности и его излучательную способность с пространственным разрешением ~ 1 км. Полученные данные имеют точность 1 K [4].

Данные американского спутника дистанционного зондирования Земли Landsat стали доступны для широкого круга пользователей ГИС-сообщества в декабре 2009 г. [5]. Запуск спутника Landsat-8 состоялся в феврале 2013 г. Спутник Landsat-8 получает данные с использованием двух разных датчиков – Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Изображения Landsat-8 состоят из 11 спектральных каналов, где 10-й и 11-й являются дальними инфракрасными полосами с пространственным разрешением 100 м, что позволяет анализировать энергию земной поверхности, а не отражение солнечного света [6]. Система Landsat не предоставляет готовые физические параметры, такие как температура поверхности, но они могут быть рассчитаны дополнительно [7]. С 2016 г. все данные Landsat, в том числе и Landsat-8, поставляются с геометрической и радиометрической коррекцией. Снимки с коррекцией хранятся в наборах Landsat Level-1 Data Processing Levels или Landsat Level-1 data product.

Снимки высокого разрешения космических аппаратов PlanetScope представлены в онлайн-сервисе [8]. Группировка PlanetScope насчитывает более 120 спутников, равномерно распределенных по орбите высотой ~ 500 км, и предназначена для регулярного космического мониторинга любой территории в высоком пространственном разрешении: четыре спектральных канала с разрешением 3,7 м – синий (0,450–0,515 мкм), зеленый (0,515–0,595 мкм), красный (0,605–0,695 мкм), ближний инфракрасный (0,740–0,900 мкм).

Вычисление температуры земной поверхности. Рассмотрим основные варианты расчета температуры земной поверхности, которые подробно описаны в работе [9] (для всех вариантов расчета использовано ПО QGIS):

1) с учетом атмосферной коррекции методом Radiative transfer equation с применением параметров, полученных в Atmospheric Correction Parameter Calculator, а также плагина Land Surface Temperature Estimation Plugin;

2) без учета известных атмосферных параметров с применением плагина Semi-Automatic Classification Plugin [10];

3) с использованием для классификации снимков высокого пространственного разрешения, например от PlanetScope.

Последний вариант является усовершенствованным, поэтому для оценки точности предлагаемых вариантов расчета температуры поверхности необходимо провести корреляцию между получившимися данными о температуре поверхности с использованием разных методов атмосферных коррекций Radiative transfer equation и DOS1 [11].

Устранение влияния атмосферы в термальной области необходимо для использования тепловых каналов при определении абсолютной температуры. Испускаемый сигнал ослабляется и усиливается атмосферой. Расчет радиационной передачи – сложный и долгий процесс. Калькулятор параметров атмосферной коррекции облегчает этот расчет [12]. Атмосферная коррекция методом Radiative transfer equation легко применима за счет доступа ко всем необходимым параметрам в открытых источниках и при использовании калькулятора атмосферных параметров. Для получения профиля атмосферы необходимо ввести обязательные параметры (дату и время, широту и долготу) и необязательные (данные о поверхности – высоту над уровнем моря, атмосферное давление, температуру и значение влажности). Если условия поверхности не предоставлены, будут использоваться предсказанные моделью условия поверхности. В настоящей работе данные о давлении, температуре и влажности получены службой rp5.ru, где хранятся архивы о фактической погоде, измеренной на наземных станциях прогнозирования погоды и мониторинга.

Сравнение результатов вычисления температуры земной поверхности. Для анализа результатов вычисления температуры поверхности с использованием различной атмосферной коррекции попиксельно сравним два растровых изображения за 2016 и 2018 г. Получим примерно 700 000 пикселей (рис.1). Значения корреляции равны: $R^2(2016) = 0{,}85$; $R^2(2018) = 0{,}65$.

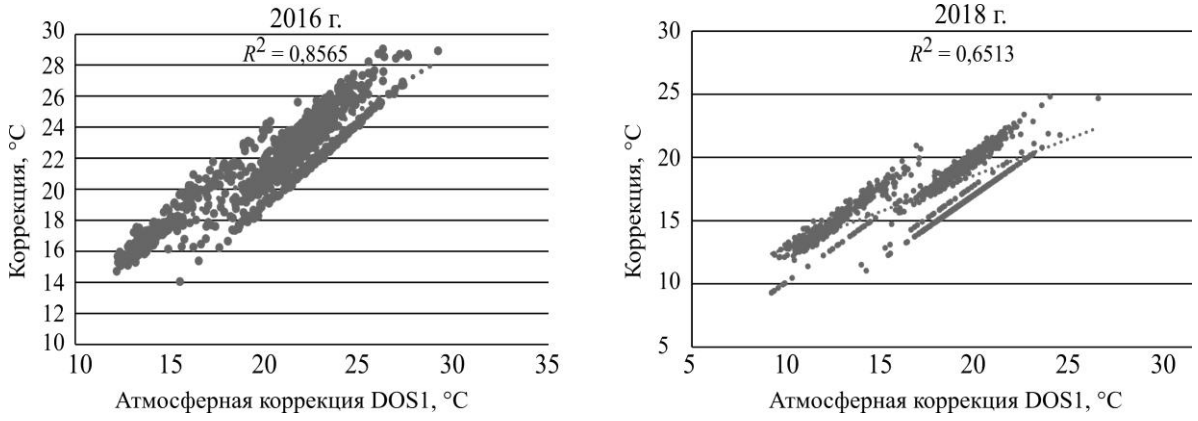


Рис.1. Растровые изображения земной поверхности с различной атмосферной коррекцией за 2016 и 2018 гг.

Fig.1. Bitmap images of the land surface with different atmospheric correction for 2016 and 2018

Несмотря на расхождение значений, полученных в результате использования различных вариантов расчета температуры земной поверхности, достоверность данных от Landsat-8 достаточна для выявления изменений в городском ландшафте.

Сравнение данных от MODIS и Landsat-8. Сравним значения температуры поверхности Земли, полученные от Landsat-8 и MODIS. Для данных от Landsat-8 проведено по три расчета за каждый год. Подобрано два готовых набора данных от MODIS (растровых слоя) на каждую из дат (20.09.2018 и 05.09.2016).

Растровый слой температуры поверхности Земли, полученный от MOD11A1, имеет пространственное разрешение 700 × 700 м. Эти данные будем считать эталонными. Слой векторных полигонов с шагом, соответствующим размеру ячейки растра, создается так, чтобы одна ячейка растра соответствовала одному полигону. С использованием геопространственного анализа каждому полигону присваивается среднее значение температуры земной поверхности Landsat-8 в рамках этого полигона. На следующем шаге формируется новый точечный слой с применением процедуры создания центроидов на основе полигонов. С помощью плагина Point sampling tool для каждой точки определяются значения температуры поверхности Земли от MODIS и вычисленные по данным Landsat-8 с учетом классификации по спектральным каналам PlanetScope. Из полученных значений убираются значения точек, которые находятся на границе реки или попадают в зону облачности снимка. Это необходимо, так как температура воды в реке Енисей после строительства ГЭС всегда примерно 7 °С, что сильно искажает среднюю температуру для этих полигонов. Всего было выбрано 1160 полигонов для сравнения температуры поверхности.

Корреляция значений для двух снимков за 2016 и 2018 г., полученных от Landsat-8 и MODIS, представлена на рис.2. Время пролета Landsat-8 – около 12 ч, MODIS – около 11 ч. Из графиков видно, что данные имеют высокую степень корреляции и могут быть использованы с точки зрения точности достаточно эффективно.

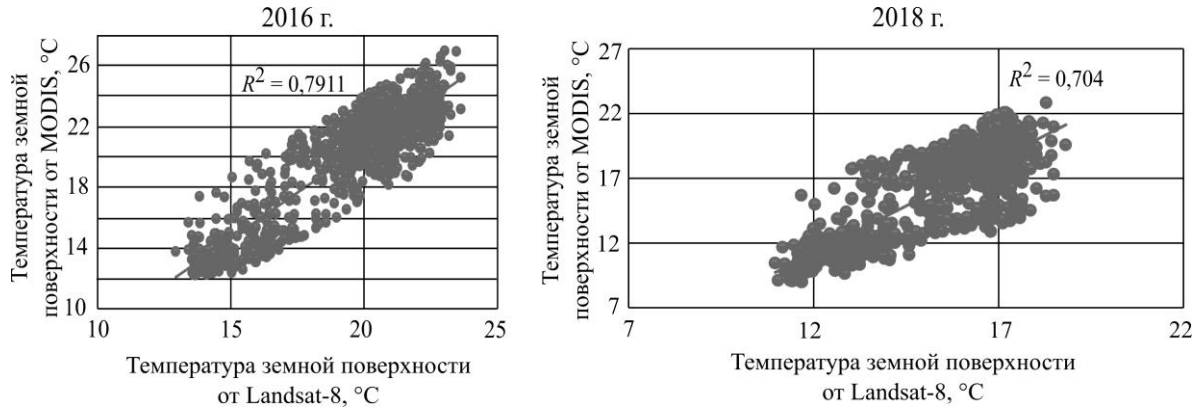


Рис.2. Корреляция значений снимков, полученных от Landsat-8 и MODIS, за 2016 и 2018 гг.
Fig.2. Correlation of imagery values between Landsat-8 and MODIS for 2016 and 2018

Несмотря на точность данных от MODIS, пространственного разрешения для городской территории недостаточно, поэтому в работе используются данные от Landsat-8. Температурный канал Landsat-8 имеет разрешение 100 м, но карта температур строится при использовании видимых каналов. Это позволяет увеличить пространственное разрешение до 30 м. Данные от PlanetScope увеличивают пространственное разрешение до 4 м.

Методика исследования антропогенных преобразований в городском ландшафте на основе температуры земной поверхности. Реконструкция городской застройки, искусственное изменение рельефа, вырубка лесных насаждений приводят к изменению городского климата. Соответственно, меняется температура поверхности, что является признаком изменений в городском ландшафте. Антропогенные преобразования в городском ландшафте исследуются на основе температурных карт, полученных по спутниковым данным Landsat-8 в тепловом и видимом диапазонах [13]. Сначала необходимо вычислить температуру поверхности на 20.09.2018 и 05.09.2016. Территория исследования ограничивается г. Красноярском, поэтому необходимо провести операцию оверлея по границе города для каждого результата вычисления.

Важный этап – нормирование данных для сравнения полученных температурных карт. По статистическим характеристикам каждого изображения, а именно по среднестатистическому значению температуры карты, вычисляется добавочное значение для операции нормирования. После этого проводится математическая операция алгебры карт, позволяющая вычитать одну карту из другой. В результате получается новое изображение, содержащее разницу между температурными значениями в каждом пикселе.

Для корректного выявления изменений по двум спутниковым снимкам необходимы безоблачные односезонные космические снимки с максимально равнозначными метеорологическими условиями. Для апробации методики выявления антропогенных преобразований в городском ландшафте подобраны спутниковые снимки территории г. Красноярска с идентичными метеоусловиями на сентябрь 2016 г. и сентябрь 2018 г. Набор изображений со спутника Landsat-8 представлен на даты 20.09.2018 и 05.09.2016. В таблице приведена температура воздуха в ночные и дневные часы на даты исследования для подбора максимально одинаковых погодных условий.

Данные о метеоусловиях на даты исследований
Weather for research dates

Дата	Температура воздуха, °C		Облачность	Направление и скорость ветра
	дневная	ночная		
20.09.2018	+15	+4	Безоблачно	Западный ветер со скоростью 1 м/с
05.09.2016	+19	+14	Малооблачно	Западный ветер со скоростью 2 м/с

Для сравнения температурных карт земной поверхности за 2016 и 2018 гг. проведена нормализация по среднему значению температуры поверхности в границах г. Красноярска. После нормализации средние значения становятся равными, и на следующем этапе выполняется математическая операция алгебры карт с вычитанием карты LST2016 из нормализованной карты LST2018. В результате вычитания получается новое изображение, содержащее разницу между значениями температуры в каждом пикселе для изучаемых дат. Полученные значения делятся на три категории: без изменений, незначительные изменения при разнице температур 1–3 °C и значительные изменения при перепаде температур более 4 °C.

Результаты и их обсуждение. Апробация методики исследования изменений городского ландшафта по температуре земной поверхности позволила создать тематическую карту разницы температур (рис.3). На карте выявлены участки со значительным изменением температуры (за два года температура изменилась на 4 °C и более).

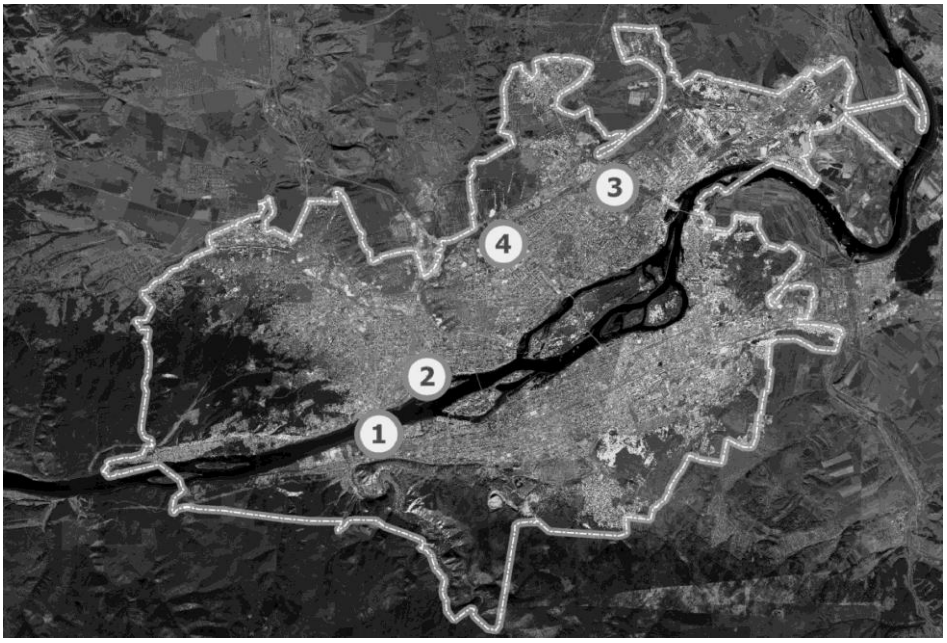


Рис.3. Карта анализа результатов: 1–4 – участки реорганизации городского ландшафта
Fig.3. Points for analysis results: 1–4 – urban landscape reorganization areas

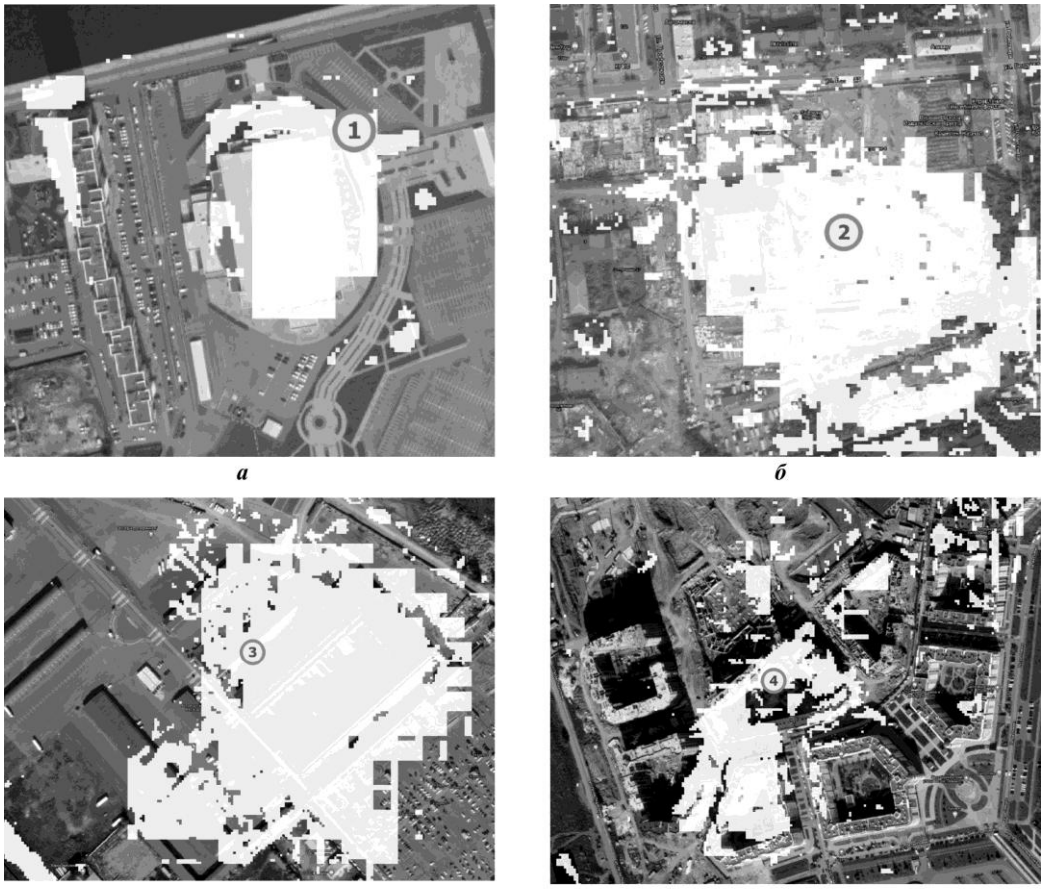


Рис.4. Температурные изменения городской территории (*а–г*) в результате строительства новых объектов (1–4)
Fig.4. Temperature changes in urban areas (*a–d*) as a result of the construction of new facilities (1–4)

На рис.4,*а* показано изменение температуры поверхности в результате строительства спортивного сооружения. В 2016 г. строительство объекта только начиналось. Выделены участки с повышением температуры поверхности, которые совпадают с контуром объекта, построенного в 2018 г. На рис.4,*б* представлена территория бывшего завода, где в 2017 г. был снесен производственный корпус для строительства жилых зданий. На рис.4,*в* приведен пример градостроительства в Советском районе, где вместо бывшего пустыря (2016 г.) построены в 2018 г. склады. На рис.4,*г* показан новый микрорайон Преображенский, выделены места изменения температуры поверхности, которые соответствуют строящимся новым домам в 2018 г.

Заключение. Высокая степень совпадений значений температуры земной поверхности, полученных разными методами классификации и атмосферной коррекции, свидетельствует о том, что может использоваться любой метод в зависимости от поставленной задачи и территории исследования. Сравнение температуры поверхности Земли, полученной от Landsat-8, с эталонными данными от MODIS показало, что степень корреляции достаточно высока и данные достоверны. Это важно для дальнейших исследований и применения температурных значений, полученных от Landsat-8. Таким образом, эти температурные значения могут применяться для поиска изменений на территории г. Красноярска. В результате получено новое изображение, отображающее разность температур для двух дат исследования (05.09.2016 и 20.09.2018).

При анализе территорий установлено, что максимальное изменение температуры земной поверхности связано с реорганизацией городского ландшафта, в частности строительством новых микрорайонов, торговых центров, а также утратой прежних свойств природного ландшафта (вырубкой лесов, изменением высоты поверхности). Анализ полученного изображения с разностью в 2 года позволяет найти изменения в застройке города и дает возможность оценить их влияние на городской тепловой контур.

Литература

1. ***Асмус В.В., Бучнев А.А., Пяткин В.П.*** Кластерный анализ данных дистанционного зондирования Земли // Автометрия. 2010. Т. 46. № 2. С. 58–66.

2. ***Laraby K.G., Schott J.R., Raqueno N.*** Developing a confidence metric for the Landsat land surface temperature product // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9840: Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXII (17 May 2016). P. 98400C. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2222582

3. ***Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.-L.*** Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature // International Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 25 (1). P. 261–274. DOI: https://doi.org/10.1080/0143116031000116417

4. MODIS Land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD). URL: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf (дата обращения: 26.02.2021).

5. ***Irons J.R., Rocchio L.*** History. From the beginning // Landsat Science: [Web] / NASA. 2013. URL: http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/history.html (дата обращения: 26.02.2021).

6. ***Fu P., Weng Q.*** Consistent land surface temperature data generation from irregularly spaced Landsat imagery // Rem. Sens. of Env. 2016. Vol. 184. P. 175–187. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.06.019

7. ***Irons J.R., Dwyer J.L., Barsi J.A.*** The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission // Rem. Sens. of Env. 2012. Vol. 122. P. 11–21. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026

8. Satellite imagery gallery // Planet: [Web]. URL: https://www.planet.com/products/explorer/ (дата обращения: 26.02.2021).

9. ***Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E.*** Detection of changes in urban environment based on infrared satellite data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. Iss. 6. P. 062051. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062051

10. ***Congedo L.*** Semi-automatic classification plugin documentation. Release 6.0.1.1. 2016. DOI: http://dx.doi. org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1

11. ***Зубкова К.И., Куревлева Т.Г., Пермитина Л.И.*** Оценка погрешности расчета NDVI при использовании эмпирических методов учета влияния атмосферы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3. № 2. С. 24–30.

12. ***Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi F.D., Hook S.J.*** Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5882: Earth Observing Systems X (22 August 2005). P. 58820E. DOI: https://doi.org/10.1117/12.619990

13. ***Effat H.A., Hassan O.A.K.*** Change detection of urban heat islands and some related parameters using multi-temporal Landsat images; a case study for Cairo city, Egypt // Urban Climate. 2014. Vol. 10 (1). P. 171–188. DOI: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.10.011

Поступила в редакцию 15.03.2021 г.; после доработки 15.03.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

Гостева Анна Александровна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Россия, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50), AGosteva@icm.krasn.ru

Матузко Александра Константиновна – младший научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44), akmatuzko@icm.krasn.ru

Якубайлик Олег Эдуардович – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Россия, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50), oleg@icm.krasn.ru

References

1. Asmus V.V., Buchnev A.A., Pyatkin V.P. Cluster analysis of Earth remote sensing data. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 58–66. (In Russian).

2. Laraby K.G., Schott J.R., Raqueno N. Developing a confidence metric for the Landsat land surface temperature product. *Proc. SPIE, vol. 9840, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXII* (17 May 2016), p. 98400C. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2222582

3. Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.-L. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, vol. 25 (1), pp. 261–274. DOI: https://doi.org/10.1080/0143116031000116417

4. *MODIS Land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD).* Available at: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf (accessed: 26.02.2021).

5. Irons J.R., Rocchio L. History. From the beginning. *Landsat Science*, NASA, 2013. Available at: http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/history.html (accessed: 26.02.2021).

6. Fu P., Weng Q. Consistent land surface temperature data generation from irregularly spaced Landsat imagery. *Rem. Sens. of Env.*, 2016, vol. 184, pp. 175–187. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.06.019

7. Irons J.R., Dwyer J.L., Barsi J.A. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Rem. Sens. of Env.*, 2012, vol. 122, pp. 11–21. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026

8. Satellite imagery gallery. *Planet*. Available at: https://www.planet.com/products/explorer/ (accessed: 26.02.2021).

9. Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Detection of changes in urban environment based on infrared satellite data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 537, iss. 6, p. 062051. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062051

10. Congedo L. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation.* Release 6.0.1.1. 2016. DOI: http://dx.doi. org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1

11. Zubkova K.I., Kurevleva T.G., Permitina L.I. Estimation of NDVI calculation error when using empirical methods for atmospheric correction. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2016, vol. 3, issue 2, pp. 20–25.

12. Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi F.D., Hook S.J. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. *Proc. SPIE, vol. 5882, Earth Observing Systems X* (22 August 2005), pp. 58820E. DOI: https://doi.org/10.1117/12.619990

13. Effat H.A., Hassan O.A.K. Change detection of urban heat islands and some related parameters using multi-temporal Landsat images; a case study for Cairo city, Egypt. *Urban Climate*, 2014, vol. 10 (1), pp. 171–188. DOI: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.10.011

Received 15.03.2021; Revised 15.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

Anna A. Gosteva – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Senior Scientific Researcher, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (Russia, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50), AGosteva@icm.krasn.ru

Aleksandra K. Matuzko – Junior Scientific Researcher, Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/44), akmatuzko@icm.krasn.ru

Oleg E. Yakubailik – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Leading Researcher, Head of Laboratory, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (Russia, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50), oleg@icm.krasn.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934
- **по каталогу** «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «УП Урал-Пресс». 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

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
BRIEF REPORTS

УДК 691.391:519.725:537.86 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-324-327**

Моделирование блока восстановления тактовой частоты и данных на основе схемы фазовой автоподстройки частоты

А.В. Злобин, В.И. Клюкин, Ю.К. Николаенков

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

micro138@phys.vsu.ru

Во многих СБИС для передачи информации через нетерминированную линию используются полноамплитудные КМОП-драйверы. Пропускная способность такого межсоединения в большей степени ограничена длиной линии, а не производительностью КМОП-драйверов. Поскольку канал передачи сильно искажает передаваемую информацию, наиболее распространенное решение данной проблемы – применение блоков восстановления тактового сигнала, роль которых заключается также и в извлечении самих данных. В работе рассмотрен процесс построения блока восстановления тактовой частоты и данных на основе однопетлевой схемы фазовой автоподстройки частоты, не требующей опорного периодического сигнала. Поведенческая модель схемы разработана на языке описания аппаратуры Verilog-AMS, моделирование блока на транзисторном уровне проведено по 90-нм КМОП-технологии. При этом время восстановления составило 4,8 мкс при показателе джиттера восстановления тактового сигнала 7,6 пс. Полученные значения выходных параметров разработанного блока восстановления тактовой частоты и данных на основе схемы фазовой автоподстройки частоты находятся на уровне лучших зарубежных аналогов.

Ключевые слова: восстановление тактовой частоты; фазовая автоподстройка частоты; линейное кодирование

Для цитирования: Злобин А.В., Клюкин В.И., Николаенков Ю.К. Моделирование блока восстановления тактовой частоты и данных на основе схемы фазовой автоподстройки частоты // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 324–327. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-324-327

© А.В. Злобин, В.И. Клюкин, Ю.К. Николаенков, 2021

Clock Signal and Data Recovery Unit Modeling Based on Phase-Locked-Frequency Scheme

A.V. Zlobin, V.I. Klyukin, Yu.K. Nickolaenkov

Voronezh State University, Voronezh, Russia

micro138@phys.vsu.ru

Abstract: In many VLSIs, full amplitude CMOS drivers are used for information transfer via unterminated line. What is more, path length decreases carrying capacity of such interconnection in a greater degree than CMOS drivers' performance. Because transmit channel considerably garbles transferred information, prevailing solution to this problem are clock data recovery blocks the role of which is to retrieve data along with recovering clock signal. In this work, the process of constructing a clock signal and data recovery unit based on a single-loop phase-locked-frequency scheme that does not require a reference periodic signal is considered. The development of its behavioral model was carried out in the Verilog-AMS hardware description language, and the block modeling at the transistor level was carried out in the 90 nm CMOS technology. In this case, the recovery time was 4.8 microseconds, and the «jitter» indicator of clock signal recovery unit was 7.6 ps. The obtained values of developed clock signal and data recovery unit's output parameters are up to the best foreign analogues.

Keywords: clock signal recovery; phase-locked frequency; automatic frequency control; linear coding

For citation: Zlobin A.V., Klyukin V.I., Nickolaenkov Yu.K. Clock signal and data recovery unit modeling based on phase-locked-frequency scheme. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 324–327. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-324-327

Производительность цифровых систем на сегодняшний день ограничена пропускной способностью интерфейсов между чипами, платами и устройствами. Несмотря на тенденцию к повышению скорости обработки информации во встраиваемых системах с момента появления интегральных микросхем, системы передачи информации не отличаются быстрым ростом пропускной способности. Во многих СБИС для передачи информации через нетерминированную линию используются полноамплитудные КМОП-драйверы, причем пропускная способность такого межсоединения больше ограничена длиной линии, чем производительностью КМОП-драйверов. Поскольку канал передачи существенно искажает передаваемую информацию, наиболее распространенным решением данной проблемы является применение блоков восстановления тактового сигнала (ВТС), роль которых заключается также и в извлечении самих данных. Результаты анализа различных архитектур блоков ВТС показывают [1, 2], что схема на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) оптимальна по занимаемой площади, энергопотреблению, показателям стабильности и производительности.

Однопетлевая структурная схема рассматриваемого блока ВТС, состоящая из фазового детектора (ФД), генератора подкачки заряда (ГПЗ) на транзисторах T_1 и T_2, фильтра низких частот (ФНЧ), образованного резистором R и конденсаторами C_1, C_2, а также генератора, управляемого напряжением (ГУН), приведена на рис.1.

ФД сопоставляет входной сигнал D с тактовым сигналом восстановленной опорной частоты $f_{оп}$ с генератора ГУН и при правильном фазовом отношении этих сигналов на выходе Q формирует сигнал, представляющий собой данные со входа, тактируемые задним фронтом $f_{оп}$. Для получения гарантированного изменения состояния сигнала на входе ФД в течение большого промежутка времени используются схемы линейного кодирования типа 8b/10b, 64b/66b, 128b/130b и т.п., преобразующие исходные слова в символы большей разрядности с целью достижения баланса «нулей» и «единиц», что обеспечивает стабильную работу блока ВТС [1].

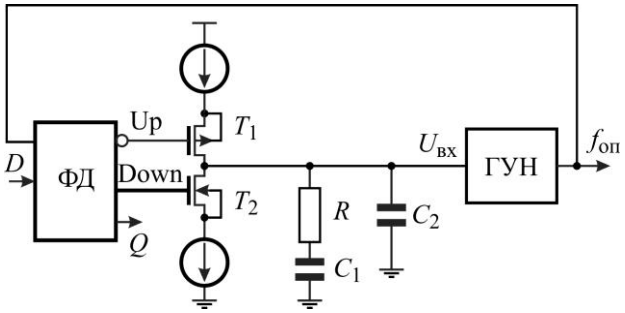


Рис.1. Структура блока ВТС на основе схемы ФАПЧ
Fig.1. Structure of the PTS block based on the PLL scheme

Тактовый сигнал $f_{оп}$ формируется ГУН при номинальном управляющем напряжении $U_{вх}$, т.е. повышение или понижение $U_{вх}$ позволяет менять $f_{оп}$ и, соответственно, фазу подаваемого на вход ФД сигнала. Изменение $U_{вх}$ осуществляет ГПЗ, заряжающий или разряжающий емкости ФНЧ в зависимости от состояния выходов ФД (Up и Down). В реальных условиях работы ГУН выходные сигналы ФД практически не перекрываются, за счет ФНЧ их импульсные воздействия на $f_{оп}$ усредняются. Таким образом, существенный вклад в изменение $f_{оп}$ может внести только значительное расхождение сигналов Up и Down [2].

Для устойчивой работы системы ФАПЧ с низким уровнем ее собственных шумов важную роль играет полоса пропускания ФНЧ, являющаяся компромиссом между быстродействием и джиттером (фазовым шумом) выходного сигнала. Для сигналов в гигагерцевом частотном диапазоне оптимальная ширина полосы пропускания ФНЧ должна быть на три порядка меньше (единицы мегагерц) [3].

Разработанный блок ВТС содержит линейный ФД, ГПЗ, ФНЧ с полосой пропускания 848 кГц, ГУН и работает с входными данными на скорости 1 Гбит/с. Структура ФД приведена на рис.2. Для генерации сигналов Up и Down использованы логические элементы «Исключающее ИЛИ», определяющие, запаздывает ли тактовый сигнал относительно приходящего потока данных или опережает его [4]. В качестве ГУН использована конфигурация на основе дифференциальных КМОП-инверторов с трехканальной регулировкой усиления [5], имеющая повышенную линейность характеристики управления и диапазон рабочих частот до 2,5 ГГц.

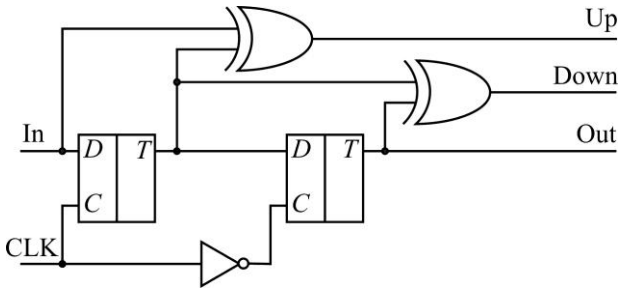


Рис.2. Структура ФД бинарного типа
Fig.2. Structure of the binary type FD

Поведенческая модель блока ВТС построена с помощью языка описания аппаратуры Verilog-AMS, выходные параметры получены путем схемотехнического моделирования по 90-нм КМОП-технологии в условиях воздействия входного псевдослучайного сигнала (PRBS-7) с частотой 1 ГГц. Время синхронизации составило 4,8 мкс при показателе джиттера 7,6 пс. Блок ВТС стабильно работает при частоте ГУН, равной удвоенной частоте входного потока данных, т.е. при $U_{вх}$ = 500 мВ, $f_{оп}$ = 2 ГГц.

Таким образом, использование для поведенческого моделирования на языке Verilog-AMS блока ВТС значительно уменьшает вычислительные затраты. Применение в составе блока ВТС однопетлевой схемы ФАПЧ позволяет исключить дополнительный опорный сигнал и сократить

занимаемую площадь кристалла, однако увеличивает время установления синхронизации. Полученные значения выходных параметров разработанного блока ВТС находятся на уровне лучших зарубежных аналогов.

Литература

1. ***Hsieh M., Sobelman G.E.*** Architectures for multi-gigabit wire-linked clock and data recovery // IEEE Circuits and Systems Magazine. 2008. Vol. 8 (4). P. 45–47. DOI: https://doi.org/10.1109/MCAS.2008.930152

2. ***Сухман С.М., Бернов А.В., Шевкопляс Б.В.*** Синхронизация в телекоммуникационных системах: Анализ инженерных решений. М.: Эко-Трендз, 2002. 268 с.

3. ***Бормонтов Е.Н., Клюкин В.И., Быстрицкий С.А.*** Влияние параметров фильтра низких частот на характеристики ФАПЧ // Твердотельная электроника и микроэлектроника: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 8. Воронеж: ВГТУ, 2009. С. 4–9.

4. ***Alexander J.D.H.*** Clock recovery from random binary signals // Electronic Letters. 1975. Vol. 11. Iss. 22. P. 541–542. DOI: https://doi.org/10.1049/el:19750415

5. ***Быстрицкий С.А., Клюкин В.И., Бормонтов Е.Н.*** Кольцевой генератор, управляемый напряжением, для высокоскоростных систем ФАПЧ // Изв. вузов. Электроника. 2013. № 6 (104). С. 17–23.

Поступило в редакцию 25.03.2021 г.; после доработки 25.03.2021 г.; принято к публикации 14.04.2021 г.

Злобин Александр Викторович – аспирант физического факультета Воронежского государственного университета (Россия, 394006, г. Воронеж, Университетская пл., 1), alexandrojke@gmail.com

Клюкин Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (Россия, 394006, г. Воронеж, Университетская пл., 1), micro138@phys.vsu.ru

Николаенков Юрий Кимович – кандидат технических наук, доцент кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (Россия, 394006, г. Воронеж, Университетская пл., 1), ynickolaenkov@yandex.ru

References

1. Hsieh M., Sobelman G.E. Architectures for multi-gigabit wire-linked clock and data recovery. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2008, vol. 8 (4), pp. 45–47. DOI: https://doi.org/10.1109/MCAS.2008.930152

2. Sukhman S.M., Bernov A.V., Shevkoplyas B.V. *Synchronization in Telecommunication Systems: Analysis of Engineering Solutions.* Moscow, Eco-Trends Publ., 2002. 268 p. (In Russian.)

3. Bormontov E.N., Klyukin V.I., Bystritsky S.A. Low-pass filter parameters influence on PLL characteristics. *Tverdotel'naya elektronika i mikroelektronika, mezhvuz. sb. nauchn. tr. = Solid-state electronics and microelectronics: inter-university collection of scientific papers*. Iss. 8. Voronezh, VSTU, 2009, pp. 4–9. (In Russian).

4. Alexander J.D.H. Clock recovery from random binary signals. *Electronic Letters*, 1975, vol. 11, iss. 22, pp. 541–542. DOI: https://doi.org/10.1049/el:19750415

5. Bystritsky S.A., Klyukin V.I., Bormontov E.N. Voltage controlled ring oscillator for high frequency PLL systems. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of University. Electronics*, 2013, no. 6 (104), pp. 17–23. (In Russian).

Received 25.03.2021; Revised 25.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

Alexandr V. Zlobin – PhD student of the Physics Department, Voronezh State University (Russia, 394006, Voronezh, Universitetskaya sq., 1), alexandrojke@gmail.com

Vladimir I. Klyukin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Semiconductor Physics and Microelectronics Department, Voronezh State University (Russia, 394006, Voronezh, Universitetskaya sq., 1), micro138@phys.vsu.ru

Yury K. Nickolaenkov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Semiconductor Physics and Microelectronics Department, Voronezh State University (Russia, 394006, Voronezh, Universitetskaya sq., 1), ynickolaenkov@yandex.ru

УДК 628.889 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-328-332

Применение методологии энергоэкологического анализа для исследования системы удаления воздуха чистых помещений в микроэлектронике

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

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

gundartcev.m@yandex.ru

Применение в чистых помещениях химических веществ, большая часть которых агрессивна и токсична, требует анализа системы удаления воздуха не только с функционально обусловленных, но и с энергоэкологических позиций. В работе исследована возможность применения методологии энергоэкологического анализа для сравнения экологичности различных систем удаления воздуха чистых помещений в микроэлектронике. Показано, что прямое удаление воздуха при термодинамическом преимуществе перед системой с очисткой менее благоприятно для окружающей среды в связи со значительным уровнем экологического индекса, отражающего потенциальный экономический ущерб атмосфере от выбросов. Установлены загрязнители, доминирующие в составе выбросов и определяющие обоснованность решения по структуре системы удаления воздуха чистого помещения, учитывающей эколого-экономические и медико-биологические аспекты ее эксплуатации.

Ключевые слова: энергоэкологическая эффективность; чистое помещение; система удаления воздуха; выброс; эксергия; экологический индекс

Для цитирования: Гундарцев М.А., Каракеян В.И., Рябышенков А.С., Шараева В.П. Применение методологии энергоэкологического анализа для исследования системы удаления воздуха чистых помещений в микроэлектронике // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 328–332. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-328-332

Energy and Environment Analysis Methodology Application for the Study of the Clean Room Air Removal System in Microelectronics

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

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

gundartcev.m@yandex.ru

Abstract: The most part of chemical substances applied in clean rooms are aggressive and toxic, which requires analysis of air removal system not only from functionally related standpoint but also with regard to energy and environment. This study investigates the possibility of applying the methodology of energy and environmental analysis to compare the environmental friendliness of various air removal systems of clean rooms. It was shown that direct air removal, although having a thermodynamic advantage over a system with purification, was less favorable for the environment due to the significant level of the environmental index, which reflected the considerable potential economic

© М.А. Гундарцев, В.И. Каракеян, А.С. Рябышенков, В.П. Шараева, 2021

damage from emissions to the atmosphere. This investigation has revealed the pollutants dominating in the composition of emissions and determining the validity of the decision on the structure of the air removal system of the clean room, taking into account the environmental, economic and biomedical aspects of its operation.

Keywords: energy and environmental efficiency; clean room; air removal system; emission; exergy; environmental index

For citation: Gundartsev M.A., Karakeyan V.I., Ryabyshenkov A.S., Sharaeva V.P. Energy and environment analysis methodology application for the study of the clean room air removal system in microelectronics. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 328–332. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-328-332

Проблема загрязнения атмосферы как источника технологической среды для предприятий микроэлектроники и одновременно компонента среды обитания человека тесно связана с функционированием системы удаления воздуха (СУВ) чистых помещений (ЧП). Использование в ЧП химических веществ, большая часть которых агрессивна и токсична, требует анализа работы СУВ не только с функционально обусловленных, но и энергоэкологических позиций.

Рассматривая СУВ как термодинамическую систему с точки зрения эксергетического подхода, можно установить ее энергетические показатели [1]. Энергоэкологический анализ СУВ позволяет учесть также и экологическую составляющую в виде экономического ущерба атмосфере, выраженного в энергетических единицах. Согласно методическому подходу, рассматриваемому в [2, 3], в качестве такой экологической составляющей можно использовать экологический индекс (ЭИ), кДж/кг/руб.:

$$\text{ЭИ} = e / U_{\text{атм}}, \tag{1}$$

где e – удельная эксергия выброса; $U_{\text{атм}}$ – причиненный экономический ущерб атмосфере.

Удельная эксергия выброса определяется на основе эксергетического анализа системы, расчет годового экономического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха проводится по укрупненной методике приведения различных примесей к монозагрязнителю [4]:

$$U_{\text{атм}} = U_{\text{ут}} \sigma f \sum A_i M_i, \tag{2}$$

где $U_{\text{ут}}$ – денежная оценка единицы выбросов, представляющая собой удельный экономический ущерб от загрязнения атмосферы 1 т условного загрязняющего вещества, руб./усл.т (стоимость условной тонны выбросов для Московской области составляет 240 руб./усл.т); σ – коэффициент, учитывающий региональные особенности территории, подверженной вредному воздействию; f – поправка, учитывающая характер рассеивания примеси в атмосфере (для газообразных примесей и аэрозолей, характерных для выбросов ЧП, равна 1); A_i – коэффициент приведения i-й примеси к монозагрязнителю, усл. т/т; M_i – масса выброса i-го загрязнителя.

При определении безразмерного коэффициента σ, характеризующего относительную степень опасности загрязнения воздуха над исследуемой территорией, во избежание сложностей детализированного расчета по источникам загрязнений рекомендуется использовать средневзвешенное значение с учетом площадей отдельных видов [4–6]. Функциональные территории города представлены 47 % промышленных зон, 27 % жилого комплекса и 26 % лесопарка. Тогда показатель σ определяется как средневзвешенный из коэффициентов для территорий разных типов [7]: $\sigma = 0,47 \cdot 4 + 0,27 \cdot 6 + 0,26 \cdot 8 = 5,58$.

Коэффициент приведения i-й примеси к агрегированному виду (монозагрязнителю), или безразмерный показатель относительной агрессивности загрязняющего вещества i-го вида, рассчитывается по формуле

$$A_i = \text{ПДК}_{\text{CO}_2} / \text{ПДК}_i, \tag{3}$$

где $ПДК_{CO_2}$ – предельно допустимая среднесуточная концентрация CO_2 в атмосфере, принимаемая за эталон и равная 3 мг/м^3; $ПДК_i$ – предельно допустимая среднесуточная концентрация загрязняющего вещества *i*-го вида в атмосфере.

Предположим, что известно, во сколько раз один загрязнитель опаснее другого (CO_2). Тогда можно придать каждому из них весовые коэффициенты A_i. После умножения M_i на весовые коэффициенты A_i и их сложения получаем условный монозагрязнитель массой $\sum A_i M_i$, характеризующий общий уровень загрязнения атмосферы.

Энергоэкологический анализ проводится для СУВ типового предприятия микроэлектроники для теплого (ТПГ) и холодного периодов года (ХПГ) на основании тома нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ), разработанного при эффективности очистного оборудования $\eta_{о.о} = 0{,}9$, когда в атмосферу поступает 0,1 часть загрязнений, содержащихся в выбросах. При отсутствии очистного оборудования и при прямом удалении воздуха в атмосферу попадет десятикратно увеличенная масса примесей. В результате обработки данных тома нормативов ПДВ получены суммарные значения приведенной массы при наличии очистки $\sum A_i M_{i\ о} = 1086{,}2$ т/год и в случае прямого удаления воздуха (без очистки) $\sum A_i M_{i\ б.о} = 10\ 862$ т/год. Тогда по формуле (2) получим значение годового ущерба атмосфере для СУВ.

С очисткой эффективностью $\eta_{о.о} = 0{,}9$:

$$U_{атм.о} = 240 \cdot 5{,}58 \cdot 1086{,}2 = 1\,454\,639 \text{ руб./год.}$$

Без очистки:

$$U_{атм.б.о} = 240 \cdot 5{,}58 \cdot 10\,862 = 14\,546\,390 \text{ руб./год.}$$

В таблице приведены результаты энергоэкологического анализа СУВ, полученные по формуле (1) с использованием данных работы [2]. С точки зрения зависимости экономического ущерба атмосфере от аппаратурно-технологического решения СУВ и условий внешней среды. Высокая удельная эксергия выбросов при прямом удалении в ТПГ приводит к росту ЭИ в 2,6 раза по сравнению с системой с очисткой. В ХПГ различия в ЭИ не столь заметны, что может быть обусловлено более благоприятными условиями для рассеивания загрязнений в атмосфере.

Анализ тома нормативов ПДВ указывает на наличие в составе выбросов ЧП широкого спектра химических веществ всех классов опасности (рисунок). Однако основной экономический ущерб атмосфере наносят вещества 1-го и 2-го классов опасности (мышьяк, аммиак и др.) по действующему в настоящее время ГОСТ 12.1.007-76.

Отметим также наличие загрязнителей, не отраженных на диаграмме в силу незначительности массы выброса, но с эффектом комбинированного действия в виде синергизма или аддитивности (диоксид азота + диоксид серы, диоксид серы + фториды газообразные и т.д.). Все загрязнители в результате очистки выбросов находятся в пределах своих $ПДК_{сс}$. Однако при оценке эколого-гигиенических аспектов загрязнения атмосферы следует также считаться с возможностью образования из таких загрязнителей под действием условий атмосферы вторичных загрязнителей, имеющих более опасные свойства и трудно поддающиеся мониторингу [8–10].

Результаты энергоэкологического анализа СУВ
Results of energy-ecological analysis of air removal system

Параметр	ТПГ	ХПГ
$e_о$, кДж/кг	10	160
$U_{атм.о}$, руб.	1 454 639	
$ЭИ_о$, кДж/кг/руб.	0,000007	0, 000011
$e_{б.о}$, кДж/кг	39	182
$U_{атм.б.о}$, руб.	14 546 390	
$ЭИ_{б.о}$, кДж/кг/руб.	0,0000027	0,000012
$ЭИ_о$/ $ЭИ_{б.о}$	2,6	0,9

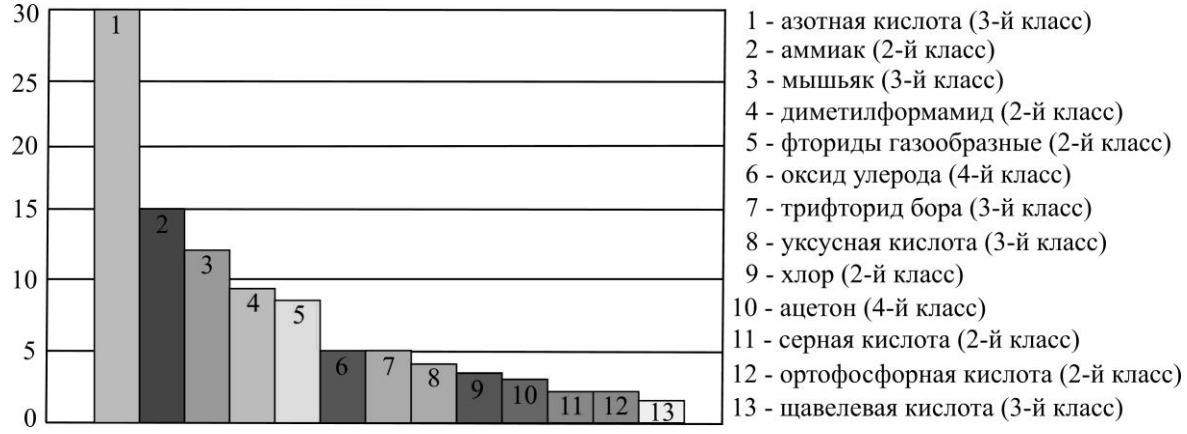


Диаграмма поэлементных ущербов атмосфере от загрязнителей 2, 3, 4-го классов в выбросах СУВ
Diagram of element-by-element damage to the atmosphere from pollutants of the 2nd, 3rd, 4th hazard classes in WMS emissions

Таким образом, ЭИ в виде отношения удельной эксергии выброса к причиненному экономическому ущербу атмосфере является объективным критерием экологичности СУВ. Значение ЭИ определяется аппаратурно-технологическим решением системы и условиями внешней среды. Установление его взаимосвязей с полями рассеивания доминирующих загрязнителей в атмосфере имеет существенное значение для разработки практических мероприятий по оптимизации системы производственно-экологического мониторинга.

Литература

1. ***Гаврилин В.А., Каракеян В.И., Рябышенков А.С.*** Оценка эффективности системы кондиционирования воздуха чистых производственных помещений с учетом термодинамических параметров // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 2. С. 133–140.

2. ***Казаков Р.А., Дарда И.В., Зволинский В.П.*** Основы теоретического анализа энергетической и экологической эффективности металлургических предприятий // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 38–43.

3. ***Каракеян В.И., Гундарцев М.А.*** Эксергетический анализ системы воздухообмена в чистых помещениях // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 6. С. 573–580.

4. ***Каракеян В.И.*** Экономика природопользования: учеб. для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2016. 478 с.

5. ***Тхеин Хтут У., Пьо Тху, Гаврилин В.А.*** Анализ системы фильтрации чистых помещений высокотехнологичных производств // Экологические системы и приборы. 2019. № 4. С. 44–48.

6. ***Тхеин Хтут У., Пьо Тху, Шараева В.П.*** Анализ системы фильтрации чистых помещений высокотехнологичных производств // Экология и безопасность жизнедеятельности: сб. ст. XVIII Междунар. науч.-прак. конф. (20–21 декабря 2018 г.). Пенза: РИО ПГАУ, 2018. С. 300–302.

7. ***Гундарцев М.А., Гундарцев А.А., Константинова А.А.*** Построение полей рассеивания вредных примесей от промышленных предприятий // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. №1. С 14–20. DOI: 10.25791/asu.1.2021.1248

8. ***Pleshko E.S., Riabyshenkov A.S., Gundartcev M.A., Nikulina I.M.*** Modeling the distribution of impurities in the atmosphere from the stationary point source // Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (Moscow – St. Petersburg, Russia, January 27–30, 2020). 2020. P. 2483–2485.

9. ***Захаров А.Н., Пьо Тху.*** Энергоэффективность многоступенчатой системы фильтрации чистых помещений // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Техногенная энергобезопасность и энергоресурсосбережение» (Москва, 05 июля 2018 г.). М.: МИЭЭ, 2018. С. 113–114.

10. ***Пьо Тху, Рябышенков А.С.*** Анализ системы кондиционирования и фильтрации воздуха в чистых помещениях микроэлектроники // Экологические системы и приборы. 2018. № 9. С. 22–29.

Поступило в редакцию 24.11.2020 г.; после доработки 24.11.2020 г.; принято к публикации 14.04.2021 г.

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

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

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

Шараева Валерия Павловна – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sharaevalera@mail.ru

References

1. Gavrilin V.A., Karakeyan V.I., Ryabyshenkov A.S. Evaluation of the efficiency of the air conditioning system for clean industrial premises taking into account thermodynamic parameters. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 133–140. (In Russian).

2. Kazakov R.A., Darda I.V., Zvolinsky V.P. Basis of theoretical analysis of energy and ecological efficiency of metallurgical enterprises. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2012, no. 4, pp. 38–43. (In Russian).

3. Karakeyan V.I., Gundartsev M.A. Exergetic analysis of the air exchange system in clean rooms. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, vol. 24. no. 6, pp. 573–580. (In Russian).

4. Karakeyan V.I. *Environmental Economics: a textbook for academic bachelor's degree*. 2nd ed., rev. and add. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 478 p. (In Russian).

5. Thein Khtut U., Pyo Thu, Gavrilin V.A. Analysis of the filtration system of clean rooms in high-tech industries. *Ekologicheskiye sistemy i pribory = Ecological Systems and Equipment*, 2019, no. 4, pp. 44–48. (In Russian).

6. Thein Khtut U., Pyo Thu, Sharaeva V.P. Analysis of the filtration system of clean rooms in high-tech industries. *Ecology and life safety: collection of articles of the XVIII International Scientific and Practical Conference*. Penza, RIO PSAU Publ., 2018, pp. 300–302. (In Russian).

7. Gundartsev M.A., Gundartsev A.A., Konstantinova A.A. Construction of felds for dispersion of harmful impurities from industrial enterprises. *Promyshlennyye ASU i kontrollery = Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2021, no. 1, pp. 14–20. DOI: https://doi.org/10.25791/asu.1.2021.1248 (In Russian).

8. Pleshko E.S., Riabyshenkov A.S., Gundartcev M.A., Nikulina I.M. Modeling the distribution of impurities in the atmosphere from the stationary point source. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 2020, pp. 2483–2485.

9. Zakharov A.N., Pyo Thu. Energy efficiency of a multistage filtration system for clean rooms. *Abstracts of the international scientific and technical conference «Technogenic energy security and energy saving»*. Moscow, MEEE Publ., 2018, pp. 113–114. (In Russian).

10. Pyo Thu, Ryabyshenkov A.S. Analysis of the air conditioning and filtration system in clean rooms of microelectronics. *Ekologicheskiye sistemy i prib*ory *= Ecological Systems and Devices*, 2018, no. 9, pp. 22–29. (In Russian).

Received 24.11.2020; Revised 24.11.2020; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

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

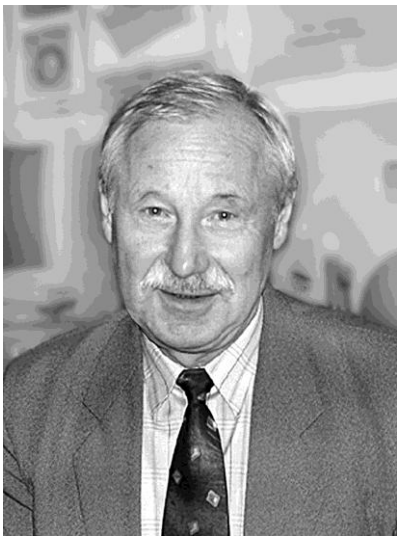
Andrey S. Ryabyshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute for Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ryabyshenkov@mail.ru

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

Valeria P. Sharaeva – PhD student of the Institute for Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sharaevalera@mail.ru

ЮБИЛЕИ

Неволину Владимиру Кирилловичу – 80 лет



22 мая 2021 г. исполнилось 80 лет известному ученому в области зондовой микроскопии и нанотехнологии, доктору физико-математических наук, профессору Неволину Владимиру Кирилловичу.

По окончании в 1964 г. Уральского политехнического института В.К. Неволин работал в Сухумском физико-техническом институте, где занимался физикой низкотемпературной плазмы, термоэмиссионными преобразователями тепловой энергии в электрическую.

С 1972 г. В.К. Неволин работает в Московском институте электронной техники: старшим научным сотрудником, доцентом, профессором кафедры теоретической и экспериментальной физики (1993–1999), профессором кафедры квантовой физики и наноэлектроники (с 1999 г.), с 2017 г. – главным научным сотрудником.

В 1985 г. на кафедре теоретической и экспериментальной физики МИЭТ Владимиром Кирилловичем начаты основополагающие теоретические и экспериментальные работы по зондовой нанотехнологии. В мае 1987 г. построен сканирующий туннельный микроскоп, предназначенный для технологических исследований, и выдано первое в СССР авторское свидетельство на это изобретение. В 1988 г. получены первые в стране результаты по бесконтактной модификации металлических подложек, а в 1989 г. впервые в мире – результаты по формированию квазиодномерных структур в диэлектрических средах, проявляющих квантование проводимости при комнатных температурах. В 1992 г. созданы дискретные элементы с перестраиваемыми нелинейными проводящими свойствами, в 1993 г. построены технологические туннельные микроскопы ТТМ-2, совмещенные с оптическими устройствами. Эти результаты стали основой докторской диссертации В.К. Неволина.

С 1999 г. В.К. Неволин возглавляет учебно-научный центр «Зондовая микроскопия и нанотехнология» (в настоящее время – научно-образовательный центр «Зондовая микроскопия и нанотехнология») для подготовки студентов и аспирантов МИЭТ.

Новое научное направление «Зондовые нанотехнологии в электронике», основанное В.К. Неволиным, отражено в учебных пособиях и монографиях «Зондовые нанотехнологии в электронике» (2016); «Квантовый транспорт в устройствах электроники» (2012); «Квантовая физика и нанотехнологии» (2013), вышедших в издательстве «Техносфера» (Москва). Последняя издана на русском и английском языках.

В настоящее время В.К. Неволин сохраняет высокую творческую активность и продуктивно работает в области фундаментальных основ квантовых технологий.

В.К. Неволин подготовил 10 кандидатов наук и 1 доктора наук. Он автор и соавтор более 100 научных работ и 15 патентов, эксперт РФФИ, РНФ и инновационного центра «Сколково», член редколлегии журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».

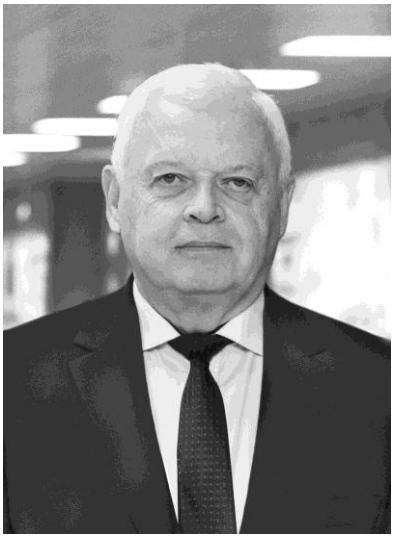
Владимир Кириллович пользуется высоким авторитетом и уважением среди коллег, аспирантов и студентов Национального исследовательского университета «МИЭТ».

В.К. Неволин – лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники и премии Правительства РФ в области образования.

Поздравляем Владимира Кирилловича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов!

Редколлегия

Чаплыгину Юрию Александровичу – 70 лет



12 июля 2021 г. исполняется 70 лет главному редактору журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника», президенту Национального исследовательского университета «МИЭТ», академику РАН, доктору технических наук, профессору Чаплыгину Юрию Александровичу.

Юрий Александрович Чаплыгин родился 12 июля 1951 г. в г. Курске. В 1974 г. окончил с отличием физико-технический факультет Московского института электронной техники. Вся трудовая деятельность Юрия Александровича неразрывно связана с МИЭТ, в развитие которого он внес огромный вклад. В стенах МИЭТ Юрий Александрович прошел путь от аспиранта, ассистента до доктора наук, профессора, действительного члена Российской академии наук. В течение 10 лет Ю.А. Чаплыгин был проректором МИЭТ по научной работе, с 1998 по 2016 г. – ректор МИЭТ. С 2016 г. является президентом МИЭТ.

В начале 2000-х гг. под руководством Ю.А. Чаплыгина в МИЭТ началась подготовка специалистов по новым актуальным направлениям. В это время создаются учебные центры в партнерстве с ведущими международными компаниями, такими как Cadence, Synopsys, Mentor Graphics и др., в которых реализуются уникальные магистерские программы по подготовке разработчиков интегральных микросхем и радиоэлектронной аппаратуры.

В 2006 г. в числе первых 17 вузов страны МИЭТ победил в конкурсе вузов, реализующих программы инновационного развития в рамках национального проекта РФ «Образование». В 2010 г. МИЭТ победил в конкурсном отборе программ развития университетов и получил категорию «национальный исследовательский университет» в числе 29 национальных исследовательских университетов Российской Федерации. В эти годы на базе МИЭТ был сформирован уникальный учебно-научно-инновационный кластер электроники, отличительной особенностью которого является наличие полного цикла разработки и создания изделий электронной техники и подготовки кадров.

Ю.А. Чаплыгин – известный ученый в области микро- и наноэлектроники, микро- и наносистемной техники, нанотехнологий. Под руководством Юрия Александровича проведены работы по исследованию физических и конструктивно-технологических факторов, определяющих основные характеристики микросистем и систем на кристалле, решены фундаментальные и прикладные проблемы создания интегрированных устройств приема и обработки информации на основе технологий микро- и наноэлектроники. При непосредственном участии Ю.А. Чаплыгина разработаны науч-

ные и технологические основы создания элементной базы микросистемной техники, создан ряд преобразователей физических величин: линейного ускорения, угловой скорости, давления, индукции магнитного поля и др., впервые в РФ разработаны технологии производства инерциальных измерительных приборов и систем.

Ю.А. Чаплыгин – член Высшей аттестационной комиссии России, заместитель председателя Совета по грантам Президента РФ для поддержки молодых ученых и ведущих научных школ, советник научно-технического совета Военно-промышленной комиссии при Правительстве РФ, член Научного совета ОНИТ РАН, председатель докторского диссертационного совета МИЭТ, член редколлегий шести научно-технических журналов, член оргкомитетов ряда российских и международных научно-технических конференций. В 2015 г. по инициативе Ю.А. Чаплыгина была создана Ассоциация российских вузов, осуществляющих подготовку кадров для предприятий радиоэлектронной промышленности, которую он возглавляет по настоящее время.

С 1999 г. Ю.А. Чаплыгин заведует кафедрой интегральной электроники и микросистем, является руководителем научной школы, подготовил 4 докторов наук и 10 кандидатов наук. Юрий Александрович – автор и соавтор более 300 научных трудов, в том числе 5 монографий и 33 авторских свидетельств и патентов.

За разработку и внедрение в промышленность ряда изделий микроэлектроники и микросистемной техники в составе авторских коллективов Ю.А. Чаплыгин трижды удостоен премий Правительства Российской Федерации.

Юрий Александрович – лауреат премий Президента РФ и Правительства РФ в области образования. Награжден орденами Дружбы, Почета и медалями.

Поздравляем Юрия Александровича с юбилеем, желаем здоровья и дальнейшей плодотворной работы на благо российской науки и образования!

Редколлегия

КОНФЕРЕНЦИИ

Об итогах 28-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2021»

С 29 по 30 апреля 2021 г. в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» в очно-заочном формате состоялась 28-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2021».

В программу конференции включен 301 доклад молодых исследователей из МИЭТ, МГУ, МФТИ, ВШЭ, МАИ, АО «НИИМЭ», АО «Байкал-Электроникс», АО «ЗНТЦ», ООО «Альфачип» (Москва), ИПЛИТ РАН (Шатура), СПбГУ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Санкт-Петербург), НИТУ им. А.Н. Туполева (Казань), ЮФУ (Ростов-на-Дону), ВГУ (Воронеж), НИ ТПУ (Томск), Университета Хюэ (Вьетнам).

К началу работы конференции изданы программа и сборник тезисов докладов.

На конференции работали 12 секций: *нанотехнологии в электронике; материалы микро- и наноэлектроники; проектирование и технология электронных компонентов; микромеханика, сенсоры, робототехнические комплексы; математическое моделирование процессов и технологий; автоматизированные информационные системы и информационные технологии; информационно-управляющие и вычислительные системы и устройства; радиотехника, системы и устройства связи и телекоммуникаций; информационная безопасность; биомедицинская электроника; экологические проблемы электронной промышленности и окружающей среды; менеджмент, маркетинг и инновации наукоемких предприятий.*

С докладами выступили 167 человек, в том числе 131 студент и 32 аспиранта. Среди получивших положительный отклик у конкурсных комиссий и слушателей можно отметить следующие работы.

Работа *Корлякова Д.А.* (МИЭТ) «Формирование тонких пленок карбида кремния SiC методом диффузии через жидкую среду» посвящена проблеме формирования подложки для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов. Результаты работы доказывают применимость методов карбонизации для получения слоев карбида кремния, в том числе для создания СВЧ-устройств в оптических системах.

В докладе *Какулия Ю.С., Париновой Е.В. и Каюды* Д.А. (ВГУ) «Исследование структуры и состава массивов медных наночастиц, выращенных в порах SiO_2 на Si» для анализа атомного и электронного строения выбран синхронный метод спектроскопии ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения. Полученные результаты подтвердили эффективность рассмотренного подхода к формированию массивов медных наноструктур с заданным составом и морфологией.

В докладе *Сырцева П.К.* (МИЭТ) «Оптимизация технологического маршрута изготовления магниторезистивных датчиков для повышения процента выхода годных» предложен метод, не приводящий к ухудшению значений начального смещения напряжения, синхронизма и амплитуды сигналов магниторезистивных датчиков, но повышающий выход годных на 12,5 % и уменьшающий себестоимость изделия почти на 80 %, а также трудоемкость его изготовления.

Результаты работы студентки *Гончаровой А.В.* (МИЭТ) «Анализ связующих свойств клеевых композиций при измерении напряжений в эластомерах с помощью тензодатчиков на основе полиамидной пленки» могут использоваться при разработке медицинских приборов.

В работе *Лустгартена М.Ю.* (МИЭТ) «Аппаратно-программное решение для создания интеллектуальных энергонакопительных систем» предложено аппаратно-программное решение на основе нейронных сетей. Рассматриваемый подход позволит создавать модули питания под различные задачи с использованием одинаковых элементарных блоков, что значительно уменьшит время и стоимость разработки.

В докладе *Свиридова И.А.* (МИЭТ) «Разработка системы распознавания модуляции сигналов на основе нейронной сети с использованием программируемых логических интегральных схем» предложена система распознавания типа модуляции сигнала, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими аналогами, например высокую скорость обработки сигнала и др.

Рудченко Е.С. и Басков Н.О. (МИЭТ) в своей работе «Программное обеспечение для идентификации радиопередающих устройств путем анализа содержимого радиоизлучений с использованием программно-определяемых радиосистем» исследовали возможность использования программно-определяемых радиосистем (SDR) для идентификации радиопередающих устройств. На языке программирования C# разработано и протестировано программное обеспечение управления SDR-приемником HacKRF One, выполняющее идентификацию устройств, использующих стандарт DECT по их радиотрафику, и ведение списка легальных устройств.

Большой интерес и активное обсуждение вызвали доклады *Приходько А.Т.* (МИЭТ) «Разработка методики количественной оценки распределения электронной плотности в мицеллах, полученной по данным малоуглового рентгеновского рассеяния» и *Селютиной Е.В.* (МИЭТ) «Влияние параметров усилителя мощности класса Е на выходную мощность системы чрескожной передачи энергии с подстройкой конденсаторов».

Федянина М.Е. (МИЭТ) в докладе «Определение термооптических свойств аморфного состояния тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ методом эллипсометрии» сообщила о результатах, свидетельствующих о необходимости выбора оптимальной толщины пленки (55 нм) для возврата оптических характеристик после нагрева ниже 100 °C.

Гуров К.О. (МИЭТ) представил результаты исследования влияния индуктивности встроенного *LC*-контура в усилитель мощности класса Е на выходные характеристики схемы.

Литинская Е.Л. (МИЭТ) представила работу «Алгоритмы управления и принятия решений для системы персонализированной инсулинотерапии». В основе предлагаемого алгоритма лежит адаптивное пропорциональное регулирование скорости введения базального инсулина относительно оптимизированного набора значений концентрации глюкозы в крови при сахарном диабете первого типа.

Студенты *Казьмин Н.С., Семакина А.Д.* (МИЭТ) и *Воронина А.В.* (СПбГУ) представили совместную работу «Анализ рынка технологий и инноваций. Перспективы коммерческого использования сети 5G в целях определения объектов в помещении».

По результатам выступлений проведен конкурс работ среди студентов и аспирантов. Лучшие доклады отмечены дипломами лауреатов и рекомендованы Оргкомитетом к публикации в журнале «Известия высших учебных заведений. Электроника» и сборнике статей конференции, которые размещаются в системе РИНЦ.

Проведение следующей конференции «Микроэлектроника и информатика – 2022» планируется на апрель 2022 г.

О.Г. Харач,
к.э.н, доц. Института СПИНТех
и кафедры экономики, менеджмента и финансов

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 в себя 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 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, 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.

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. **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 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

ПОДПИСКА 2022

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** «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «УП Урал-Пресс». Подписной индекс 38934
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934
- **через редакцию** - с любого номера и до конца года

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru