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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 25
№ 1
январь - февраль

Vol. 25
No. 1
January - February

2020



Дорогие читатели!

Начало нового года ознаменовалось знаковым событием – 17 января 2020 года новым Правительством Российской Федерации утверждена Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года, определяющая основные направления государственной политики в данной сфере.

В рамках Стратегии на 2020–2021 годы планируется увеличение доли российской электроники на внутреннем рынке в основном за счет традиционных рынков и национальных проектов, а также подготовка активного продвижения на международные рынки, на 2022–2025 годы – продвижение российской электроники на существующие и выход на новые международные рынки, включая комплексные предложения и сотрудничество с иностранными партнерами и масштабирование инвестиционных проектов. В 2026–2030 годах предполагается обеспечение лидирующих позиций отрасли на перспективных рынках.

Отмечается, что к новым рынкам относятся беспилотная авиация, нейроинтерфейсы, «интеллектуальная» энергетика, автоматизированный транспорт, телемедицина, средства защиты информационных систем, системы управления морским транспортом и др. К формирующимся рынкам будущего – нейротехнологии и искусственный интеллект, устройства на квантовых технологиях, промышленный интернет, робототехника и сенсорика, устройства виртуальной и дополненной реальности.

На фоне поставленных перед нашей отраслью задач чрезвычайно актуальными становятся исследования, проводимые отечественными учеными в области электроники и освещаемые и в нашем журнале.

Поздравляю вас с наступившим новым 2020 годом! Желаю крепкого здоровья, больших творческих успехов и дальнейшего плодотворного сотрудничества!

Главный редактор
академик РАН Ю.А. Чаплыгин

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 25, № 1, 2020
январь – февраль

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., ООО «Центр плазменных и вакуумных технологий» (Москва, Россия)
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), 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", 2020
© МИЭТ, 2020

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
Таиров Юрий Михайлович – д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия)
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), 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 11.02.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 11,16 усл.печ.л., 11,032 уч.-изд.л. Тираж 180 экз. Заказ № 7. 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 Российский индекс научного цитирования и в Рейтинг Science Index.

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

Является членом Cross Ref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге Агентства «Роспечать» – 47570

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

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

Браже Р.А., Долгов Д.А. Метод определения упругих характеристик графена и других 2D наноаллотропов 7

Технологические процессы и маршруты

Белостоцкая С.О., Кузнецов Е.В., Рыбачек Е.Н., Губанова О.В. Латеральная рекристаллизация наноструктур аморфного кремния с использованием силицида никеля 19

Новак А.В., Новак В.Р. Исследование процесса электрохимического стоп-травления кремния при изготовлении кантилеверов 31

Элементы интегральной электроники

Исмаил-Заде М.Р. SPICE-модели JFET и MOSFET в широком диапазоне температур 40

Схемотехника и проектирование

Гаврилов С.В., Железников Д.А., Чочаев Р.Ж. Разработка и сравнительный анализ методов решения задачи размещения для реконфигурируемых систем на кристалле 48

Биомедицинская электроника

Телышев Д.В. Прогнозирование и оценка надежности аппаратов механического замещения функции сердца 58

Краткие сообщения

Зайнабидинов С., Назиров Д.Э. Влияние термического воздействия на электрофизические свойства кремния, легированного редкоземельными элементами 69

Ефимов А.Г., Каменев А.Г., Корнеев С.А., Чистюхин В.В. Принципы проектирования бортовых многолучевых приемных АФАР систем спутниковой связи 73

Комаров В.Т. СВЧ-усилитель мощности до 100 Вт на GaN-транзисторах в режиме большого сигнала 78

Мьо Мин Тхант, Романюк В.А., Гуминов Н.В. Влияние емкостей HEMT-транзистора на основные параметры усилителей СВЧ 83

Памяти Таирова Юрия Михайловича 89

Юбилеи

Саурову Александру Николаевичу – 60 лет 91

Конференции

Об итогах Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях – 2019» 92

27-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2020» 94

3rd International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT`2020), 17–19 June 2020, Tenerife (Canary Islands), Spain ..... 4-я стр. обложки

К сведению авторов 95

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 25, No. 1, 2020
January – February

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., SMS «Optolink» (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., LLC «Center for Plasma and Vacuum Technologies» (Moscow, Russia)
Vladimir A. Labunov **–** Acad. NAS of Belarus, Foreign member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), 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., CJS Company «Sinopsis, 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", 2020
© MIET, 2020

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
Yury M. Tairov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI) (St. Petersburg, Russia)
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia) , 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 11.02.2020. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 11,16. Number of copies 180. Order no. 7. 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 index of scientific citing and into the Rating Science Index.

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

Is the member of Cross Ref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue of Agency Rospechat – 47570

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

CONTENTS

Electronics materials

Brazhe R.A., Dolgov D.A. Method of Finding Elastic Characteristics of Graphene and Other 2D Nanoallotropes 7

Technological processors and routes

Belostotskaya S.O., Kuznetsov E.V., Rybachek E.N., Gubanova O.V. Lateral Crystallization of Amorphous Silicon Nanowires Using NickelSilicide 19

Novak A.V., Novak V.R. Investigation of Electrochemical Stop-Etching Process of Silicon at Cantilevers Fabrication 31

Integrated electronics elements

Ismail-Zade M.R. JFET and MOSFET Spice Models in Wide Temperature Range 40

Engineering and design

Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Chochaev R.Z. Development and Comparative Analysis of Placement Methods for Reconfigurable Systems-on-a-Chip 48

Biomedical electronics

Telyshev D.V. Mechanical Circulatory Support Systems Reliability Prediction and Assessment 58

Brief reports

Zaynabidinov S., Nazirov D.E. The Effect of Thermal Treatments on the Electrophysical Properties of Silicon Doped by Rare-Earth Elements 69

Efimov A.G., Kamenev A.G., Korneev S.A., Chistyukhin V.V. Multi-Beam Receiving APAA Space Communication Systems 73

Komarov V.T. Amplifier of Power up to 100 Wt Based on GAN Transistors in Large Signal Mode 78

Myo Min Thant, Romanyuk V.A., Guminov N.V. Effect of HEMPT Capacitances on Microwave Amplifier Main Parameters 83

In memory of Tairov Yury Mikhailovich 89

Anniversaries

Saurov Aleksandr Nikolaevich is 60 years old 91

Conferences

Results of the International Scientific and Practical Conference «Actual Problems of Informatization in the Digital Economy and Research – 2019» 92

27th All-Russian Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students and Graduate Students «Microelectronics and Informatics – 2020» 94

3rd International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT`2020), 17–19 June 2020, Tenerife (Canary Islands), Spain ..... 4 cover page

Instructions for authors 95

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

УДК 538.913:621.38-022.532 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-7-18**

Метод определения упругих характеристик графена и других 2D-наноаллотропов

Р.А. Браже, Д.А. Долгов

Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Россия

brazhe@ulstu.ru

Для расчета и конструирования устройств наноэлектроники и нанофотоники, в которых используются графены и графеноподобные 2D-наноаллотропы углерода, кремния и бинарных соединений типа $A^{III}B^{V}$, большое значение имеет знание упругих характеристик и зависящих от них пьезоэлектрических, фотоупругих и других свойств 2D-материалов. В работе предложен простой и удобный для инженерных расчетов метод определения изотермических значений силовых констант, упругих жесткостей, модуля Юнга и коэффициента Пуассона для 2D-наноаллотропов элементов IV группы таблицы Менделеева и бинарных соединений типа $A^{III}B^{V}$. Метод основан на модифицированном С.Ю. Давыдовым способе связывающих орбиталей Харрисона и модели Р. Китинга описания упругих свойств таких материалов. Показано, что метод позволяет проводить оценочные расчеты упругих свойств для известных синтезированных 2D кристаллических структур, а также для структур, «сконструированных» теоретически. Установлено, что наряду с графеном перспективными для наноэлектроники материалами могут стать монослойный гексагональный нитрид бора и другие бинарные соединения типа $A^{III}B^{V}$ в виде 2D-наноаллотропов различной симметрии, которые, кроме того, являются пьезоэлектриками. Это расширяет спектр возможных практических применений исследованных 2D-материалов (C, Si, BN, AlN, GaN, AlP, GaP) как с графеноподобной, так и с более сложной структурой. Результаты работы могут быть использованы при разработке акустоэлектронных линий задержки терагерцевого диапазона частот, пьезоэлектрических преобразователей для возбуждения и приема упругих волн в наномасштабных 2D-звукопроводах, а также пьезоэлектрических датчиков.

Ключевые слова: силовые константы; упругие жесткости; модуль Юнга; коэффициент Пуассона; 2D-наноаллотропы; графен; силицен; монослойный нитрид бора; соединения $A^{III}B^{V}$; методы расчета; наноакустоэлектроника

© Р.А. Браже, Д.А. Долгов, 2020

Для цитирования: Браже Р.А., Долгов Д.А. Метод определения упругих характеристик графена и других 2D-наноаллотропов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 7–18. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-7-18

Method of Finding Elastic Characteristics of Graphene and Other 2D Nanoallotropes

R.A. Brazhe, D.A. Dolgov

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

brazhe@ulstu.ru

Abstract: For calculation and constructing the devices of nanoelectronics and nanophotonics, in which graphenes and graphenes-like 2D nanoallotropes of carbon, silicon and binary compounds of $A^{III}B^{V}$ type are used, the knowledge of elastic characteristics and depending on them piezoelectric, photo-elastic and other properties of 2D materials is significant. The method for determining isothermal values of the force constants, elastic rigidities, Young's modulus and Poisson's ratio for 2D nanoallotropes of the elements of IV group of the periodic table and binary compounds of $A^{III}B^{V}$ type, simple and convenient for engineering calculations, has been offered. The method is based on the modified by S.Yu. Davydov method, connecting the Harrison orbitals and R.Keating models the descriptions of elastic properties of such materials. It has been shown that the method allows to provide the estimated calculations for the elastic properties both, the well-known synthesized 2D crystal structures, as well as for the theoretically constructed structures. It has been shown that along with graphene, the monolayer hexagonal boron nitride and other binary compounds of $A^{III}B^{V}$ type in a form of 2D nanoallotropes of different symmetry, which, besides, are piezoelectric, can become very promising. It expands the range of possible practical applications of the studied materials (C, Si, BN, GaN, AlN, GaP) both with the graphene-like and more complex structure. The results of the work can be used when developing acoustoelectronic delay lines of terahertz frequency range, piezoelectric transduces for elastic waves excitation and receiving in the nanoscale 2D acoustic lines and piezoelectric sensors.

Keywords: force constants; elastic rigidities' Young'modulus; Poisson's ratio; 2D nanoallotropes; silicone; monolayer boron nitride; compounds of $A^{III}B^{V}$ type; calculations methods; nanoacoustoelectronics

For citation: Brazhe R.A., Dolgov D.A. Method of finding elastic characteristics of graphene and other 2D nanoallotropes. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 7–18. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-7-18

Введение. Графены и графеноподобные 2D-наноаллотропы углерода, кремния и бинарных соединений типа $A^{III}B^{V}$ получают все большее распространение в наноэлектронике и нанофотонике [1, 2], а также в наноэлектромеханических устройствах [3] и нанодатчиках [4, 5]. Для расчета и конструирования таких устройств большое значение имеет знание их упругих характеристик и зависящих от них пьезоэлектрических, фотоупругих и других свойств 2D-материалов [6, 7]. Однако результаты, полученные разными методами определения упругих характеристик этих материалов,

особенно не синтезированных, а «сконструированных» теоретиками, недостаточно достоверны.

Применяемые методы можно условно разделить на три группы: методы первопринципные, или *ab initio*; полуэмпирические методы; методы, основанные на эмпирических потенциалах взаимодействия. К методам *ab initio* относятся метод Хартри – Фока и различные его обобщения [8, 9], а также теория функционала плотности (Density Functional Theory, DFT) [10]. Недостаток метода Хартри – Фока заключается в том, что он не учитывает корреляционной энергии для электронов. И даже его обобщенный вариант – метод Хартри – Фока – Боголюбова [11], в котором учитываются волновые функции пар частиц, – не решает этой проблемы полностью. Метод DFT обычно применяется в рамках формализма Кона – Шэма [12], позволяющего свести задачу описания взаимодействующих электронов, находящихся во внешнем поле атомных ядер, к движению свободных электронов в некотором эффективном потенциале. Недостатками методов *ab initio* являются большие затраты машинного времени и невозможность оценки погрешности расчета без экспериментальных данных.

К полуэмпирическим методам относится приближение сильной связи, или линейная комбинация атомных орбиталей. Суть метода применительно к расчету наноструктур [13] состоит в том, что решается уравнение Шрёдингера с гамильтонианом, построенным в базисе *s*-*p*-орбиталей внешних электронных подоболочек. При этом энергия электронных взаимодействий между атомами (энергия отталкивания) представляется в виде суммы парных потенциалов, которые определяются либо путем подгонки к экспериментальным данным, либо к результатам, полученным на основе DFT-расчетов. Полуэмпирические методы позволяют сократить время расчетов, но характеризуются невысокой точностью.

В методе эмпирических потенциалов [14] полная энергия системы, состоящей из большего числа атомов, представляется в виде суммы орбитального, парного и многочастичного потенциалов. В качестве парного потенциала обычно выбирают потенциал Леннарда-Джонса [15] или потенциал Морзе [16], вид которых определяется из соображений требуемого характера физических закономерностей с учетом простоты математических расчетов. Метод так же не претендует на точность количественных результатов.

Для описания независимых компонент тензора упругих жесткостей 2D-наноструктур необходимо знать силовые константы центрального и нецентрального взаимодействий атомов. Отметим, что любой из рассмотренных численных методов позволяет их найти, но для оценки прогнозируемых упругих свойств новых «сконструированных» структур точность полученных результатов будет невелика, так как нет экспериментальных данных, на которые можно опереться при задании потенциалов взаимодействия. Пошагово установить, где и в каком месте расчетов появляются и накапливаются ошибки, нельзя, так как все эти методы реализуются в программных пакетах (ABINIT, VASP, Accelrys Material Studio и др.) и для пользователя представляют собой «черный ящик». Кроме того, для инженерных расчетов устройств, основанных на упругих, пьезоэлектрических, фотоупругих свойствах наноаллотропов, важно знать, для каких условий (изотермических или адиабатических) эти свойства измерены или рассчитаны. В перечисленных методах этот вопрос вообще не рассматривается.

Цель настоящей работы – разработка простой и понятной методики численного расчета упругих характеристик графеноподобных 2D-наноаллотропов с точностью, приемлемой для решения практических задач в области конструирования элементов и устройств наномасштабных размеров. При этом важно четко оговорить, для каких условий (изотермических или адиабатических) данная методика будет приемлемой.

Исследуемые структуры. Теоретически предсказанные [17, 18] структуры исследуемых 2D-наноаллотропов элементов IV группы таблицы Менделеева (C, Si) и бинарных соединений типа $A^{III}B^{V}$ (BN, AlN, GaN, AlP, GaP и др.) показаны на рис.1 и 2. Часть из них синтезирована (графен, силицен [19], 2D гексагональный нитрид бора [20]), а большую часть имеет смысл попытаться синтезировать, если их прогнозируемые физические свойства будут существенно превосходить аналогичные свойства уже полученных материалов. Устойчивость таких структур для случая гексагональных решеток вида $(A)_6$, $(AB)_6$ обоснована в работе [21]. Некоторую уверенность в том, что и более сложные структуры, изображенные на рис.1 и 2, будут устойчивы, дает работа [22]. В ней показано, что по крайней мере кремниевые и бор-азотные структуры такого типа должны быть стабильными, хотя их энергетическая устойчивость несколько хуже, чем у соответствующих углеродных структур. В работах [18, 22] наряду с 2D sp^2-наноаллотропами, содержащими три ковалентные связи между атомами, исследовались также 2D sp^3-наноаллотропы с четырьмя межатомными связями. Однако, как показано в [23], их упругие характеристики более чем на порядок хуже упругих характеристик 2D sp^2-наноаллотропов, составленных из тех же атомов. Поэтому в настоящей работе такие структуры не рассматриваются.

Кроме того, исследуемые структуры предполагаются бесконечно протяженными, т.е. их линейные размеры по порядку величины превышают длину волны де Бройля для электрона, которая при комнатной температуре составляет около 60 нм. В противном случае начинают проявляться квантово-размерные эффекты, оказывающие существенное влияние на механические свойства наномасштабных структур. Для многих практических применений подобное ограничение не является критическим.

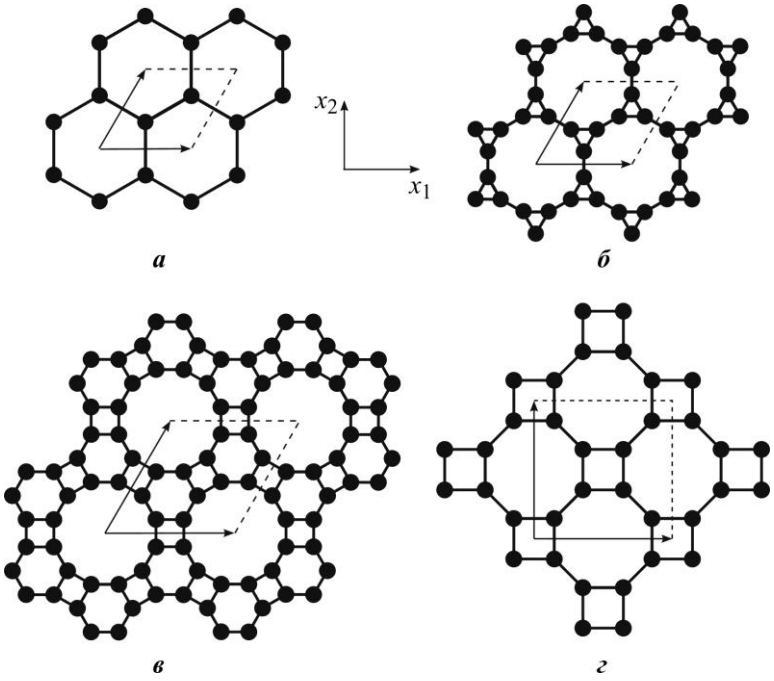


Рис.1. Атомные модели исследуемых 2D-наноаллотропов элементов IV группы таблицы Менделеева: *а* – $(A)_6$; *б* – $(A)_{63(12)}$; *в* – $(A)_{664}$; *г* – $(A)_{44}$. Выделены элементарные ячейки и приведены оси кристаллофизической системы координат

Fig.1. Atomic models of the investigated 2D nanoallotropes of the elements of IV group of the periodic table: *a* – $(A)_6$; *b* – $(A)_{63(12)}$; *c* – $(A)_{664}$; *d* – $(A)_{44}$. The unit cell is allocated and the coordinates axes are shown

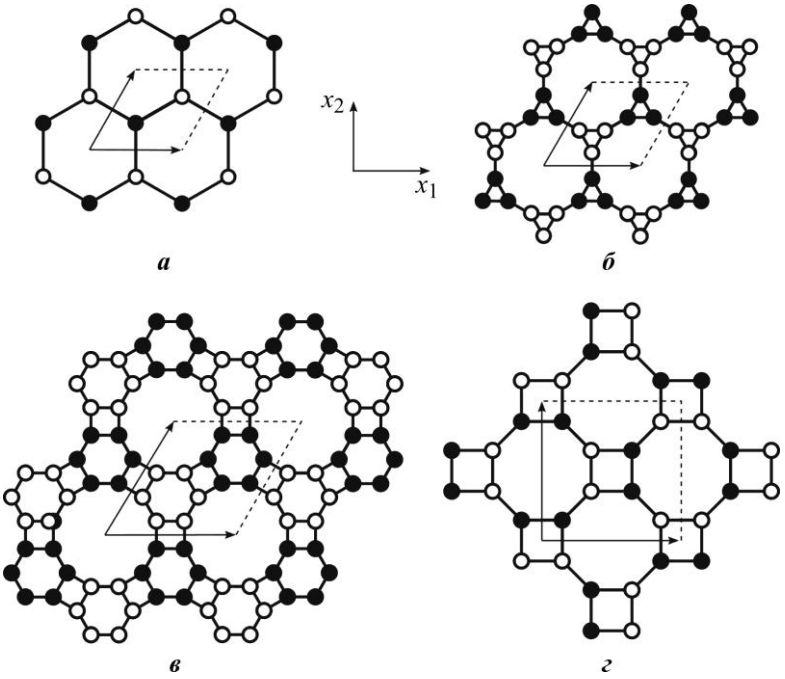


Рис.2. Атомные модели исследуемых бинарных соединений типа $A^{III}B^{V}$: *а* – $(AB)_6$; *б* – $(AB)_{63(12)}$; *в* – $(AB)_{664}$; *г* – $(AB)_{44}$. Атомы типа A и атомы типа B показаны разным цветом

Fig.2. Atomic models of the investigated binary compounds of $A^{III}B^{V}$ type: *a* – $(AB)_6$; *b* – $(AB)_{63(12)}$; *c* – $(AB)_{664}$; *d* – $(AB)_{44}$. The atoms of A and B types are indicated by the points of different color

Электронная конфигурация атомов в структурах, изображенных на рис.1, имеет тип A: ns^2np^2, а в структурах, изображенных на рис.2, имеет вид A: ns^2np^1 и B: ns^2np^3, где n – главное квантовое число валентной подоболочки. Соответственно, в 2D-наноаллотропах элементов IV группы таблицы Менделеева в плоскости (x_1, x_2) возникает sp^2-гибридизация атомных орбиталей и образуются три ковалентные σ-связи, а четвертый валентный электрон находится при каждом атоме в p_z-орбитали, перпендикулярной к плоскости структуры (в результате образуются оборванные π-связи). В 2D-наноаллотропах соединений $A^{III}B^{V}$ также образуются три связи в плоскости (x_1, x_2) , а «лишние» два *p*-электрона каждого атома типа B делают эти связи частично ионными. В результате происходит разделение свободных и занятых энергетических состояний валентных электронов, что приводит к появлению широкой запрещенной зоны. Если 2D-наноаллотропы (см. рис.1) являются полуметаллами или узкозонными полупроводниками, то их бинарные аналоги (см. рис.2) должны быть диэлектриками или широкозонными полупроводниками. Первые принадлежат к центросимметричным классам точечной симметрии 6/*mmm* ($(A)_6$, $(A)_{63(12)}$, $(A)_{664}$) или 4/*mmm* ($(A)_{44}$), у вторых класс симметрии понижается до 3/*mmm* или *m* соответственно. Таким образом, эти 2D-наноаллотропы являются нецентросимметричными и должны иметь пьезоэлектрические свойства, что расширяет область их практического применения.

Расчет силовых констант. Вычисления констант центрального k_0 и нецентрального k_1 взаимодействий атомов проведены на основе метода связывающих орбиталей Харрисона [24], модифицированного Давыдовым [25] на случай 2D-структур графеноподобного типа. Для этих констант в работе [25] получены следующие выражения:

$$k_0 = \frac{2}{a^2} V_2 \left(1 - \frac{10}{3} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right), \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{\lambda}{3} k_0, \quad (2)$$

где V_1 – энергия металлизации, выражаемая через энергии *s*- и *p*-состояний; V_2 – ковалентная энергия, определяемая соотношением

$$V_2 = \eta_2 \frac{\hbar^2}{m_0 a^2}; \quad (3)$$

a – расстояние между ближайшими соседними атомами; λ = 0,66 – коэффициент, выражаемый через матричные элементы оператора ковалентной энергии между соответствующими атомными волновыми функциями *s*- и *p*-состояний; $\eta_2 = -3,26$ для sp^2-орбиталей; $\hbar$ – приведенная постоянная Планка; m_0 – масса свободного электрона.

Энергию металлизации V_1 можно найти через энергии *s*- и *p*-состояний [25] либо, как предложено в работе [23], из выражения для энергии связи на один атом [22]:

$$E_b = -\frac{n_2}{3} V_2 \left[1 + \frac{10}{3} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где n_2 – число ближайших соседей (в рассматриваемом случае $n_2 = 3$). Из (4) имеем

$$V_1 = \sqrt{\frac{3}{10 n_2}} \left[V_2 \left(3|E_b| - n_2 |V_2| \right) \right]^{1/2}.$$

Слишком пологий (по квадратичной гиперболе) спад V_2 (формула (3)) с возрастанием межатомного расстояния a приводит к тому, что в динамическом режиме (в адиабатических условиях), когда могут иметь место ангармонические эффекты, формулы (1), (2) дают заниженные значения силовых констант. Для учета этого обстоятельства в работах [21, 26] введено дополнительное и быстро спадающее с a (по закону a^{-12}) слагаемое. Однако при расчете ангармонических характеристик (параметра Грюнайзена, коэффициента теплового расширения, упругих постоянных третьего порядка и др.) указанная поправка приводит к сильно завышенным результатам [24].

В большинстве важных с практической точки зрения случаев можно использовать статические или квазигармонические значения силовых констант и упругих характеристик 2D-материалов, соответствующие изотермическим условиям. Поэтому далее будем пользоваться выражениями (1)–(4). Предлагаемая методика в ее настоящем виде непригодна для расчета упругих характеристик рассматриваемых материалов в адиабатических условиях. Ее модификация для таких условий требует дополнительных экспериментальных и теоретических исследований по характеру зависимости ковалентной энергии от межатомного расстояния.

Учет степени ковалентности и степени ионности σ-связей для бинарных соединений проведен в работе [27], где также оценен вклад π-связей в полярность σ-связей и значения силовых констант. С физической точки зрения они вызывают «измятость»

(rumpling, buckling) 2D-структуры в третьем измерении. В данной работе рассчитаны приведенные к графену значения силовых констант $K_0 = k_0(\text{AB})/k_0(\text{Gr})$ и $K_1 = k_1(\text{AB})/k_1(\text{Gr})$ для рассматриваемых графеноподобных бинарных 2D-структур. Это позволяет вычислить константы k_0 и k_1 для соответствующих неуглеродных 2D-наноаллотропов.

Расчет упругих характеристик. Независимые компоненты матриц упругих жесткостей рассматриваемых 2D-наноаллотропов можно выразить через найденные значения констант k_0 и k_1, руководствуясь схемой, предложенной в работе [26], основанной на модели Китинга [28]. Для 2D-наноструктур классов симметрии 6/*mmm* и 3/*mmm* эти компоненты находятся по формулам [26]:

$$c_{11} = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(4\alpha + \beta + 18\frac{\alpha\beta}{4\alpha+\beta}\right), \tag{5}$$

а для наноструктур классов 4/*mmm* и *m* – по формулам [23]:

$$c_{11} = \frac{4(2\alpha+3\beta)}{\left(1+\sqrt{2}\right)^2}, \quad c_{12} = \frac{4(2\alpha-\beta)}{\left(1+\sqrt{2}\right)^2}, \quad c_{23} = \frac{2\alpha+\beta}{\left(1+\sqrt{2}\right)^2}. \tag{6}$$

Здесь вместо k_0 и k_1 приняты обозначения α и β из работы [28], имеющие тот же физический смысл.

Для инженерных расчетов вместо упругих жесткостей часто бывает удобнее пользоваться значениями модуля Юнга Y и коэффициента Пуассона σ. Они выражаются через c_{ij} по следующим формулам [29]:

- для 2D-наноаллотропов классов симметрии 6/*mmm*, 3/*mmm* и кристаллографического направления <10> классов симметрии 4/*mmm* и *m*:

$$Y = \frac{c_{11}^2 - c_{12}^2}{c_{11}}, \quad \sigma = \frac{c_{12}}{c_{11}}; \tag{7}$$

- для 2D-наноаллотропов классов симметрии 4/*mmm* и *m* в направлении <11>:

$$Y = \frac{2(c_{11}+c_{12})c_{33}}{2(c_{11}+c_{12})+c_{33}}, \quad \sigma = \frac{2(c_{11}+c_{12})-c_{33}}{2(c_{11}+c_{12})+c_{33}}. \tag{8}$$

Результаты и их обсуждение. Рассчитанные по формулам (1), (2) с учетом K_0 и K_1 значения констант центрального k_0 и нецентрального k_1 взаимодействий атомов для исследуемых 2D-наноаллотропов приведены в табл.1. Там же указаны вычисленные по формулам (5), (6) независимые компоненты тензора упругих жесткостей для этих материалов в матричном представлении. Все приведенные числовые значения соответствуют изотермическим условиям. В табл.2 приведены изотермические значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для данных материалов, вычисленные по формулам (7), (8). Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что данные по модулю Юнга, приведенные в табл.2, для графена $(C)_6$ и монослойного нитрида бора $(BN)_6$ попадают в интервалы значений, рассчитанных разными методами в работах [30, 31].

Таблица 1

Силовые константы и упругие жесткости графенов, силиценов и бинарных соединений типа $A^{III}B^{V}$ в изотермических условиях

Table 1

Force constants and elastic rigidities of graphenes, silicenes and binary compounds of $A^{III}B^{V}$ type in the isothermal conditions

2D-наноаллотроп	k_0, Н/м	k_1, Н/м	c_{11}, Н/м	c_{12}, Н/м	c_{33}, Н/м
Графены и силицены					
$(C)_6$	177	38,9	5,33	331	–
$(C)_{63(12)}$	25,1	5,80	75,7	47,1	–
$(C)_{664}$	120	27,6	361	226	–
$(C)_{44}$	177	40,8	328	215	68
$(Si)_6$	40,7	1,95	100	90,2	–
$(Si)_{63(12)}$	5,77	0,29	14,3	12,8	–
$(Si)_{664}$	2,76	1,38	10,4	3,99	–
$(Si)_{44}$	40,7	2,04	60,3	54,6	14,4
Бинарные соединения типа $A^{III}B^{V}$					
$(BN)_6$	142	25,3	405	280	–
$(BN)_{63(12)}$	20,1	3,77	58,0	39,3	–
$(BN)_{664}$	96,0	17,9	277	188	–
$(BN)_{44}$	142	26,5	250	177	53,4
$(AlN)_6$	70,8	27,2	172	158	–
$(AlN)_{63(12)}$	10,0	0,41	24,4	22,3	–
$(AlN)_{664}$	48,0	1,93	117	107	–
$(AlN)_{44}$	70,8	2,86	103	95,1	24,9
$(AlP)_6$	42,5	0,39	99,2	97,2	–
$(AlP)_{63(12)}$	6,02	0,06	14,1	13,8	–
$(AlP)_{664}$	28,8	0,28	67,2	65,7	–
$(AlP)_{44}$	42,5	0,41	59,4	58,2	14,7
$(GaN)_6$	67,3	1,95	162	152	–
$(GaN)_{63(12)}$	9,54	0,29	23,0	21,5	–
$(GaN)_{664}$	45,6	1,38	110	103	–
$(GaN)_{44}$	67,3	2,04	96,9	91,3	23,5
$(GaP)_6$	44,3	0,39	104	102	–
$(GaP)_{63(12)}$	6,28	0,03	14,7	14,4	–
$(GaP)_{664}$	30,0	0,28	70,1	68,6	–
$(GaP)_{44}$	44,3	0,41	61,8	60,7	15,3

Из полученных результатов видно, что из всех рассмотренных 2D-наноаллотропов наиболее высокие упругие свойства имеет классический графен $(C)_6$. Для него значения независимых компонент двумерных упругих жесткостей соответственно равны: c_{11} = 533 Н/м; c_{12} = 331 Н/м, а для двумерного модуля Юнга и коэффициента Пуассона Y = 327 Н/м и σ = 0,62. К классическому графену $(C)_6$ по упругости близок такой же по симметрии 2D-наноаллотроп нитрида бора $(BN)_6$ (или *h*-BN в других обозначениях), для которого c_{11} = 405 Н/м, c_{12} = 280 Н/м, Y = 211 Н/м, σ = 0,69. Модуль Юнга 2D-наноаллотропа нитрида алюминия $(AlN)_6$ в 12,2 раза меньше, чем у классического графена, и в 7,8 раза меньше, чем у нитрида бора. Упругие свойства всех прочих 2D-наноаллотропов гораздо хуже. С физической точки зрения это объясняется тем, что у графена $(C)_6$ самое маленькое межатомное расстояние a = 1,42 Å и, следовательно, самая большая ковалентная энергия V_2 (см. выражение (3)), а значит, самые большие

Таблица 2

Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для графенов, силиценов и бинарных соединений типа $A^{III}B^{V}$ в изотермических условиях

Table 2

Values of Young's modulus and Poisson's ratio for graphenes, silicenes and binary compounds of $A^{III}B^{V}$ type in the isothermal conditions

2D-наноаллотроп	Y, Н/м	σ	$Y^{<11>}$, Н/м	$\sigma^{<11>}$
Графены и силицены				
$(C)_6$	327	0,62	–	–
$(C)_{63(12)}$	46,4	0,62	–	–
$(C)_{664}$	220	0,63	–	–
$(C)_{44}$	187	0,63	63,0	0,88
$(Si)_6$	18,6	0,90	–	–
$(Si)_{63(12)}$	2,84	0,90	–	–
$(Si)_{664}$	8,9	0,88	–	–
$(Si)_{44}$	48,4	0,91	13,6	0,88
Бинарные соединения типа $A^{III}B^{V}$				
$(BN)_6$	211	0,69	–	–
$(BN)_{63(12)}$	31,3	0,68	–	–
$(BN)_{664}$	149	0,68	–	–
$(BN)_{44}$	124	0,71	50,3	0,88
$(AlN)_6$	26,9	0,92	–	–
$(AlN)_{63(12)}$	4,02	0,91	–	–
$(AlN)_{664}$	19,1	0,91	–	–
$(AlN)_{44}$	15,2	0,92	21,4	0,95
$(AlP)_6$	3,96	0,98	–	–
$(AlP)_{63(12)}$	0,59	0,98	–	–
$(AlP)_{664}$	2,97	0,98	–	–
$(AlP)_{44}$	2,38	0,98	13,8	0,98
$(GaN)_6$	19,4	0,94	–	–
$(GaN)_{63(12)}$	2,90	0,93	–	–
$(GaN)_{664}$	13,5	0,94	–	–
$(GaN)_{44}$	10,9	0,94	22,1	0,53
$(GaP)_6$	3,96	0,98	–	–
$(GaP)_{63(12)}$	0,59	0,98	–	–
$(GaP)_{664}$	2,97	0,98	–	–
$(GaP)_{44}$	2,18	0,98	14,5	0,90

силовые константы. Для сравнения: у силицена $(Si)_6$ a = 2,23 Å [21], и по своим упругим свойствам он значительно уступает не только одинаковому с ним по симметрии графену $(C)_6$, но и многим другим 2D-наноаллотропам.

Отметим также, что коэффициенты Пуассона для всех 2D-наноаллотропов с одинаковым химическим составом независимо от их симметрии практически идентичны. Они определяют степень упругой анизотропии, которая у графенов всех типов самая высокая ввиду больших значений силовых констант (см. формулы (5), (6)). Кроме того, модуль Юнга и коэффициенты Пуассона 2D-наноаллотропов фосфида алюминия и фосфида галлия практически идентичны, хотя их силовые константы и упругие жесткости несколько различаются. Это объясняется не абсолютными значениями c_{11} и c_{12} в формулах (5), а их сочетанием.

Графены и силицены являются полуметаллами или узкозонными полупроводниками, а 2D-наноаллотропы бинарных соединений типа $A^{III}B^{V}$ – широкозонными полупро-

водниками или диэлектриками и в отличие от первых имеют пьезоэлектрические свойства в силу своей нецентросимметричности. Это расширяет спектр их возможных применений в наноэлектронике. При этом знание упругих свойств данных материалов имеет большое значение.

Заключение. С помощью модифицированного метода связывающих орбиталей Харрисона и применения модели Китинга и общих представлений кристаллофизики с приемлемой для оценочных целей точностью найдены изотермические значения упругих жесткостей, модуля Юнга и коэффициентов Пуассона для графена и других 2D-наноаллотропов. Метод базируется на простых аналитических выражениях и может использоваться в инженерных расчетах.

Результаты работы показывают, что наряду с графеном перспективными для наноэлектроники материалами могут стать монослойный гексагональный нитрид бора, а также бинарные соединения типа $A^{III}B^{V}$ в виде 2D-наноаллотропов различной симметрии, которые, кроме того, являются пьезоэлектриками.

Литература

1. ***Lemme M.C., Echtemeyer T.J., Baus M., Kurz H.*** Graphene field-effect device // IEEE Electron Dev. Lett. 2007. Vol. 28. P. 283–284.

2. Graphene and mobile ions: The key to all-plastic, solution-processed light-emitting devices / ***P. Malyba, H.Yamaguchi, G. Eda et al.*** // Am. Chem. Soc. 2010. Vol. 4. No. 1-2. P. 637–642.

3. Electromechanical resonators from graphene sheets / ***J.S. Bunch, A.M. Van Der Zande, S.S. Verbridge et al.*** // Science. 2007. Vol. 315. P. 490–493.

4. Graphene based nanosensor for aqueous phase detection of nitroaromatics / ***S. Avaz, R.B. Roy, V.R.S.S. Mokkapati et al.*** // RCS Adv. 2017. Vol. 7. No. 7. P. 25519–25527.

5. Boron nitride monolayer: A strain-turnable nanosensor / ***M. Neek-Amal, J. Beheshtian, A. Sadeghi et al.*** // J. Phys. Chem. C. 2013. Vol. 117(25). P. 1361–1367.

6. ***Браже Р.А., Кочаев А.И., Советкин А.А.*** Пьезоэффект в графеноподобных 2D-супракристаллах с нарушающей центросимметричность периодической перфорацией // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 9. С.1809–1812.

7. ***Браже Р.А., Кочаев А.И., Мефтахутдинов Р.М.*** Фотоупругие свойства графенов // ФТТ. 2017. Т. 59. Вып. 2. С. 334–337.

8. ***Hartree D.R.*** The wave mechanics of an atom with a non-Coulomb central field. Part I: Theory and methods // Proc. Cambridge Philos. Soc. 1928. Vol. 24. P. 89–110.

9. ***Fock V.*** Näherungsmethode zur Lösung des quantenmechanischen Mehrkörperproblems // Z. Phys. 1930. Vol. 61. Iss. 1-2. P. 126–148.

10. ***Jones R.O.*** The density functional formalism, its applications and prospects // Rev. Mod. Phys. 1989. Vol. 61. No. 3. P. 689–746.

11. ***Staroverov V.N., Scuseria G.E.*** Optimization of density matrix functionals by the Hartree–Fock–Bogoliubov method // J. Chem. Phys. 2002. Vol. 117. No. 24. P. 1107–1112.

12. ***Kohn W.*** Nobel lecture: Electronic structure of matter – wave function and density functionals // Rev. Mod. Phys. 1999. Vol. 71. P. 1253–1266.

13. Теоретические методы исследования наноструктур / ***О.Е. Глухова, И.В. Кириллова, И.Н. Салий и др.*** // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2012. Вып.9 (100). С. 106–117.

14. ***Федоров А.С., Сорокин П.Б., Аврамов П.В., Овчинников С.Г.*** // Моделирование свойств, электронной структуры ряда углеродных и неуглеродных нанокластеров и их взаимодействий с легкими элементами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. –
URL: http:\\www.kirensky.ru/masterparticles/monogr/Book/About.htm (дата обращения: 20.06.2019).

15. ***Lennard-Jones J.E.*** Wavefunction of many-electron atoms // Proc. Roy. Soc. 1924. Vol. A106. P. 463–477.

16. ***Morse P.M.*** Diatomic molecules according to the wave mechanics. II. Vibrational levels // Phys.Rev. 1929. Vol. 34. P. 57–64.

17. ***Enyashin A.N., Ivanovskii A.L.*** Graphene allotropes // Phys. Status. Solidi (b). 2011. Iss. 8. P. 1879–1883.

18. ***Беленков Е.А., Грешняков В.А.*** Классификация структурных разновидностей углерода // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 8. С. 1640–1650.

19. A review on silicene – new candidate for electronics / ***A. Kara, H. Enriquez, A.P. Seitsonen et al.*** // Surf. Sci. Rep. 2012. Vol. 67. P. 1–18.

20. Large-area monolayer hexagonal boron nitride on Pt foil / ***J.-H. Park, J.-C. Park, S.J. Yun et al.*** // ACS Nano. 2014. Vol. 8. P. 8520–8528.

21. ***Давыдов С.Ю., Посредник О.В.*** К теории упругих свойств двумерных гексагональных структур // ФТТ. 2015. Т. 57. Вып. 4. С. 819–824.

22. ***Браже Р.А., Каренин А.А.*** Компьютерное моделирование физических свойств супракристаллов // Изв. вузов. Физ.-мат. науки. 2011. № 2(18). С. 105–112.

23. ***Браже Р.А., Каренин А.А., Кочаев А.И., Мефтахутдинов Р.М.*** Упругие характеристики углеродных 2D-супракристаллов в сравнении с графеном // ФТТ. 2011. Т. 53. Вып. 7. С. 1406–1408.

24. ***Харрисон У.*** Электронная структура и свойства твердых тел. М.: Мир, 1983. Т. 1. 381 с.

25. ***Давыдов С.Ю.*** Об упругих характеристиках графена и силицена // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 1. С. 172–174.

26. ***Давыдов С.Ю.*** О силовых константах графена // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 9. С. 1815–1818.

27. ***Давыдов С.Ю.*** Вклад π-связей в эффективные заряды, энергию когезии и силовые константы графеноподобных соединений // ФТТ. 2016. Т. 58. Вып. 2. С. 392–400.

28. ***Keating P.N.*** Effect of invariance requirements on the elastic strain energy of crystals with application to the diamond structure // Phys. Rev. 1986. Vol. 145. P. 637–645.

29. ***Браже Р.А., Нефедов В.С., Кочаев А.И.*** Модуль Юнга и коэффициент Пуассона планарных и нанотубулярных супракристаллических структур // ФТТ. 2012. Т. 54. Вып. 7. С. 1347–1349.

30. ***Le M.-Q.*** Prediction on Young's modulus of hexagonal monolayer sheets based on molecular mechanics // Int. J. Mech. and Mat.in Design. 2015. Iss. 1. P. 15–24.

31. ***Boldrin L., Scarpa F., Chowdhury R., Adhikari S.*** Effective mechanical properties of hexagonal boron nitride nanosheets // Nanotechnology. 2011. Vol. 22. P. 505702–505709.

Поступила в редакцию 24.06.2019 г.; после доработки 06.08.2019 г.; принята к публикации 19.11.2019 г.

Браже Рудольф Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), brazhe@ulstu.ru

Долгов Дмитрий Андреевич – аспирант кафедры физики Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32) deimosrffi@yandex.ru

References

1. Lemme M.C., Echtemeyer T.J., Baus M., Kurz H., Graphene field-effect device. *IEEE Electron Dev. Lett*., 2007, vol. 28, pp. 283–284.

2. Malyba P., Yamaguchi H., Eda G. et al. Graphene and mobile ions: The key to all-plastic, solution-processed light-emitting devices. *Am. Chem. Soc*., 2010, vol. 4, no. 1-2, pp. 637–642.

3. Bunch J.S., Van Der Zande A.M., Verbridge S.S. et al. Electromechanical resonators from graphene sheets. *Science*, 2007, vol. 315, pp. 490–493.

4. Avaz S., Roy R.B., Mokkapati V.R.S.S. et al. Graphene based nanosensor for aqueous phase detection of nitroaromatics. *RCS Adv.*, 2017, vol. 7, no. 7, pp. 25519–25527.

5. Neek-Amal M., Beheshtian J., Sadeghi A. et al. Boron nitride monolayer: A strain-turnable nanosensor. *J.Phys. Chem. C*, 2013, vol. 117(25), pp. 1361–1367.

6. Brazhe R.A., Kochaev A.I., Sovetkin A.A. Piezoelectric effect in graphene-like 2D supracrystalls with a periodic perforation breaking the central symmetry. *Phys. Solid State*, 2013, vol. 55, no. 9, pp. 1925–1928.

7. Brazhe R.A., Kochaev A.I., Meftakhutdinov R.M. Photoelastic properties of graphenes. *Phys. Solid State*, 2017, vol. 59, no. 2, pp. 334–337

8. Hartree D.R. The wave mechanics of an atom with a non-Coulomb central field. Part I: Theory and methods. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 1928, vol. 24, pp. 89–110.

9. Fock V. Näherungsmethode zur Lösung des quantenmechanischen Mehrkörperproblems. *Z. Phys.*, 1930, vol. 61, iss. 1-2, pp. 126–48.

10. Jones R.O. The density functional formalism, its applications and prospects. *Rev. Mod. Phys.*, 1989, vol. 61, no. 3, pp. 689–746.

11. Staroverov V.N., Scuseria G.E. Optimization of density matrix functionals by the Hartree–Fock–Bogoliubov method. *J. Chem. Phys.*, 2002, vol. 117, no. 24, pp. 1107–1112.

12. Kohn W. Nobel lecture: Electronic structure of matter – wave function and density functional. *Rev. Mod. Phys.*, 1999, vol. 71, pp. 1253–1266.

13. Glukhova O.E., Kirillova I.V., Saliy I.N. et. al. Theoretical methods of nanostructures investigation. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya = Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2012, iss. 9(100), pp. 106–117. (in Russian).

14. Fedorov A.S., Sorokin P.B., Avramov P.V., Ovchinnikov S.G. Modeling of the properties, electron structure of series of carbon and not carbon nanoclusters and their interaction with easy elements. *Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science publishing house*, 2006. Available at: http:\\www.kirensky.ru/masterparticles/monogr/Book/About.htm (accessed: 20.06.2019). (in Russian).

15. Lennard-Jones J.E. Wavefunction of many-electron atoms. *Proc. Roy. Soc.*, 1924, vol. A106, pp. 463–477.

16. Morse P.M. Diatomic molecules according to the wave mechanics. II. Vibrational levels. *Phys.Rev.*, 1929, vol. 34, pp. 57–64.

17. Enyashin A.N., Ivanovskii, A.L. Graphene allotropes. *Phys. Status Solidi (b)*, 2011, iss. 8, pp. 1879–1883.

18. Belenkov E.A., Grexhnyakov V.A. Classification of structural modifications of carbon. *Phys. Solid State*, 2013, vol. 55, no. 8, pp. 1754–1764.

19. Kara A., Enriquez H., Seitsonen A.P. et al. A review on silicone – New candidate for electronics. *Surf. Sci. Rep.*, 2012, vol. 67, pp. 1–18.

20. Park J.-H., Park J.-C., Yun S.J. et al. Large-area monolayer hexagonal boron nitride on Pt foil. *ACS Nano*, 2014, vol. 8, pp. 8520–8528.

21. Davydov S.Yu., Posrednik O.V. On the theory of elastic properties of two-dimensional hexagonal structures. *Phys. Solid State*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 837–843.

22. Brazhe R.A., Karenin, A.A. Computer simulation of the supracrystals physical properties. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*, 2011, no. 2(18), pp. 105–112. (in Russian).

23. Brazhe R.A., Karenin A.A., Kochaev A.I., Meftakhutdinov R.M. Elastic characteristics of 2D supracrystals as compared to grapheme. *Phys. Solid State*, 2011, vol. 53, iss. 7, pp. 1481–1483.

24. Harisson W. *Electron structure and properties of solids. Part 1*. Moscow, Mir Publ., 1983, vol. 1. 381 p. (in Russian).

25. Davydov S.Yu. On the elastic characteristics of graphene and silicone. *Phys. Solid State*, 2010, vol. 52, no.1, pp. 184–187.

26. Davydov S.Yu., On the force constants of grapheme. *Phys. Solid State*, 2010, vol. 52, no. 9, pp. 1947–1951.

27. Davydov S.Yu. Contribution of π-bonds to effective charges, cohesive energy, and force constants of graphene-like compounds. *Phys. Solid State*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 402–412.

28. Keating P.N., Effect of invariance requirements on the elastic strain energy of crystals with application to the diamond structure. *Phys. Rev.*, 1986, vol. 145, pp. 637–645.

29. Brazhe R.A., Kochaev A.I., Nefedov V.S. Young's modulus and the Poisson's ratio of planar and nanotubular supracrystalline structures. *Phys. Solid State*, 2012, vol. 54, no. 7, pp. 1430–1432.

30. Le M.-Q., Prediction on Young's modulus of hexagonal monolayer sheets based on molecular mechanics. *Int. J. Mech. and Mat. in Design*, 2015, no. 1, pp. 15–24.

31. Boldrin L., Scarpa F., Chowdhury R., Adhikari S. Effective mechanical properties of hexagonal boron nitride nanosheets. *Nanotechnology*, 2011, vol. 22, pp. 505702–505709.

Received 24.06.2019; Revised 06.08.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the authors:

Rudolf A. Brazhe – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Physics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), brazhe@ulstu.ru

Dmitry A. Dolgov – PhD student of the Physics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), deimosrffi@yandex.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSORS AND ROUTES

УДК 621.382.323-022.532 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-19-30**

Латеральная рекристаллизация наноструктур аморфного кремния с использованием силицида никеля

С.О. Белостоцкая, Е.В. Кузнецов, Е.Н. Рыбачек, О.В. Губанова

НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

O.Chuyko@tcen.ru

Метод металлостимулированной латеральной рекристаллизации является актуальной исследовательской задачей для создания ИС многоуровневой архитектуры, чувствительных элементов сенсоров, а также электронных микро- и наносистем. В работе представлен оптимизированный метод металлостимулированной латеральной рекристаллизации (Metal-Induced Lateral Crystallization, MILC) нанопроволочных структур из аморфного кремния с использованием силицида никеля. На основе данного метода изготовлены нанопроволочные *n*-канальные полевые транзисторы с окружным затвором – MILC GAA-транзисторы (Gate-All-Around). Аналогичные структуры созданы на основе монокристаллического кремния с использованием КНИ-подложек – КНИ GAA-транзисторы. Выполнен сравнительный анализ электрических характеристик полевых нанопроволочных GAA-транзисторов на основе рекристаллизованного и монокристаллического кремния. Показано, что электрофизические характеристики нанопроволочных MILC GAA-транзисторов сравнимы с характеристиками нанопроволочных КНИ GAA-транзисторов. Так, измеренная подвижность электронов в слабых полях для MILC GAA-транзистора составила 130 см^2/В·с, для КНИ GAA-транзистора – 200 см^2/В·с.

Ключевые слова: нанопроволочные структуры; силицид никеля; латеральная металлостимулированная рекристаллизация (MILC); *n*-канальный GAA-транзистор с окружным затвором; МОП-технология; КНИ-технология; ИС

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание № 0N59-2019-0019).

Для цитирования: Белостоцкая С.О., Кузнецов Е.В., Рыбачек Е.Н., Губанова О.В. Латеральная рекристаллизация наноструктур аморфного кремния с использованием силицида никеля // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 19–30. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-19-30

© С.О. Белостоцкая, Е.В. Кузнецов, Е.Н. Рыбачек, О.В. Губанова, 2020

Lateral Crystallization of Amorphous Silicon Nanowires Using NickelSilicide

S.O. Belostotskaya, E.V. Kuznetsov, E.N. Rybachek, O.V. Gubanova

SMC «Technological Centre», Moscow, Russia

O.Chuyko@tcen.ru

Abstract: The metal-induced recrystallization method is an urgent research task for creating the integrated circuits of multi-level architecture, sensitive elements of sensors as well as of the electronic micro- and nanosystems. In the work an optimized method of the metal-induced lateral recrystallization (MILC) of the nano-wire structures from amorphous silicon (a-Si) using nickel silicide has been presented. Based on the given method the nano-wire n-channel field transistors (Gate-All-Around) – MILC GAA transistors have been manufactured. Similar structures have been manufactured based on monocrystal silicon using SOI (SIMOX) structures have been made. The comparison between the electric characteristics of MILS GAA of field nanowire transistors based on recrystallized monocrystal silicon has been performed. It has been shown that the electric-physical characteristics of nano-wire MLC GAA transistors on recrystallized silicon are comparable with nanowire MILC transistors. Thus, the measured MILC G-AA – mobility of electrons in weak fields for MILC GAA of the transistor was 130 $cm^2/V \cdot s$ for MILC GAA transistor it was 200 $cm^2/V \cdot s$.

Keywords: nanowire structures; nickel silicide; lateral metal-induced crystallization (MILC); n-channel GAA transistor; MOS technology; IC

For citation: Belostotskaya S.O., Kuznetsov E.V., Rybachek E.N., Gubanova O.V. Lateral crystallization of amorphous silicon nanowires using nickelsilicide. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 19–30. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-19-30

Funding: the study has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state assignment № 0N59-2019-0019).

Введение. В настоящее время кремниевые нанопроволочные транзисторы находят все большее применение в различных областях микро - и наносистемной техники [1–3]. Особое место занимают ИС, изготавливаемые с применением метода латеральной металлостимулированной рекристаллизации (Metal Induced Lateral Crystallization, MILC), которые используются в производстве ЖК-дисплеев с активными матрицами, при создании переключающих элементов и управляющих ИС активной матрицы [3–5]. Одним из материалов, применяемых при производстве многоуровневых ИС, является рекристаллизованный аморфный кремний [6, 7]. В работе [1] подвижность основных носителей кремниевых нанопроволочных транзисторов, изготовленных методом MILC, составила 80 $см^2/В \cdot с$, допороговый наклон равен 110 мВ/декаду тока.

Цель настоящей работы – оптимизация метода MILC при изготовлении нанопроволочных структур из аморфного кремния (*a*-Si) с использованием силицида никеля ($NiSi_2$) для улучшения качества кристаллизованных нанопроволочных элементов. Изготовлены нанопроволочные *n*-канальные полевые MILC GAA-транзисторы с окружным затвором (Gate-All-Around) с использованием оптимизированного метода MILC. Основные электрические параметры изготовленных MILC GAA-транзисторов сравнива-

лись как с конструктивно подобными КНИ GAA-транзисторами, изготовленными на основе монокристаллического кремния с использованием КНИ-подложек, так и со структурами MILC SiWs, описанными в работе [1].

Метод MILC с использованием силицида никеля. Одним из перспективных способов латеральной рекристаллизации тонких слоев аморфного кремния является применение слоев $NiSi_2$ в качестве источников центров рекристаллизации [3–7]. Как показано в работе [6], температура формирования $NiSi_2$ на *a*-Si значительно ниже (менее 400 °C) температуры формирования $NiSi_2$ на кремниевой подложке (выше 600 °C), а период кристаллической решетки $NiSi_2$ составляет 5,406 Å, что всего на 0,4 % меньше периода кристаллической решетки кремния, равного 5,430 Å. Кристаллиты $NiSi_2$, образованные в объеме *a*-Si, при последующих термических обработках играют роль центров рекристаллизации и преимущественно ориентированы в направлениях [110] и [100] к поверхности пленки.

На рис.1 показана структура для локального формирования рекристаллизованного слоя *a*-Si с использованием никеля как источника центров рекристаллизации [4]. Структура представляет собой слой *a*-Si толщиной 100 нм на изолирующем диэлектрике. Сверху сформирована маска из оксида кремния (SiO_2), осажденного при температуре ниже температуры рекристаллизации, в которой вскрыты контактные окна к *a*-Si. Пленка никеля сформирована магнетронным напылением. При термической обработке в инертной среде при температуре от 525 до 625 °C в контактных окнах происходит твердофазная реакция никеля с *a*-Si с образованием $NiSi_2$, что приводит к снижению энергии активации процесса рекристаллизации *a*-Si. В процессе термической обработки под слоем $NiSi_2$ аморфный кремний рекристаллизуется в MIC-поликремний (Metal Induced Crystallization), который имеет малый размер зерна и огромное количество границ зерен. Далее рекристаллизация протекает латерально в глубь аморфного кремния, образуя слой MILC-поликремния. Его структура в основном содержит горизонтальные нитеобразные зерна, которые после заключительных термообработок можно использовать в качестве рабочих областей транзисторов [1–6].

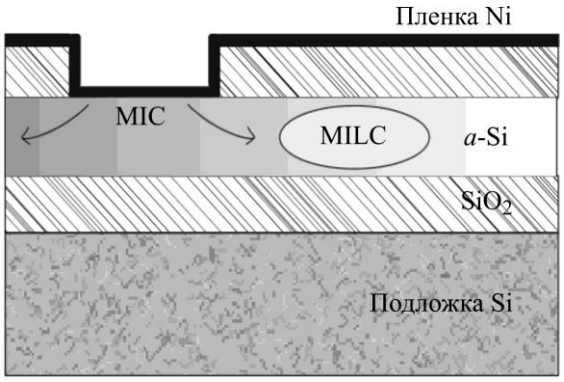


Рис.1. Латеральная кристаллизация аморфного кремния [4]
Fig.1. Lateral crystallization of amorphous silicon [4]

Основной недостаток полученного MIC-поликремния – высокая концентрация атомов никеля, которая приводит к металлическим загрязнениям пленки MILC-поликремния. При этом температура рекристаллизации уменьшается с повышением концентрации металла в *a*-Si [6]. Путем изменения температуры и времени термической обработки концентрацию никеля в пленке можно менять в широких пределах. Уменьшение концентрации никеля в *a*-Si является важной задачей для обеспечения высокого качества пленки MILC-поликремния. Процесс рекристаллизации дает возможность получить размер кристаллитов, достаточный для формирования на них рабочих областей – каналов полевых транзисторов. Применение данного процесса перспективно при создании наноразмерных структур для формирования на их основе приборов микро- и наносистемной техники, медицины, а также в других приложениях [1].

В настоящей работе с применением метода MILC проведена рекристаллизация аморфных нанопроволочных структур, на основе которых изготовлен и исследован *n*-канальный нанопроволочный MILC GAA-транзистор с окружным затвором [8]. Конструкция MILC GAA-транзистора обеспечивает увеличение тока стока транзистора в открытом состоянии при уменьшении тока стока в закрытом состоянии по сравнению с другими типами полевых транзисторов. Поэтому она рассматривается в качестве основной конструкции активных элементов будущих ИС с предельными проектными нормами.

Движение фронта рекристаллизации направлено преимущественно латерально по всей протяженности нанопроволочного элемента [1]. При этом предполагалось, что пространственное ограничение области рекристаллизации может привести к более совершенной кристаллической структуре нанопроволоки с возможностью формирования проводящего канала на основе одного монокристалла.

Эксперимент. При исследовании процесса металлостимулированной рекристаллизации *a*-Si определены основные конструктивные и технологические параметры, гарантирующие получение достаточного для формирования проводящего канала полевых транзисторов размера кристаллитов. В работе подобраны толщина пленок *a*-Si и никеля; температура отжига пленки никеля после магнетронного напыления для формирования $NiSi_2$; температура рекристаллизационного отжига в инертной среде. Определена зависимость длины фронта рекристаллизации от времени термического отжига и геометрии тестовых структур.

Слой *a*-Si толщиной 150 нм осаждали при температуре 550 °С и давлении 40 Па. На него осаждали слой плазмохимического оксида кремния при температуре 350 °С, в котором вскрыты области контактов к *a*-Si. Методом мегнетронного напыления сформирован слой никеля толщиной 30 нм, и в одном вакуумном цикле проведен термический отжиг для формирования $NiSi_2$. Избыточный никель удаляли методом жидкостного химического травления в растворе Каро (H_2SO_4:H_2O_2 = 7:3) при температуре порядка 100 °С в течение 2 мин. Рекристаллизация слоя аморфного кремния проходила при температуре 530 °С в атмосфере азота.

Для определения скорости кристализации на полученных образцах проведена оценка размера отдельных рекристаллизованных зерен MILC-поликремния. Зерна MILC-поликремния исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (рис.2). После 9 ч термического отжига при температуре 530 °С получен размер кристаллитов не менее 5 мкм. Следовательно, скорость роста MILC-кристаллитов в пленке составляет не менее 0,5 мкм/ч. Она зависит от температуры и превышает почти в 2 раза скорость, приведенную в работе [1], при температуре 450 °С. На основании полученных результатов определены технологические режимы рекристаллизации нанопроволочных элементов с использованием MILC-процесса.

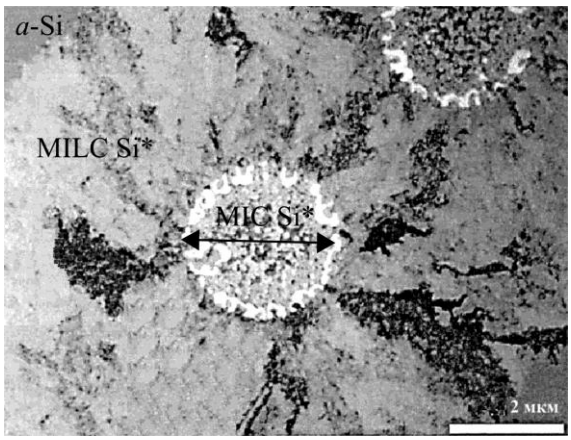


Рис.2. Светлопольное ПЭМ-изображение участков MIC, MILC и аморфного поликремния
Fig.2. TEM image: the bright-field image of the MIC, MILC and amorphous polysilicon areas

Для изготовления нанопроволочных *n*-канальных полевых MILC GAA-транзисторов потребовалось 12 фотолитографических циклов. Основные этапы формирования транзисторной структуры представлены на рис.3.

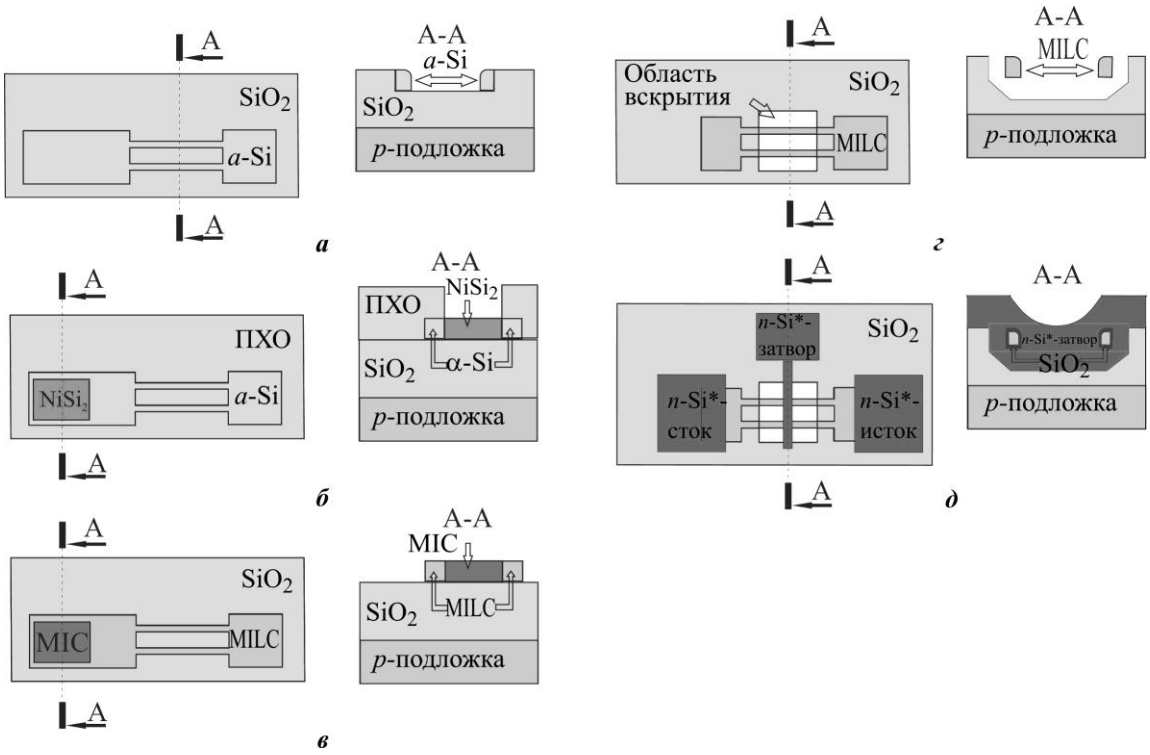


Рис.3. Основные этапы создания MILC GAA-транзистора: *а* – формирование нанопроволочных элементов на опорном рельефе; *б* – напыление пленки никеля; *в* – образование MIC- и MILC-областей после процесса рекристаллизации; *г* – травление опорного рельефа; *д* – формирование окружного затвора транзистора

Fig.3. Image of the main stages of the formation of the MILC GAA transistor: *a* – nanowire elements on the supporting relief; *b* – the formation of the seed $NiSi_2$; *c* – MIC and MILC areas after the recrystallization process; *d* – etching of the supporting relief; *e* – the formation of a gate all around transistor

Исходные кремниевые подложки ориентации <100> *p*-типа окислены на толщину 600 нм, проведены операции фотолитографии и анизотропного реактивно-ионного травления слоя оксида кремния для создания вертикального опорного рельефа высотой 200 нм. Также проведен процесс конформного химического осаждения при пониженном давлении пленки аморфного кремния толщиной 150 нм при температуре 550 °С. Для формирования активных областей тестовых структур «спейсерным» способом применяли операции фотолитографии и анизотропного реактивно-ионного травления слоя аморфного кремния со всех вертикальных поверхностей, не закрытых фоторезистом. Структура, состоящая из изолированных островков *a*-Si, соединенных спейсерами (нанопроволочными элементами), лежащими на опорном рельефе оксида кремния, показана на рис.3,*а*. Далее на сформированные структуры осаждали маскирующий плазмохимический оксид кремния толщиной 450 нм при температуре 350 °С и проводили фотолитографию и травление окон к аморфному кремнию. Магнетронным напылением наносили пленку никеля толщиной 30 нм с отжигом в одном вакуумном цикле для формирования $NiSi_2$. Жидкостным химическим травлением в растворе Каро удаляли непрореагировавший никель с поверхности маскирующего оксида и силицида (рис.3,*б*). Для гарантированной рекристаллизации областей нанопроволочных спейсерных элементов (областей каналов) и стоков-истоков исследуемых тестовых GAA-транзисторов (рис.3,*в*) рекристаллизационный отжиг составил 20 ч при температуре 530 °С в среде азота. Затем жидкостным травлением удален MIC-поликремний из области затравки, а плазмохимическим травлением – оставшийся поликремний в области

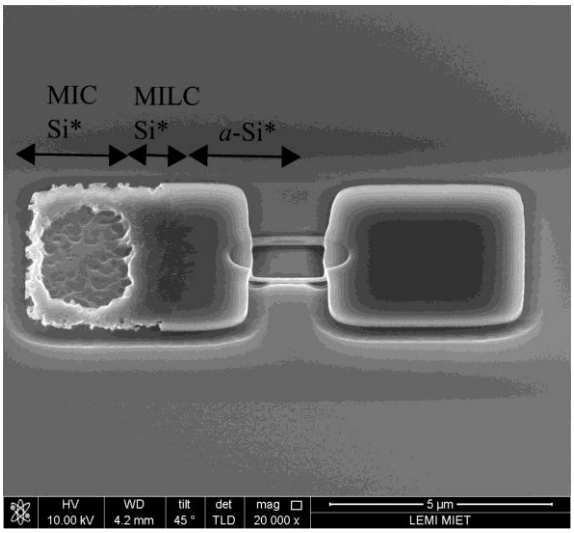
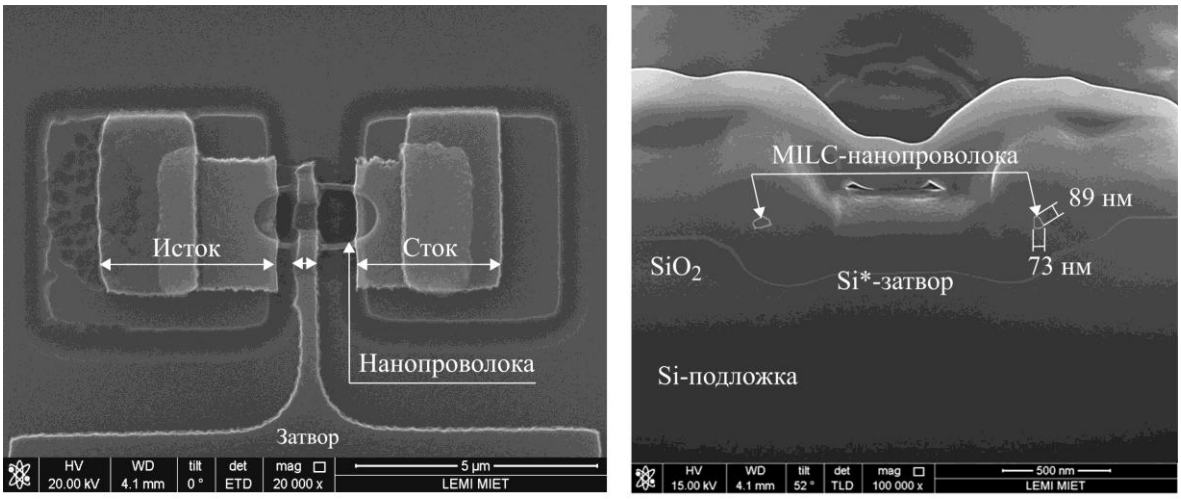


Рис.4. РЭМ-изображение нанопроволочной транзисторной структуры после жидкостного удаления никелевой затравки
Fig.4. SEM image of the Nanowire transistor structure after wet etching of nickel seed

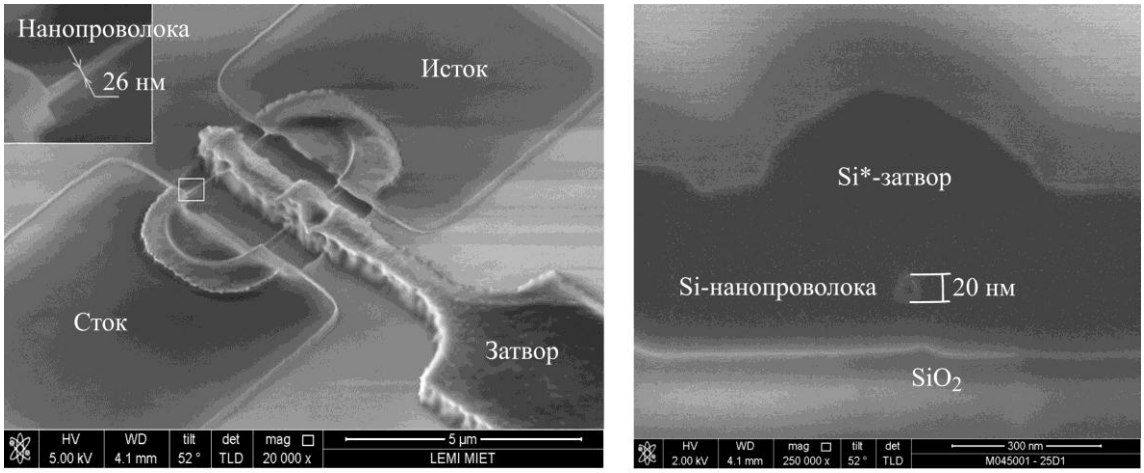
контактного окна. В буферном травителе потравлен опорный оксид только в областях нанопроволочных элементов и проведено их окисление для очистки поверхности и утонения рабочего MILC-слоя в области канала транзистора (рис.3,*г*). Подзатворный диэлектрик толщиной 9 нм сформирован термическим окислением в среде O_2 при температуре 900 °C. Итоговый диаметр рекристаллизованных кремниевых нанопроволок составил порядка 90 нм. Далее сформирован окружной поликремниевый затвор толщиной 300 нм и проведена самосовмещенная ионная имплантация фосфора областей затвора и стоков-истоков (рис.3,*д*). На рис.4 представлено РЭМ-изображение нанопроволочной транзисторной структуры после жидкостного удаления никелевой затравки (показаны стадии рекристаллизации аморфного кремния). На рис.5 приведено РЭМ-изображение конструкции разработанного MILC GAA-транзистора с поликремниевым затвором на основе рекристаллизованного аморфного кремния.



а *б*

Рис.5. РЭМ-изображение *n*-канального MILC GAA-транзистора с поликремневым затвором: *а* – вид сверху; *б* – поперечный рез в области нанопроволочного элемента
Fig.5. SEM image of the *n*-channel MILC GAA transistor with a polysilicon gate: *a* – top view; *b* – cross-sectional in the region of the nanowire element

Проведено сравнение электрофизических характеристик изготовленного *n*-канального MILC GAA-транзистора с характеристиками аналогичных по конструкции и геометрии *n*-канальных КНИ GAA-транзисторов. Нанопроволочные элементы в последнем случае сформированы по «спейсерной» технологии с торцевым окислением исходного монокристаллического слоя кремния КНИ-подложки [9]. Полученный нанопроволочный КНИ GAA-транзистор показан на рис.6,*а*. Диаметр нанопроволок составляет около 20 нм, толщина затворного оксида равна 6,5 нм (рис.6,*б*).



а ***б***

Рис.6. РЭМ-изображение КНИ GAA-транзистора с поликремниевым затвором: *а* – вид сверху, *б* – поперечный рез в области нанопроволочного элемента

Fig.6. SEM image of the SOI GAA transistor with a polysilicon gate: *a* – top view; *b* – cross-sectional in the region of the nanowire element

Анализ электрофизических параметров GAA-транзисторов. Измерения электрофизических параметров GAA-транзисторов проводили на оборудовании ЦКП «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр»: анализаторе полупроводниковых приборов Agilent B1500A и зондовой станции Cascade PM5. С помощью системы Agilent B1500A измерены статические ВАХ нанопроволочного *n*-канального MILC GAA-транзистора. Длина каналов двух типов транзисторов L = 0,8 мкм, а ширину W определяли диаметром нанопроволоки: для технологии МОП КНИ $W \approx 20$ нм, для технологии МОП MILC $W \approx 90$ нм. В нормальных условиях проведены измерения проходной ВАХ транзистора (зависимость тока стока I_{DS} от напряжения на затворе V_G при фиксированном постоянном напряжении исток – сток V_{DS} = 0,1 В) и определено значение допорогового наклона S. Поскольку у рассматриваемых транзисторов ширина разная, необходимо выбрать критерий приведения тока стока к удельному значению. В случае нанопроволочного транзистора отношение токов пропорционально диаметру нанопроволочных элементов.

На рис.7 представлены удельные значения тока стока транзисторов. Наклон допороговой характеристики (рис.7,*а*) исследуемого нанопроволочного *n*-канального MILC GAA-транзистора составляет 70 мВ/декаду тока, а для КНИ GAA-транзистора – порядка 60 мВ/декаду тока. Из графика 7,*б* видно, что плотность тока стока КНИ GAA-транзистора в 2 раза выше плотности тока MILC GAA-транзистора.

Выражение тока стока транзистора I_{DS} описывается следующей формулой [10]:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} C_{ox\text{GAA}} \mu (V_G - V_T) V_{DS},$$

где $C_{ox\text{GAA}}$ – емкость подзатворного диэлектрика; μ – подвижность основных носителей заряда; V_T – пороговое напряжение транзистора.

Емкость подзатворного диэлектрика для GAA-транзистора определяется на основе полученных технологических величин [11]:

$$C_{ox\text{GAA}} \approx \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon L}{\ln(2t/d)},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; t – толщина подзатворного окисла; d – диаметр нанопроволочной структуры.

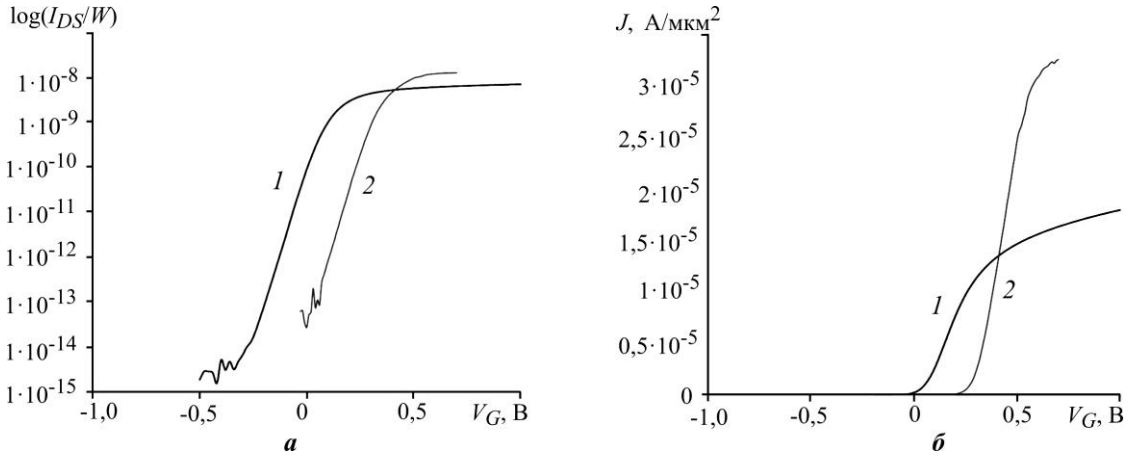


Рис.7. ВАХ *n*-канального GAA-транзистора при V_{DS} = 0,1 В (*а*) и зависимость плотности тока от напряжения на затворе *n*-канального GAA-транзистора (*б*): *1* – MILC GAA-транзистор (*W*/*L* ≈ 0,09/0,8); *2* – КНИ GAA-транзистор (*W*/*L* ≈ 0,02/0,8)

Fig.7. I-V curves of the *n*-channel GAA-transistor on V_{DS} = 0,1V(*a*) and dependence of the current density of the *n*-channel GAA-transistor on the gate voltage (*b*): *1* – MILC GAA transistor (*W*/*L* ≈ 0.09/0.8); *2* – SOI GAA transistor (*W*/*L* ≈ 0.02/0.8)

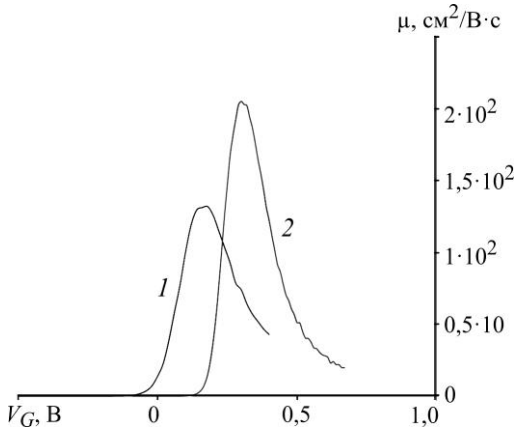


Рис.8. Зависимость подвижности электронов от напряжения на затворе *n*-канального GAA-транзистора: *1* – MILC GAA-транзистор (*W*/*L* ≈ 0,09/0,8); *2* – КНИ GAA-транзистор (*W*/*L* ≈ 0,02/0,8)

Fig.8. Dependence of the electron mobility of the *n*-channel GAA transistor: *1* – MILC GAA transistor (*W*/*L* ≈ 0.09/0.8); *2* – SOI GAA (*W*/*L* ≈ 0.02/0.8)

Подвижность основных носителей заряда вычислена по формуле [12]

$$\mu = \frac{g_m L^2}{C_{ox\text{GAA}} V_{DS}}, \quad g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_G}.$$

Численное значение подвижности основных носителей заряда получено как максимум функции $f = \mu(V_G)$.

На рис.8 представлены графики зависимости подвижности основных носителей заряда от напряжения на затворе для транзисторов, изготовленных по двум технологиям. Расчет подвижности выполнен при следующих значениях толщины подзатворного окисла: *t* ≈ 9 нм для MILC GAA-транзистора и t ≈ 6 нм для КНИ GAA-транзистора. Значение подвижности электронов в канале для MILC GAA-транзистора составляет порядка 130 см^2/В·с, для КНИ GAA-транзистора – порядка 200 см^2/В·с.

Основные электрофизические параметры *n*-канального транзистора GAA-типа, изготовленного по двум технологиям, представлены в таблице.

Основные электрофизические параметры MILC GAA- и КНИ GAA-транзисторов
The electrophysical parameters of MILC GAA and SOI GAA transistors

Параметр	MILC GAA-транзистор	КНИ GAA-транзистор
Пороговое напряжение *V*, В	0,1	0,4
Допороговый наклон *S*, мВ/декаду тока	70	60
Подвижность основных носителей заряда μ, $см^2/В·с$	130	200

Обсуждение результатов. Предложенный процесс металлостимулированной рекристаллизации нанопроволочных структур из *a*-Si с использованием $NiSi_2$ позволяет формировать на их основе каналы полевых транзисторов. Электрофизические параметры нанопроволочных MILC GAA- и КНИ GAA-транзисторов, приведенные в таблице, характеризуют структуру области проводящего канала полевого транзистора.

Разница в значениях порогового напряжения двух типов транзисторов в первую очередь связана с различиями концентрации акцепторов в области канала. Для MILC GAA-транзистора область канала – это нелегированные латерально ориентированные монокристаллы MILC-поликремния, для КНИ GAA-транзистора – монокристаллический кремний рабочего слоя КНИ-подложки, легированный бором с концентрацией $1·10^{15}$ $см^{-3}$. В результате пороговое напряжение КНИ GAA-транзистора увеличивается.

Разница в значениях допорогового наклона и подвижности основных носителей заряда в канале двух типов транзисторов в большей степени может быть связана с разницей в плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник – затворный оксид. Дополнительные поверхностные состояния на границе раздела рекристаллизованный аморфный кремний – затворный оксид, возникающие, вероятно, в том числе и из-за избыточных атомов никеля, попавших в канал в процессе рекристаллизации, увеличивают значение допорогового наклона MILC GAA-транзистора по сравнению с КНИ GAA-транзистором и снижают подвижность основных носителей заряда. Помимо этого, снижение подвижности в канале MILC GAA-транзистора может быть связано с количеством границ зерен латеральных монокристаллов, их ориентацией и структурным несовершенством.

Отметим, что полученные в работе значения подвижности и допорогового наклона нанопроволочных MILC GAA-транзисторов превышают параметры нанопроволочных КНИ MILC-транзисторов, изготовленных аналогичным «спейсерным» методом [1], более чем в 1,5 раза. Предположительно, такие результаты достигнуты за счет как геометрических особенностей затвора транзистора, так и месторасположения никелевой «затравки». Конструкция затвора MILC GAA-транзистора по сравнению с конструкцией транзистора MILC SiWs [1] обеспечивает преимущество по величине допорогового наклона и по подвижности основных носителей в канале многозатворного транзистора. Расположение никелевой затравки в области MILC-стока, возможно, уменьшает количество избыточных атомов никеля в нанопроволочном элементе, что приводит к улучшению структурного совершенства области канала MILC GAA-транзистора. При использовании метода MILC области никелевой затравки являются жертвенными и полностью удаляются из рабочих областей транзистора после окончания процесса рекристаллизации, в отличие от метода, приведенного в работе [1].

В свою очередь, для уменьшения значения допорогового наклона и увеличения подвижности основных носителей в канале MILC GAA-транзисторов необходима дальнейшая оптимизация процесса рекристаллизации. Для этого требуется провести

дополнительные исследования влияния геометрических размеров исходного слоя аморфного кремния, толщины и расположения островков «затравочного» никеля на свойства рекристаллзованной наноразмерной структуры и элементного состава нанопроволоки в области канала транзитора с помощью методов вторичной ионной масс-спектрометрии. Необходимо дополнительно исследовать зависимость электрофизических параметров MILC GAA-транзисторов от температурного бюджета формирования рекристаллизованных нанопроволочных элементов. Также провести исследование плотности поверхностных состояний на границе раздела рекристаллизованный аморфный кремний – затворный оксид в зависимости от режимных параметров формирования наноразмерных структур.

Для использования MILC GAA-транзисторов при изготовлении широкого спектра ИС необходимо снижение температурного бюджета метода MILC и сокращения количества циклов процесса формирования затворного оксида. Например, для улучшения электрофизических параметров нанопроволочных транзисторов следует использовать низкотемпературные high-k-диэлектрики и применять процесс кристаллизации с температурой не более 450 °C.

Заключение. Предложенный метод металлостимулированной латеральной рекристаллизации нанопроволочных структур из аморфного кремния с использованием силицида никеля позволяет формировать нанопроволочные MILC GAA-транзисторы с характеристиками, сравнимыми с монокремниевыми КНИ GAA-транзисторами.

Основными преимуществами предложенного MILC-метода являются экономичность и возможность применения его в различных областях наноэлектроники. Метод формирования MILC GAA-транзисторов легко интегрируется в технологию изготовления МОП ИС и при снижении температурного бюджета может быть использован для формирования ИС многоуровневой архитектуры. MILC-метод можно использовать как для создания чувствительных элементов сенсоров на поверхности уже изготовленных ИС («гетерогенная» технологии), так и при формировании различных элементов памяти и элементов МЭМС.

Литература

1. ***Borgne B.Le, Pichon L., Thomas M., Salaün A.C.*** Reduced bulk and surface states densities in metal induced crystallized polycrystalline silicon nanowires // Physica Status Solidi (a). 2016. Vol. 213. No. 11. P. 2890–2894.

2. ***Li G., Zohar Y., Wong M.*** Piezoresistive microphone with integrated amplifier realized using metal-induced laterally crystallized polycrystalline silicon // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2004. Vol. 14. No. 10. P. 1352–1358.

3. ***Chan V.W.C., Chan P.C.H., Chan M.*** Multiple layers of CMOS integrated circuits using recrystallized silicon film // IEEE Electron Device Letters. 2001. Vol. 22. No. 2. P. 77–79.

4. ***Cheng C.F., Poon M.C., Kok C.W., Chan M.*** Modeling of metal-induced-lateral-crystallization mechanism for optimization of high performance thin-film-transistor fabrication // Digest. International Electron Devices Meeting. IEEE. 2002. P. 569–572.

5. Polycrystalline silicon produced by Ni–silicide mediated crystallization of amorphous silicon in an electric field / ***J. Jang, S.J. Park, K.H. Kim, et al.*** // Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 88. No. 5. P. 3099–3101.

6. ***Jang J.*** Super-grain poly-Si by metal induced crystallization of amorphous silicon // Solid State Phenomena. Trans Tech Publications. 2003. Vol. 93. P. 199–206.

7. Nickel induced crystallization of amorphous silicon thin films / ***Z. Jin, A.Bhat Gururaj, M. Yeung et al.*** // Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 84. No. 1. P. 194–200.

8. FinFETs and other multi-gate transistors / ***Ed. by J.P. Colinge.*** N.Y.: Springer, 2008. Vol. 73. 350 p.

9. ***Кузнецов Е.В., Рыбачек Е.Н.*** Способ изготовления наноразмерных проволочных кремниевых структур // Патент России № 2435730. 2010.

10. ***Bauza D., Ghibaudo G.*** MOSFET parameter extraction from static, dynamic and transient current measurements // Microelectronics Journal. 1994. Vol. 25. No. 1. P. 41–61.

11. ***Huang Y., Duan X., Cui Y., Lieber C.M.*** Gallium nitride nanowire nanodevices // Nano Letters. 2002. Vol. 2. No. 2. C. 101–104.

12. ***Keem K., Jeong D.Y., Kim S.*** Fabrication and device characterization of omega-shaped-gate ZnO nanowire field-effect transistors // Nano Letters. 2006. Vol. 6. No. 7. P. 1454–1458.

Поступила в редакцию 08.08.2019 г.; после доработки 15.11.2019 г.; принята к публикации 19.11.2019 г.

Белостоцкая Светлана Олеговна – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), S.Belostotskaya@tcen.ru

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

Рыбачек Елена Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), REN@tcen.ru

Губанова Оксана Вадимовна – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективной элементной базы и технологических маршрутов микроэлектроники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), O.Chuyko@tcen.ru

References

1. Borgne B.Le, Pichon L., Thomas M., Salaün A.C. Reduced bulk and surface states densities in metal induced crystallized polycrystalline silicon nanowires. *Physica Status Solidi (a),* 2016, vol. 213, no. 11, pp. 2890–2894.

2. Li G., Zohar Y., Wong M. Piezoresistive microphone with integrated amplifier realized using metal-induced laterally crystallized polycrystalline silicon. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 14, no. 10, pp. 1352–1358.

3. Chan V.W.C., Chan P.C.H., Chan M. Multiple layers of CMOS integrated circuits using recrystallized silicon film. *IEEE Electron Device Letters*, 2001, vol. 22, no. 2, pp. 77–79.

4. Cheng C.F., Poon M.C., Kok C.W., Chan M. Modeling of metal-induced-lateral-crystallization mechanism for optimization of high performance thin-film-transistor fabrication. *Digest. International Electron Devices Meeting. IEEE*, 2002, pp. 569–572.

5. Jang J., Park S.J., Kim K.H. et al. Polycrystalline silicon produced by Ni–silicide mediated crystallization of amorphous silicon in an electric field. *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 5, pp. 3099–3101.

6. Jang J. Super-grain poly-Si by metal induced crystallization of amorphous silicon. *Solid State Phenomena*, 2003, vol. 93, pp. 199–206.

7. Jin Z., Gururaj A. Bhat, Yeung M. et al. Nickel induced crystallization of amorphous silicon thin films. *Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 84, no. 1, pp. 194–200.

8. *FinFETs and other multi-gate transistors*. Ed. by Colinge J.P. N.Y., Springer, 2008, vol. 73. 350 p.

9. Kuznetsov E.V., Rybachek E.N. *A metod of production nanoscale silicon wire structures.* Patent of Russia, no. 2435730. 2010. (in Russian).

10. Bauza D., Ghibaudo G. MOSFET parameter extraction from static, dynamic and transient current measurements. *Microelectronics journal*, 1994, vol. 25, no. 1, pp. 41–61.

11. Huang Y., Duan X., Cui Y., Lieber C.M. Gallium nitride nanowire nanodevices. *Nano Letters*, 2002, vol. 2, no. 2, pp. 101–104.

12. Keem K., Jeong D.Y., Kim S. Fabrication and device characterization of omega-shaped-gate ZnO nanowire field-effect transistors. *Nano Letters*, 2006, vol. 6, no. 7, pp. 1454–1458.

Received 08.08.2019; Revised 15.11.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the authors:

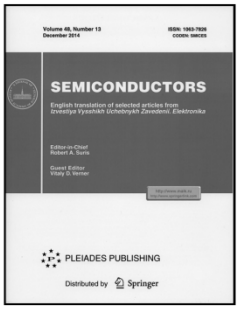
Svetlana O. Belostotskaya – Senior Scientific Researcher of the TC's laboratory, SMS «Technological Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), S.Belostotskaya@ tcen.ru

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

Elena N. Rybachek – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the TC's laboratory, SMS «Technological Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), REN@ tcen.ru

Oksana V. Gubanova – Scientific Researcher of the TC's laboratory, SMC «Technological Center» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), O.Chuyko@tcen.ru

Уважаемые авторы и читатели!





Вышли в свет журналы

SEMICONDUCTORS

Vol. 53, *No.* 15, 2019. - ISSN PRINT: 1063-7826, ISSN ONLINE: 1090-6479,

RUSSIAN MICROELECTRONICS

Vol. 48, *No.* 7, 2019. - ISSN PRINT: 1063-7397, ISSN ONLINE: 1608-3415,

в которых опубликованы избранные статьи журнала «Известия вузов. Электроника».

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

УДК 621.382:621.357.8 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-31-39

Исследование процесса электрохимического стоп-травления кремния при изготовлении кантилеверов

А.В. Новак[1,2], В.Р. Новак[3]

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

novak-andrei@mail.ru

Анизотропное травление в растворе гидроксида калия с электрохимической остановкой широко применяется при формировании тонких кремниевых мембран чувствительных элементов в различных микроэлектромеханических устройствах. Однако данные об исследовании электрохимического стоп-травления для *p*–*n*-переходов, сформированных на рельефной поверхности кремния, практически отсутствуют. В работе изучен процесс электрохимического стоп-травления в растворе гидроксида калия для структур с применением слоев кремния *n*-типа, сформированных методом диффузии на кремниевых подложках *p*-типа с гладкой и рельефной поверхностью. Обнаружено, что при использовании двухэлектродной схемы с подачей на *n*-слой положительного (относительно раствора) напряжения для структуры с *n*-слоем, сформированным на гладкой поверхности, остановка травления происходит на границе *p*–*n*-перехода. В результате удалось сформировать мембрану достаточно однородную по толщине на всей площади пластины. При использовании двухэлектродной схемы для структуры с рельефной поверхностью при травлении плотность тока в 70–100 раз больше, чем в случае гладкой поверхности, травление неоднородно по пластине и останавливается задолго до достижения *p*–*n*-перехода. Найдено, что для структуры с рельефной поверхностью при использовании схемы с двумя источниками напряжения и дополнительной подачей на *p*-подложку отрицательного (относительно раствора) напряжения около –2,0 В остановка травления происходит на границе *p*–*n*-перехода. И в этом случае получена кремниевая мембрана достаточно однородная по толщине на всей площади пластины. Получены зависимости плотности тока между *n*-слоем кремния и раствором от времени травления для структур с гладкой и рельефной поверхностями, которые позволяют определять окончание процесса травления.

Ключевые слова: анизотропное травление в KOH; электрохимическое стоп-травление; мембрана; кантилевер

Для цитирования: Новак А.В., Новак В.Р. Исследование процесса электрохимического стоп-травления кремния при изготовлении кантилеверов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 31–39. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-31-39

© А.В. Новак, В.Р. Новак, 2020

Investigation of Electrochemical Stop-Etching Process of Silicon at Cantilevers Fabrication

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

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

novak-andrei@mail.ru

Abstract: Anisotropic etching in KOH solution with electrochemical stopping is commonly used in formation of thin silicon membranes of sensitive elements in various MEMS devices. However, the data of investigating the process of electrochemical stop-etching of elements in various MEMS devices are absent. In the work the process of electrochemical stop etching in KOH solution for structures using the n-type silicon layers, formed by diffusion on the *p*-type silicon substrate with a smooth and relief surface, has been studied. It has been studied that when using a 2-electrode circuit with positive (relative to the solution) voltage, applied to an n-layer, for a structure with an n-layer, formed on a smooth surface, the etching stops at the *pn*-junction boundary and as the result, a membrane forms, uniform in thickness over the entire area of the plate. When using a 2-electrode circuit for a structure with a relief surface during etching the current density J_n is 70–100 times greater than in the case of a smooth surface, the etching is non-uniform across the plate and stops long before reaching the *pn*-junction. It has been found that for a structure with a relief surface when using a circuit with two voltage sources, with an additional negative (relative to the solution) voltage, applied to the p-substrate at $U_p \approx -2.0$ V, the etching stops at the *pn*-junction interface, and as the result, it is possible to obtain silicon membrane, fairly uniform in thickness over the entire area of the plate. The dependences of the current density J_n (between the *n*-layer of silicon and the solution) on the etching time *t* have been obtained for the structures with a smooth and relief surface, which makes it possible to determine the end of the etching process.

Keywords: anisotropic etching in KOH; electrochemical stop etching; membrane; cantilever

For citation: Novak A.V., Novak V.R. Investigation of electrochemical stop-etching process of silicon at cantilevers fabrication. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 31–39. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-31-39

Введение. Анизотропное жидкостное травление кремния в растворах гидроксида калия (KOH), тетраметиламмония (TMAH) и этилендиамина (EDP) широко используется в традиционной кремниевой технологии [1–3], в частности при изготовлении различных элементов микроэлектромеханических систем, например чувствительных элементов датчиков давления и ускорения, кантилеверов, микрозеркал и др. Для формирования тонких кремниевых мембран чувствительных элементов используются различные методы анизотропного стоп-травления, такие как стоп-травление с использованием областей, сильно легированных бором (борное стоп-травление) [4–7], и электрохимическое стоп-травление при достижении *p*–*n*-перехода [5–15].

Технология борного стоп-травления основана на селективности травителей для кремния с различной степенью легирования. Например, скорость травления в растворах KOH, TMAH и EDP снижается на порядок при концентрациях бора, превышающих примерно 10^{20} $см^{-3}$ [4]. Однако такая большая концентрация является недостатком, когда требуется сформировать различные электронные устройства [5]. Также большие концентрации бора вносят значительные растягивающие механические напряжения в кремний [5, 6].

Электрохимическое стоп-травление основано на остановке процесса травления в области *p*–*n*-перехода при приложении положительного (относительно травящего раствора KOH или TMAH) потенциала анодной пассивации на слой *n*-типа, сформированный на подложке кремния *p*-типа. В отличие от борного электрохимическое стоп-травление не требует такой большой степени легирования для *n*-слоя (согласно [8, 10] достаточно порядка 10^{15} $см^{-3}$), и можно формировать различные активные структуры в *n*-слое. Основная сложность электрохимического стоп-травления состоит в том, что наличие различных точечных дефектов и токов утечки в области *p*–*n*-перехода может вызывать повышение потенциала пассивации кремния *p*-типа и приводить к прекращению травления кремния *p*-типа задолго до достижения *p*–*n*-перехода. Для решения данной проблемы используются различные схемы подключения [8, 11, 15], в которых к двум рабочим электродам к эпитаксиальному *n*-слою и травящему раствору добавляется электрод к *p*-слою кремния, чтобы контролировать его потенциал.

В большинстве работ [5, 7–10, 15] изучен процесс электрохимического стоп-травления для структур, в которых *n*-слой сформирован методом эпитаксии на пластины кремния *p*-типа (КДБ), и только в некоторых работах [11–13] рассмотрены структуры, в которых *n*-слой сформирован методом диффузии фосфора в подложку кремния *p*-типа. В то же время посредством диффузии фосфора можно изготавливать *p*–*n*-структуры с разной глубиной залегания и различной толщиной в отличие от эпитаксиальных структур, в которых *n*-слой имеет одинаковую толщину. Кроме того, опубликованные данные об используемых схемах подключения неполные, в частности часто не приводятся временные зависимости тока между кремнием *n*-типа и раствором, из которых обычно определяют завершение процесса стоп-травления при достижении *p*–*n*-перехода. Также данные об исследовании процесса электрохимического стоп-травления для *p*–*n*-переходов, сформированных на рельефной поверхности кремния, практически отсутствуют.

Цель настоящей работы – изучение процесса электрохимического стоп-травления структур, содержащих сформированный диффузией фосфора *n*-слой кремния, для изготовления мембраны (балки) кремниевых кантилеверов.

Методика эксперимента. Для изучения процесса электрохимического стоп-травления в KOH использовали два типа кремниевых пластин КДБ 12 с ориентацией (100), диаметром 150 мм и толщиной 500 мкм. Первый тип – пластины с исходно гладкой плоской поверхностью. В этом случае лицевая сторона, на которой сформирован *n*-слой, имеет достаточно гладкую поверхность. Второй тип – пластины с лицевой рельефной поверхностью. Перед формированием *n*-слоя на рельефной поверхности посредством процесса анизотропного травления в высококонцентрированном водном растворе KOH сформированы иглы кантилеверов высотой 13–15 мкм и другие локальные рельефные элементы. Диффузию фосфора проводили на лицевой стороне пластины при температуре 950 °C в течение 60 мин. После диффузии для разгонки фосфора на глубину 5–6 мкм пластины отжигали при температуре 1 100 °C в атмосфере азота (N_2) в течение 5 ч. Глубину залегания *p*–*n*-перехода определяли по контрольным пластинам методом шар-шлифа. Далее на обратной стороне пластин формировали маску в виде окон

размером примерно 3×5 мм из нитрида кремния (Si_3N_4), полученного методом химического парофазного осаждения при низком давлении (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD). Омические контакты к *n*- и *p*-слою кремния формировали магнетронным напылением алюминия. Для защиты лицевой стороны пластин при электрохимическом травлении в KOH применяли герметичную кассету из фторопласта и вакуумной резины.

Электрохимическое травление пластин проводили в 30%-ном водном растворе KOH при температуре 70 °C. При данных параметрах скорость травления кремния в направлении <100> составляет приблизительно 44 мкм/ч. Электрохимическое травление осуществляли по двум схемам подключения (рис.1). В схеме 1 использован один источник напряжения с двумя электродами, где рабочие электроды подключены к *n*-слою и раствору для травления [8, 10–13] (рис.1,*а*). В схеме 2 использованы два источника напряжения и добавлен рабочий электрод к травящемуся *p*-слою кремния для контроля его потенциала [8, 11] (рис.1,*б*). В схеме 1 к *n*-слою приложено положительное напряжение относительно раствора для травления, необходимое для анодной пассивации, в схеме 2, помимо положительного смещения к *n*-слою, к травящейся подложке *p*-типа приложено отрицательное напряжение относительно раствора. В процессе травления измеряли временную зависимость тока I_n, протекающего между слоем кремния *n*-типа и электродом, находящимся в растворе KOH. Из временной зависимости тока I_n определяли момент завершения процесса стоп-травления. Для полученных образцов мембран со сформированными на лицевой стороне иглами далее вытравливали в KOH балки кантилеверов.

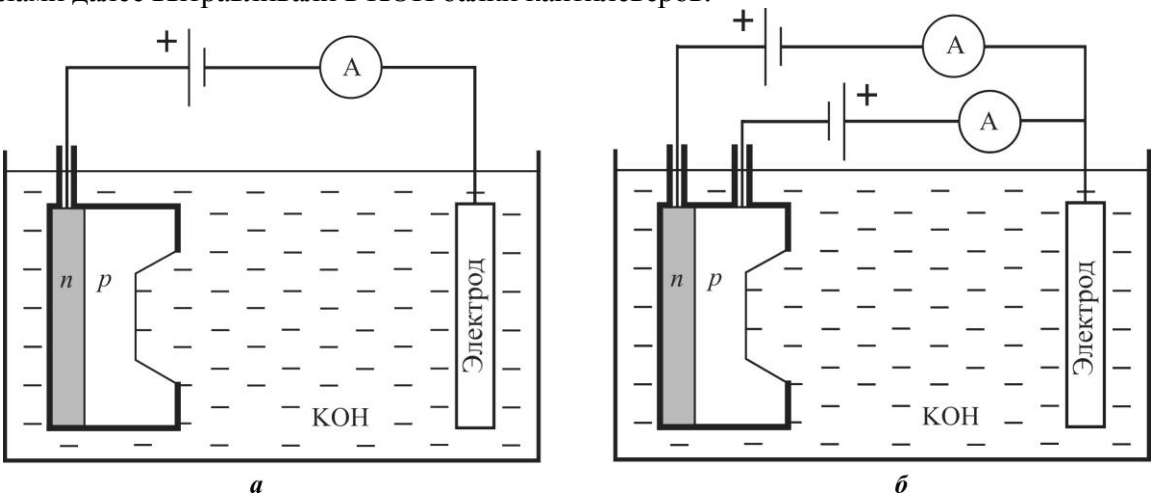


Рис.1. Схемы подключения для электрохимического травления: *а* – двухэлектродная схема с одним источником напряжения; *б* – схема с добавленным электродом к *p*-слою и двумя источниками напряжения

Fig.1. Schematic diagrams of the used connection schemes for electrochemical etching: *a* – two-electrode circuit with one voltage source; *b* – with an added electrode to the p-layer, with two voltage sources

Изготовленные кремниевые мембраны и геометрические характеристики кантилеверов измеряли с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ), толщину мембран определяли из РЭМ-изображений на сколе.

Результаты и их обсуждение. Механизм процесса электрохимического травления для кремния *n*- и *p*-типа существенно меняется в зависимости от напряжения, прикладываемого к кремнию, и, соответственно, на измеряемых ВАХ наблюдаются характерные участки. На рис.2 приведена типичная ВАХ, полученная для кремния *p*-типа с концентрацией 10^{15} см$^{-3}$ в процессе электрохимического травления в 30%-ном растворе KOH при температуре 70 °C. Из рисунка видно, что при напряжении, превышающем потенциал открытой

цепи $U_{ocp} \approx -0{,}4$ В, плотность тока возрастает до максимального значения $J = 2{,}51$ мА/см^2 при потенциале анодной пассивации $U_{pp} \approx 0{,}7$ В и далее резко падает до значений $J \approx 173$ мкА/см^2. Здесь U_{ocp} определяется как потенциал, при котором $J = 0$. При напряжении, превышающем потенциал анодной пассивации $U_{pp} \approx 0{,}7$ В, идет пассивация с образованием оксида на поверхности кремния *p*-типа и процесс травления останавливается, а при напряжениях менее $U_{pp} \approx 0{,}7$ В кремний травится.

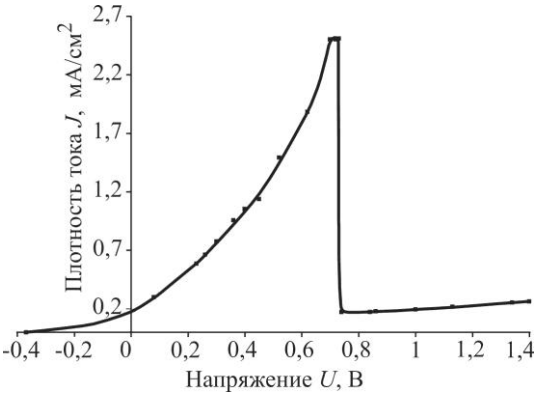


Рис.2. ВАХ кремния *p*-типа при электрохимическом травлении в 30%-ном растворе KOH
Fig.2. Current-voltage characteristic of *p*-type silicon during electrochemical etching in a 30% KOH solution

Электрохимические ВАХ для кремния *n*- и *p*-типа различаются тем, что для кремния *n*-типа потенциал анодной пассивации U_{pp} сдвинут относительно того же потенциала для кремния *p*-типа в сторону меньших напряжений [7, 12]. Это означает, что при подаче напряжения между значениями пассивирующих потенциалов для *n*- и *p*-типа в случае образца *p*-типа будет происходить процесс травления, а в случае *n*-типа не будет. Данный селективный допинг-эффект используется для остановки травления. Более того, в работах [12, 14] сообщается о том, что потенциал анодной пассивации U_{pp} сильно зависит от концентрации примеси в кремнии *n*-типа, повышение концентрации приводит к катодному сдвигу ВАХ (в сторону отрицательных напряжений) и остановка травления происходит при более отрицательном потенциале. Это означает, что не только для двухслойных структур n^+/p, но и для двухслойных структур n^+/n приложенное напряжение U_{pp} будет пассивировать n^+-слой, тогда как травление кремния *n*-типа будет продолжаться.

При травлении структур с гладкой поверхностью по схеме 1 к *n*-слою прикладывали напряжение $U_n = +1{,}0$ В относительно травящего раствора KOH, что соответствует включению по схеме обратносмещенного *p*–*n*-перехода, и фиксировали ток I_n между слоем кремния *n*-типа и электродом, находящимся в растворе KOH. Время травления кремния *p*-типа толщиной 500 мкм составляет примерно 11 ч. На рис.3 приведены полученные зависимости плотности тока J_n от времени травления *t*.

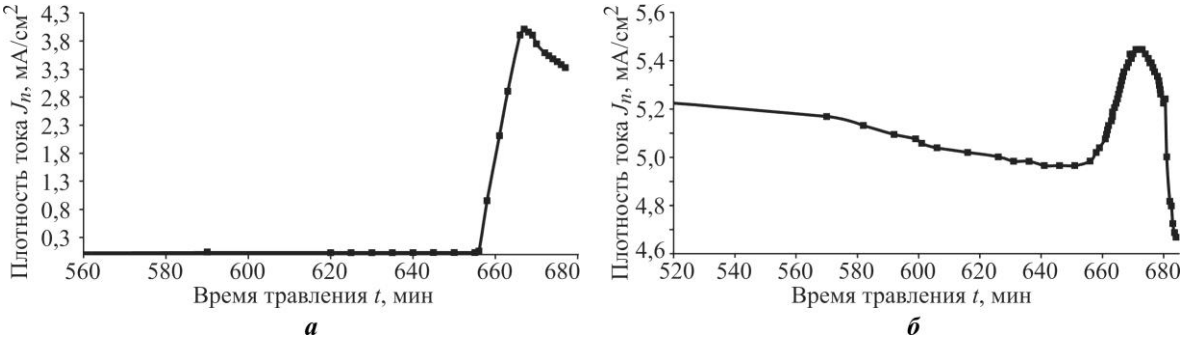
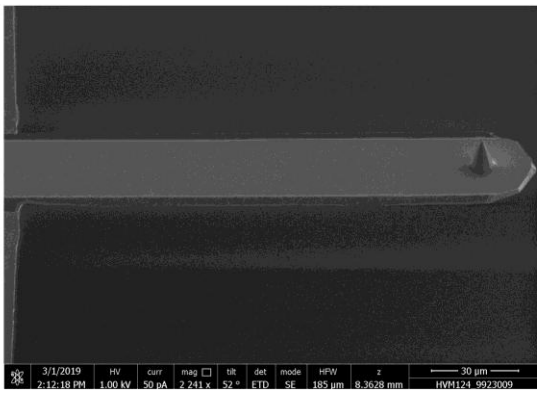


Рис.3. Зависимость плотности тока J_n между *n*-слоем кремния и электродом в растворе KOH от времени травления *t*: *а* – структура с гладкой поверхностью при травлении по двухэлектродной схеме с одним источником напряжения; *б* – структура с рельефной поверхностью при травлении с добавленным электродом к *p*-слою и двумя источниками напряжения
Fig.3. The dependence of the current density J_n between the *n*-layer of silicon and the electrode in a KOH solution for etching schemes: *a* – according to a two-electrode scheme with one voltage source (for a structure with a smooth surface); *b* – with an added electrode to the *p*-layer, with two voltage sources (for a structure with a relief surface)

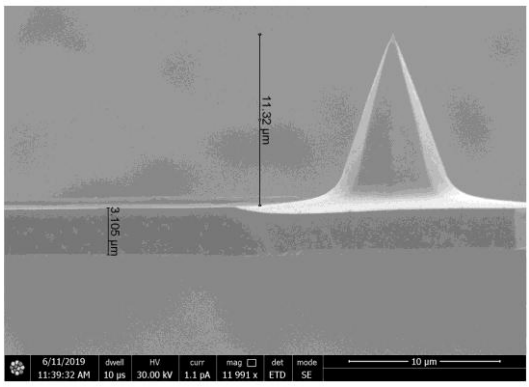
Для структуры с гладкой поверхностью при травлении *p*-подложки плотность тока $J_n \approx 20–30$ мкА/см^2, а в момент протрава подложки *p*-типа, когда раствор КОН начинает контактировать с *n*-слоем, плотность тока резко возрастает до максимальных значений $J_n \approx 4{,}0$ мА/см^2 (рис.3,*а*). Далее происходит окисление поверхности и травление кремния останавливается, плотность тока при этом уменьшается. Использование схемы 1 для структур с *n*-слоем, сформированным на гладкой поверхности, позволяет изготавливать достаточно однородные на всей площади пластины кремниевые мембраны толщиной приблизительно 6 мкм (рис.4,*а*).



а



б



в

Рис.4. РЭМ-изображения изготовленных структур: *а* – мембрана для структуры с гладкой поверхностью при использовании двухэлектродной схемы с одним источником напряжения; *б*, *в* – кантилевер, изготовленный на основе структуры с рельефной поверхностью при использовании схемы с добавленным электродом к *p*-слою и двумя источниками напряжения

Fig.4. SEM images of fabricated structures: *a* – a membrane obtained for a structure with a smooth surface using a two-electrode circuit with a single voltage source; *b*, *c* – a cantilever made on the basis of a structure with a relief surface using a circuit with an added electrode to the *p*-layer, with two voltage sources

Для структур со сформированными на лицевой стороне иглами, т.е. с большим перепадом высот рельефа, использование схемы 1 не позволяет получить удовлетворительных результатов. При подаче на *n*-слой кремния напряжения $U_n = +1{,}0$ В (аналогично образцу с гладкой поверхностью) происходит остановка травления кремния *p*-типа. При уменьшении подаваемого напряжения до значений $U_n \approx 0{,}5...0{,}6$ В процесс травления возобновляется. Однако в данном случае при травлении плотность тока $J_n \approx 2{,}0$ мА/см^2, что в 70–100 раз больше плотности тока при травлении образцов с гладкой поверхностью. Процесс травления происходит неоднородно по площади пластины, наблюдается большая неравномерность по толщине мембраны, которая в центре пластины тоньше, а по краям толще. Толщина полученных мембран больше 6 мкм, т.е. остановка травления происходит задолго до получения *p*–*n*-перехода. Это обусловлено тем, что в случае рельефной поверхности, согласно [11], плотность тока (как тока обратно включенного *p*–*n*-перехода, так и тока утечки) намного выше в углах и острых

краях из-за увеличения электрического поля. Соответственно, это увеличение плотности тока может приводить к пассивации травящегося кремния *p*-типа.

Для устранения пассивации *p*-слоя кремния к нему добавлен электрод, на который подавали отрицательное (относительно раствора) напряжение $U_p = -2{,}0$ В согласно схеме 2. При этом на *n*-слой подавали положительное напряжение $U_n = 0{,}5...0{,}6$ В. В процессе травления по схеме 2 так же наблюдается высокая плотность тока J_n (в 170–250 раз больше по сравнению с плотностью тока образцов с гладкой поверхностью), которая незначительно снижается с $J_n \approx 5{,}30$ мА/см^2 в начале процесса травления до $J_n \approx 4{,}96$ мА/см^2 после 10 ч травления (рис.3,*б*). В момент протрава подложки кремния *p*-типа происходит резкое возрастание плотности тока до $J_n \approx 5{,}45$ мА/см^2 с последующим его снижением до 4,67 мА/см^2 приблизительно в течение 30 мин, как и для образцов с исходно гладкой поверхностью. Для структур с рельефной поверхностью полученные кремниевые мембраны при использовании схемы 2 имеют достаточно однородную толщину (приблизительно 6 мкм) на всей площади пластины.

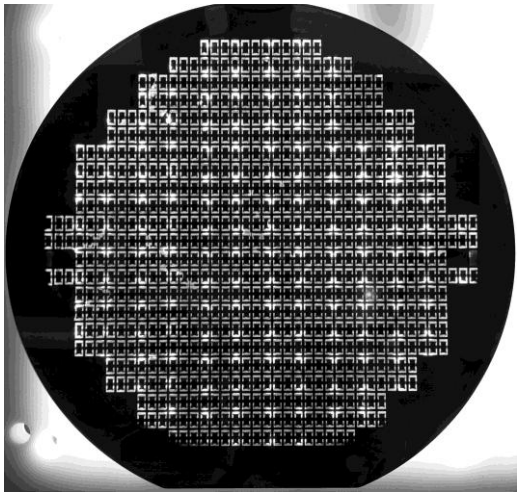


Рис.5. Кремниевая пластина для структуры с рельефной поверхностью со сформированными мембранами, подсвеченная с обратной стороны
Fig.5. Photograph of a silicon wafer for a structure with a relief surface with formed membranes, which is highlighted on the back side

На рис.5 представлена фотография кремниевой пластины для структуры с рельефной поверхностью со сформированными мембранами, полученными по схеме 2, которая подсвечена с обратной стороны. Кремниевые мембраны толщиной менее 22 мкм являются оптически проницаемыми и имеют различные оттенки коричневого в зависимости от их толщины. Далее из полученных мембран формировали балки кантилеверов. Для этого на лицевой стороне мембран заранее изготавливали маску из SiO_2 для балок кантилеверов, и в процессе их формирования проводили травление с обеих сторон мембраны. В результате толщина балок получается примерно в два раза меньше толщины мембраны. На рис.4,*б*,*в* показаны РЭМ-изображения кремниевого кантилевера с толщиной балки приблизительно 3 мкм, длиной примерно 170 мкм и резонансной частотой около 170 кГц.

Заключение. При изготовлении мембраны в процессе электрохимического стоп-травления в KOH структур, содержащих сформированный *n*-слой кремния диффузией фосфора, обнаружено следующее. При использовании двухэлектродной схемы с одним источником напряжения для структур с *n*-слоем, сформированным на гладкой поверхности, остановка травления происходит на самой границе *p*–*n*-перехода. В результате удается получить кремниевую мембрану достаточно однородную по толщине на всей площади пластины. Однако при использовании двухэлектродной схемы для структур с *n*-слоем, сформированным на рельефной поверхности, травление происходит неоднородно по площади пластины и останавливается задолго до достижения *p*–*n*-перехода. В этом случае не удается получить однородную по толщине кремниевую мембрану. Для структур с *n*-слоем, сформированным на рельефной поверхности, при использовании схемы с двумя источниками напряжения и подачей отрицательного напряжения $U_p \approx -2{,}0$ В (относительно раствора KOH) через дополнительный электрод к подложке *p*-типа остановка травления происходит на границе *p*–*n*-перехода. И в этом случае уда-

ется получить кремниевую мембрану достаточно однородную по толщине на всей площади пластины.

Полученные зависимости плотности тока между *n*-слоем кремния и раствором от времени травления позволяют определить окончание процесса травления. Временные зависимости плотности тока в процессе травления похожи для рассмотренных структур. Однако плотность тока в начале процесса травления для образцов с рельефной поверхностью в 170–250 раз больше плотности тока для образцов с гладкой поверхностью.

Разработанный процесс электрохимического стоп-травления в KOH позволил изготовить кремниевые мембраны толщиной 6–6,5 мкм, из которых сформированы балки кремниевых кантилеверов.

Литература

1. ***Prem Pal, Kazuo Sato.*** A comprehensive review on convex and concave corners in silicon bulk micromachining based on anisotropic wet chemical etching // Micro and Nano Systems Letters. 2015. Vol. 3. No. 6. P. 1–42.

2. ***Li-Sheng Hsu, Shu-Wei Tung, Che-Hsi Kuo, Yao-Joe Yang.*** Developing barbed microtip-based electrode arrays for biopotential measurement // Sensors. 2014. Vol. 14. P. 12370–12386.

3. ***Jia-dong Li, Jie Xie, Wei Xue, Dong-min Wu.*** Fabrication of cantilever with self-sharpening nano-silicon-tip for AFM applications // Microsyst. Technol. 2013. Vol. 19. P. 285–290.

4. ***Seidel H., Csepregi L., Heuberger A., Baumgaertel H.*** Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions. II. Influence of dopants // J. Electrochem. Soc. 1990. Vol. 137. P. 3626–3632.

5. ***Scoff D. Collins.*** Etch stop techniques for micromachining // J. Electrochem. Soc. 1997. Vol. 144. No. 6. P. 2242–2262.

6. ***Prem Pal, Kazuo Sato.*** Silicon wet bulk micromachining for MEMS // Singapore. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017. P. 412.

7. ***Smith R.L., Kloeck B., De Rooij N., Collins S.D.*** The potential dependence of silicon anisotropic etching in KOH at 60 °C // J. Electroanal. Chem. 1987. Vol. 238. P. 103–113.

8. ***Ben Kloeck, Scott D. Collins, Nico F. De Rooij, Rosemary L. Smith.*** Study of electrochemical etch-stop for high-precision thickness control of silicon membranes // IEEE Transactions on Electron Devices. 1989. Vol. 36. No. 4. P. 663–669.

9. ***Connolly E.J., French P.J., Xia X.H., Kelly J.J.*** Galvanic etch stop for Si in KOH // J. Micromech. Microeng. 2004. Vol. 14. P. 1215–1219.

10. ***Иващенко Е. И., Цветков Ю. Б***. Метод размерного стоп-травления кремния в производстве изделий микромеханики // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 16–20.

11. ***Wallman L., Bengtsson J., Danielsen N., Laurell T.*** Electrochemical etch-stop technique for silicon membranes with p- and n-type regions and its application to neural sieve electrodes // J. Micromech. Microeng. 2002. Vol. 12. P. 265–270.

12. ***Linden Y., Tenerz L., Tiren J., Hok B.*** Fabrication of three-dimensional silicon structures by means of doping-selective etching (DSE) // Sensors and Actuators. 1989. Vol. 16. P. 67–82.

13. ***Eichner D., Von Miinch W.*** A two-step electrochemical etch-stop to produce freestanding bulk-micromachined structures // Sensors and Actuators A: Physical. 1997. Vol. 60. P. 103–107.

14. ***Palik E.D., Bermudez V.M., Glembocki O.J.*** Ellipsometric study of the etch-stop mechanism in heavily doped silicon // Journal of the Electrochemical Society. 1985. Vol. 132. P. 135–141.

15. Modelling of the electrochemical etch stop with high reverse bias across pn-junctions / ***R. Szwarc, L. Frey, H. Weber et al.*** // 26th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC). 2015. P. 445–450.

Поступила в редакцию 31.08.2019 г.; после доработки 31.08.2019 г.; принята к публикации 19.11.2019 г.

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

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

References

1. Prem Pal, Kazuo Sato. A comprehensive review on convex and concave corners in silicon bulk micromachining based on anisotropic wet chemical etching. *Micro and Nano Systems Letters*, 2015, vol. 3, no. 6, pp. 1–42.

2. Li-Sheng Hsu, Shu-Wei Tung, Che-Hsi Kuo, Yao-Joe Yang. Developing barbed microtip-based electrode arrays for biopotential measurement. *Sensors*, 2014, vol. 14, pp.12370–12386.

3. Jia-dong Li, Jie Xie, Wei Xue, Dong-min Wu. Fabrication of cantilever with self-sharpening nano-silicon-tip for AFM applications. *Microsyst Technol*, 2013, vol. 19, pp. 285–290.

4. Seidel H., Csepregi L., Heuberger A., Baumgaertel H. Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions. II. Influence of dopants. *J. Electrochem. Soc*., 1990, vol. 137, pp. 3626–3632.

5. Scoff D. Collins. Etch stop techniques for micromachining. *J. Electrochem. Soc.*, 1997, vol. 144, no. 6, pp. 2242–2262.

6. Prem Pal, Kazuo Sato. *Silicon Wet Bulk Micromachining for MEMS*. Singapore, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017. 412 p.

7. Smith R.L., Kloeck B., Rooij N.De, Collins S.D. The potential dependence of silicon anisotropic etching in KOH at 60°C. *J. Electroanal. Chem*., 1987, vol. 238, pp. 103–113.

8. Ben Kloeck, Scott D. Collins, Nico F. De Rooij, Rosemary L. Smith. Study of Electrochemical Etch-Stop for High-Precision Thickness Control of Silicon Membranes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1989, vol. 36, no. 4, pp. 663–669.

9. Connolly E.J., French P.J., Xia X.H., Kelly J.J. Galvanic etch stop for Si in KOH. *J. Micromech. Microeng*, 2004, vol. 14, pp.1215–1219.

10. Ivaschenko E., Tsvetkov Yu. The method of the dimensional stop-etching of the silicon in the micromechanical product's manufacture. *Mikrosistemnaya tekhnika = Microsystems Engineering*, 2000, no. 1, pp. 16–20. (in Russian).

11. Wallman L., Bengtsson J., Danielsen N., Laurell T. Electrochemical etch-stop technique for silicon membranes with p- and n-type regions and its application to neural sieve electrodes. *J. Micromech. Microeng.*, 2002, vol. 12, pp. 265–270.

12. Linden Y., Tenerz L., Tiren J., Hok B. Fabrication of three-dimensional silicon structures by means of doping-selective etching (DSE). *Sensors and Actuators*, 1989, vol. 16, pp. 67–82.

13. Eichner D., von Miinch W. A two-step electrochemical etch-stop to produce freestanding bulk-micromachined structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, vol. 60, pp.103–107.

14. Palik E.D., Bermudez V.M., Glembocki O.J. Ellipsometric study of the etch-stop mechanism in heavily doped silicon. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, vol. 132, pp.135–141.

15. Szwarc R., Frey L., Weber H., Moder I., Erlbacher T., Rommel M., Bauer A.J. Modelling of the electrochemical etch stop with high reverse bias across pn-junctions. *26th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC)*, 2015, pp. 445–450.

Received 31.08.2019; Revised 31.08.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the authors:

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

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

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 621.382.32 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-40-47**

SPICE-модели JFET и MOSFET в широком диапазоне температур

М.Р. Исмаил-Заде

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

mismailzade@hse.ru

Схемотехническое проектирование электронных устройств для жестких условий эксплуатации требует наличия SPICE-моделей электронных компонентов, учитывающих влияние сверхнизкой и сверхвысокой температуры окружающей среды. Однако стандартные SPICE-модели компонентов в коммерческих версиях SPICE-подобных симуляторов обеспечивают достаточную точность в ограниченном температурном диапазоне (–60…+150 °C) и не могут применяться для расчета электронных схем в диапазоне температур от сверхнизких до сверхвысоких. В работе представлены модифицированные Low-T и High-T SPICE-модели полевых транзисторов со структурой MOSFET и JFET, предназначенные для расчета электронных схем в диапазоне температур от сверхнизких до сверхвысоких (–200…+300 °C). Все модели построены с использованием универсального подхода, который заключается в добавлении в базовую SPICE-модель приборов дополнительных выражений для температурно-зависимых параметров модели. Разработана процедура экстракции параметров SPICE-моделей на основе результатов измерений или TCAD-моделирования стандартного набора ВАХ и ВФХ в широком диапазоне температур. Погрешность описания статических ВАХ MOSFET- и JFET-транзисторов не превышает 10–12 % в диапазоне температур –200...+300 °C.

Ключевые слова: экстремальная электроника; низкая температура; высокая температура; MOSFET- и JFET-транзисторы; компактные SPICE-модели; SPICE-моделирование; экстракция параметров модели

Финансирование работы: работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ (грант № ТЗ-99) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00898-А).

Для цитирования: Исмаил-Заде М.Р. SPICE-модели JFET и MOSFET в широком диапазоне температур // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 40–47. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-40-47

© М.Р. Исмаил-Заде, 2020

JFET and MOSFET Spice Models in Wide Temperature Range

M.R. Ismail-Zade

National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

mismailzade@hse.ru

Abstract: The circuit design of electronic devices for harsh operating conditions requires SPICE models of electronic components that take into account the influence of ultra-low and ultra-high ambient temperatures. However, the standard SPICE models of electronics component, available in commercial versions of SPICE-like simulators, provide an adequate accuracy in a limited temperature range (–60 … +150 °C) and can not be used to calculate the electronic circuits in the ultra-low/high temperature range. This paper presents the modified Low-T and High-T SPICE models of transistors with the MOSFET and JFET structure, designed to calculate the electronic circuits in the temperature range from –200 °C to +300 °C. All models have been built using a universal approach, which consists in adding additional expressions for temperature-dependent parameters to the standard devices SPICE-model. The procedure for extracting the SPICE model parameters, based on the measurement results or TCAD simulation of a standard set of I-V and C-V characteristics in the wide temperature range, has been developed. The error simulation of the I-V characteristics does not exceed 10–12 % in the temperature range from –200 °C to +300 °C.

Keywords: extreme electronics; low temperature; high temperature; MOSFET and JFET transistors; compact SPICE models; SPICE modeling; model parameter extraction

Funding: this study has been implemented in the framework of the Basic Research Program of the National Research University Higher School of Economics (№ TZ-99) and Russian Foundation for Basic Research (grant № 18-07-00898-A).

For citation: Ismail-Zade M.R. JFET and MOSFET spice models in wide temperature range. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 40–47. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-40-47

Введение. При проектировании ИС специального назначения требуется оценка уровня их стойкости к воздействию широкого диапазона температур, включая как сверхнизкие (до –200 °C), так и сверхвысокие (до +300 °C) [1]. Для этой цели необходимы компактные SPICE-модели элементов схемы, достаточно простые для использования в коммерческих версиях SPICE-подобных симуляторов и адекватно моделирующие соответствующие физические эффекты. Стандартные SPICE-модели компонентов в коммерческих версиях SPICE-подобных симуляторов обеспечивают удовлетворительную точность в ограниченном температурном диапазоне (–60…+125 °C) и не могут применяться при проектировании ИС с учетом влияния сверхнизкой и сверхвысокой температуры. Разработке и исследованию схемотехнических SPICE-моделей MOSFET- и JFET-транзисторов с учетом влияния сверхнизкой и сверхвысокой температуры посвящен ряд работ, например [2–9].

В работе [2] представлена компактная модель 0,35-мкм КНИ МОП-транзистора с учетом сверхнизкой температуры. Модель построена на основе стандартной модели

BSIM4 с добавочными функциями для учета влияния низкотемпературных эффектов, таких как вымораживание носителей заряда, изменение подвижности и сдвиг порогового напряжения. Для учета изменения допорогового наклона и кинк-эффекта в модели используется комплексная эмпирическая функция пятого порядка, ее параметры не имеют явного физического смысла, и процедура определения параметров не описана.

Модифицированная модель субмикронных МОП-транзисторов на основе стандартной модели BSIMSOI с учетом расширенного диапазона температур (–200…+300 °C) представлена в работе [3]. В модель введены новые выражения для температурно-зависимых параметров, а также подключена дополнительная подсхема, учитывающая тепловые эффекты. Отметим, что в данной модели не учитывается возрастание токов утечки при сверхвысокой температуре.

В работах [4, 5] экспериментально исследованы характеристики JFET-транзисторов в высокотемпературном диапазоне окружающей среды (до 250-450 °C). Для описания электрических характеристик авторы работы [4] разработали новую компактную SPICE-модель JFET-транзистора, основанную на его физическом и поведенческом анализе. Авторы работы [5] использовали стандартную модель JFET-транзистора уровня 1 (*level* = 1), в которой зависимость основных параметров от температуры задана аналитически. Однако приведенная в [4] модель дает существенную погрешность в области насыщения выходных ВАХ, и методика экстракции параметров не описана в достаточной степени. В свою очередь, в работе [5] нет сопоставления результатов моделирования и эксперимента, по которым можно судить о точности модели.

В работах [6, 7] рассмотрена модифицированная схемотехническая версия SPICE-модели JFET-транзистора уровня 1 для расчетов аналоговых схем в диапазоне сверхнизких температур. В модель дополнительно включена эмпирическая функция зависимости крутизны *BETA* от температуры. Однако возможности модели по точности описания ВАХ ограничены в случае проявления эффекта саморазогрева в сверхнизком диапазоне температур и нелинейного изменения порогового напряжения в сверхвысоком, что дает увеличение погрешности моделирования.

В работе [8] представлена Low-T SPICE-модель JFET-транзистора для расчета схем в расширенном диапазоне температур, в том числе при криогенной температуре (от –200 до +110 °C). Модель учитывает изменения ВАХ, обусловленные влиянием сверхнизкой температуры, за счет введения в уравнения стандартной модели дополнительных аналитических выражений для описания температурно-зависимых параметров. Следует учесть, что для расчета схем в сверхвысоком температурном диапазоне (до +300 °C) предложенная модель требует корректировки.

По итогам анализа литературы можно сделать вывод об отсутствии готового решения для компактного моделирования MOSFET- и JFET-транзисторов в диапазоне температур от сверхнизких (от –200 °C) до сверхвысоких (до +300 °C), включая процедуру экстракции параметров. В настоящей работе предлагается универсальный и практичный подход для получения таких моделей на основе стандартных SPICE-моделей MOSFET и JFET.

Модель MOSFET с учетом широкого диапазона температур. Модифицированная SPICE-модель MOSFET [3] предназначена для расчета электронных схем в диапазоне температур от сверхнизких до сверхвысоких (–200…+300 °C). Основой данной модели является стандартная SPICE-модель из семейства BSIM с температурно-зависимыми параметрами. Для Si/SOI MOSFET это параметры, отвечающие за пороговое напряжение (*VTH*0), подвижность (*U*0, *UA*, *UB*), напряжение насыщения (*VSAT*), последовательное сопротивление (*RDSW*), допороговый наклон (*VOFF*, *NFACTOR*),

ток утечки *p*–*n*-переходов (*JDIFS*, *IDREC*) и др. Некоторые параметры исходной модели описываются встроенными зависимостями от температуры, в то время как для ряда параметров введены новые или уточненные зависимости. По сравнению с моделью [3] дополнительно учтена зависимость тока утечки *p*–*n*-переходов, возникающего при влиянии сверхвысокого диапазона температур (до +300 °C).

При изменении температуры все параметры модели, кроме подвижности и допорогового наклона, меняются в соответствии с полиномиальной функцией вида

$$\Delta p_i(T) = a_0 + a_1(\Delta T) + a_2(\Delta T)^2 + \ldots \quad (1)$$

Зависимость подвижности от температуры выражается гиперболической функцией

$$U0(T)/U0(T_{nom}) = b_0(\Delta T)^{b_1}, \quad (2)$$

зависимость коэффициента допорогового наклона *NFACTOR* выражается функцией

$$\frac{NFACTOR(T)}{NFACTOR(T_{nom})} = \frac{1}{1 + c_1(\Delta T) + c_2(\Delta T)^2}, \quad (3)$$

а зависимость коэффициента тока утечки *IDREC* – функцией

$$IDREC(T) = d_1 \exp(d_2 T). \quad (4)$$

Здесь ΔT – изменение температуры по отношению к нормальной температуре T_{nom}; a_0, a_1, b_0, b_1, c_1, c_2, d_1, d_2 и т.д. – подгоночные коэффициенты. При этом встроенные температурные коэффициенты базовой модели должны быть обнулены.

Для проверки корректности модели с использованием унифицированной процедуры определены ее параметры в диапазоне температур –200…+300°C для 0,35-мкм КНИ *n*-МОП-транзистора с *W*/*L* = 5/0,35 мкм [9].

На рис.1 представлены результаты измерения [9] и расчета по разработанной модели сток-затворных характеристик в широком диапазоне температур. Погрешность

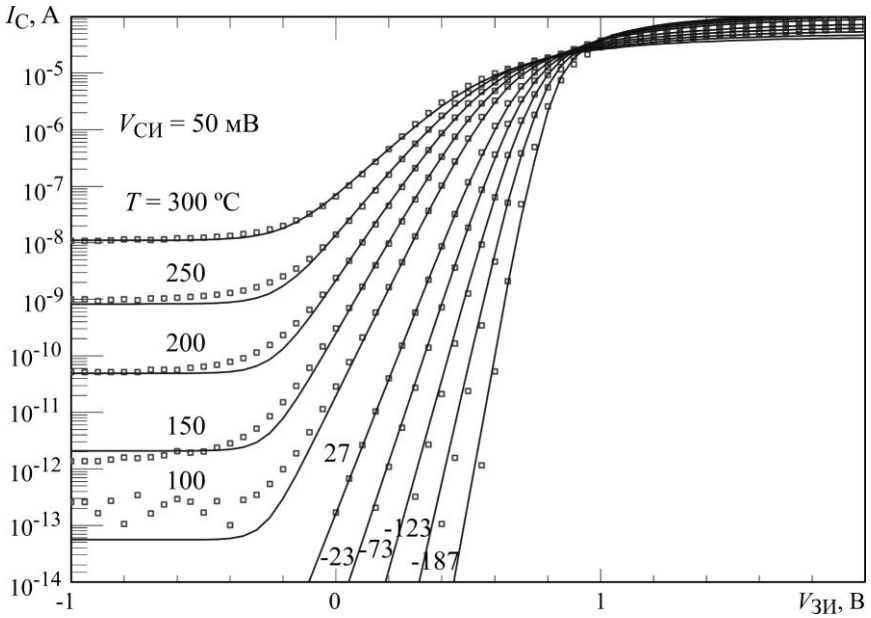


Рис.1. Измеренные [9] (символы) и смоделированные (сплошные линии) сток-затворные ВАХ КНИ *n*-МОП-транзистора в диапазоне температур от –187 до +300 °C

Fig.1. Measured [9] (symbols) and simulated (lines) transfer characteristics in log scale of SOI *n*-MOSFET in the range T = –187 ... + 300 ° C

расчета ВАХ составляет не более 10%. Сопоставление результатов расчета параметров модели по экспериментальным и по смоделированным характеристикам транзистора приведено на рис.2.

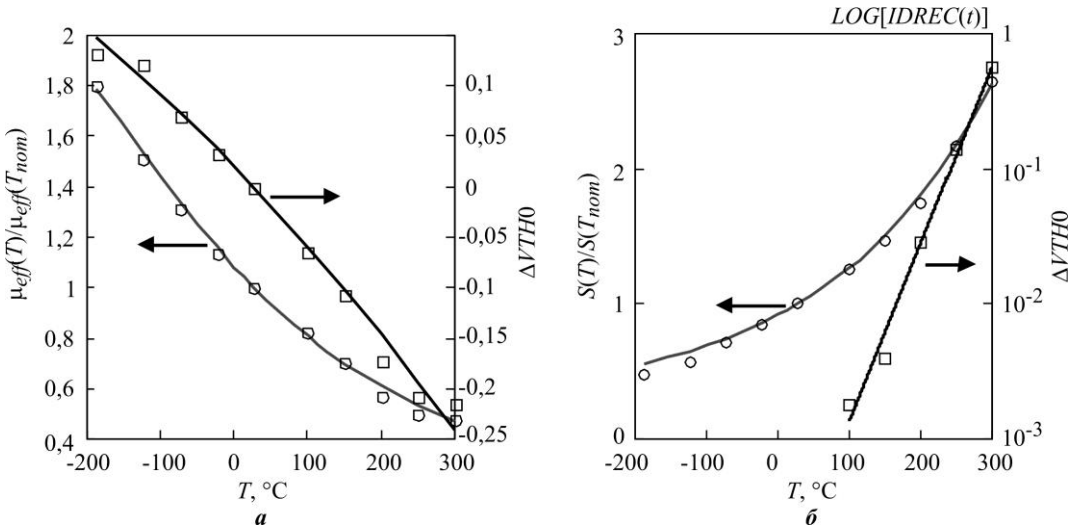


Рис.2. Зависимости порогового напряжения *VTH*0, подвижности μ_{eff} (*а*), допорогового наклона *S* и коэффициента тока утечки *IDREC* (*б*) от температуры *T* (символы – вычисления по измеренным данным [9], сплошные линии – аппроксимация)

Fig.2. Variation of threshold voltage *VTH*0, mobility μ_{eff} (*a*), subthreshold slope S and leakage current coefficient *IDREC* (*b*) with the temperature *T* (symbols – calculation based on measurement data [9], lines – approximation)

Модель JFET с учетом широкого диапазона температур. В работе [8] предложена модифицированная компактная SPICE-модель Si JFET для широкого диапазона температур (–200…+110 °C), которая включает в себя температурно-зависимые параметры. Ядром этой модели является встроенная в SPICE стандартная модель JFET уровня 3 (*level* = 3), применимая к транзисторам микронных размеров. В настоящей работе проведена коррекция модели [8] для сверхвысокого диапазона температур (до +300 °C).

Температурно-зависимыми в диапазоне температур до +300 °C являются параметры модели, отвечающие за пороговое напряжение (*VTO*), крутизну (*BETA*), коэффициент модуляции длины канала (*LAMBDA*) и коэффициент насыщения (*ALPHA*). При изменении температуры параметры *VTO*, *BETA* и *ALPHA* меняются в соответствии с полиномиальной функцией вида

$$\Delta f_i(T) = n_0 + n_1(\Delta T) + n_2(\Delta T)^2 + \ldots \qquad (5)$$

Зависимость коэффициента модуляции длины канала *LAMBDA* выражается функцией

$$\frac{LAMBDA(T)}{LAMBDA(T_{nom})} = \frac{1}{k_0 + k_1(\Delta T) + k_2(\Delta T)^2}. \qquad (6)$$

Здесь n_0, n_1, n_2, k_0, k_1, k_2 – подгоночные коэффициенты; *T* – температура, К.

Возможности модели по точности описания ВАХ в сверхвысоком диапазоне температур (до +300 °C) для дискретного *n*-JFET с высокотемпературным корпусом TO-258 проиллюстрированы на рис. 3,*а* [5]. Погрешность моделирования ВАХ составляет не более 10 %. На рис. 3,*б* приведены температурные зависимости абсолютного сдвига порогового напряжения Δ*VTO* и относительного изменения крутизны *BETA*, полученные по результатам расчета измеренных данных [5].

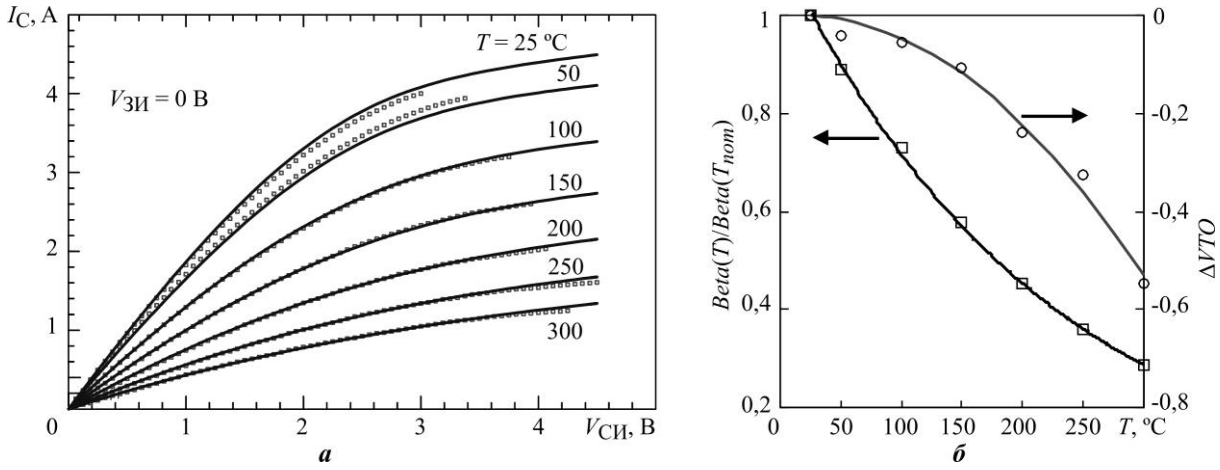


Рис.3. Выходные ВАХ *n*-JFET в сверхвысоком диапазоне температур (до +300 °C) (*а*) и зависимости порогового напряжения *VTO* и крутизны *BETA* от температуры *T* (*б*) (символы – измерения [5], сплошные линии – моделирование)

Fig.3. Output *I-V* characteristics of *n*-JFET in the high temperature range (up to +300 °C) (*a*), variation of threshold voltage *VTO* and transconductance *BETA* with the temperature *T* (*b*) (symbols – measurements [5], lines – simulation)

Методика экстракции параметров моделей с учетом широкого диапазона температур. Для определения набора параметров SPICE-моделей в расширенном диапазоне температур используется промышленный пакет экстракции SPICE-моделей IC-CAP. Исходными данными являются наборы ВАХ и ВФХ MOSFET- или JFET-транзисторов, полученные в результате измерения или TCAD-моделирования при различных значениях температуры и передаваемые в IC-CAP с помощью собственного программного интерфейса. Процедура экстракции позволяет получить параметры модели для промежуточных значений температуры и включает в себя следующие шаги:

Шаг 1. Определение полного набора параметров модели на основе данных измерений, полученных при комнатной температуре. Используемый при этом метод идентификации параметров включает в себя сочетание аналитических и оптимизационных процедур.

Шаг 2. Из полного набора параметров выбирается перечень основных температурно-зависимых параметров.

Шаг 3. Для каждого значения температуры из списка дискретных значений на основании результатов измерений определяются соответствующие значения выбранных параметров (для порогового напряжения, крутизны и т. д.). Данная операция повторяется для всех запланированных дискретных значений температуры T_i, $i = 1…n$.

Шаг 4. Полученные на шаге 3 зависимости параметров модели от температуры аппроксимируются аналитическими функциями вида (1)–(4) для MOSFET или (5)–(6) для JFET. Коэффициенты этих функций составляют набор температурных параметров всей модели. Точная подстройка значений температурных параметров проводится с использованием глобальной оптимизации, т.е. по всем имеющимся экспериментальным характеристикам.

Шаг 5. Полученные аналитические выражения вместе с коэффициентами встраиваются в описание SPICE-модели JFET или MOSFET, которая далее включается в состав библиотеки моделей.

Заключение. Разработанные модифицированные компактные Low-T и High-T версии SPICE-моделей MOSFET и JFET для различных типов транзисторных структур предназначены для использования при расчете электронных схем в диапазоне температур от сверхнизких до сверхвысоких (–200…+300 °C). Для модели MOSFET получены уточненные зависимости для порогового напряжения, допорогового наклона и коэффициента тока утечки, для модели JFET – уточненные зависимости для порогового напряжения *VTO*, крутизны *BETA*, коэффициента модуляции длины канала *LAMBDA* и параметра *ALPHA*.

Разработанная унифицированная процедура позволяет по результатам измерений определить изменения основных параметров моделей в диапазоне температур –200…+300 °C. Тестирование моделей на примерах ВАХ отдельных транзисторов показало погрешность моделирования не выше 10–12 %.

Литература

1. Extreme environment electronics / ***Ed. by J.D. Cressler, H.A. Mantooth*** CRC Press, 2017. 976 p.
2. Compact modeling of 0.35 μm SOI CMOS technology node for 4 K DC operation using Verilog-A / ***K. Akturk, M. Peckerar, S. Otbhare et al.*** // Journal Microelectronic Engineering. 2010. Vol. 87. Iss. 12. P. 2518–2524.
3. ***Petrosyants K.O.*** Compact device models for BiCMOS VLSIs simulation in the extended temperature range (from –200 °C to +300 °C) // 2018 24rd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). IEEE. 2018. P. 1–6.
4. ***Mousa R., Planson D., Morel H., Raynaud C.*** High temperature characterization of SiC-JFET and modelling // In 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE. 2007. P. 1–10.
5. Characterization of SiC JFET for temperature dependent device modeling / ***T. Funaki, A.S. Kashyap, H.A. Mantooth et al.*** // 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE. 2006. P. 1–6.
6. The accounting of the simultaneous exposure of the low temperatures and the penetrating radiation at the circuit simulation of the BiJFET analog interfaces of the sensors / ***O.V. Dvornikov, V.L. Dziatlau, N.N. Prokopenko et al.*** // In Control and Communications (SIBCON): 2017 International Siberian Conference on. IEEE. 2017. P. 1–6.
7. Automation of parameter extraction procedure for Si JFET SPICE model in the −200…+110°C temperature range / ***K.O. Petrosyants, M.R. Ismail-zade, L.M. Sambursky et al.*** // In Electronic and Networking Technologies (MWENT): 2018 Moscow Workshop on. IEEE. 2018. P. 1–5.
8. ***Петросянц К.О., Исмаил-Заде М.Р., Самбурский Л.М.*** Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 2. С. 174–184.
9. The operation of 0.35 μm partially depleted SOI CMOS technology in extreme environments / ***Y. Li, G. Niu, J.D. Cressler et al.*** // Solid-State Electronics. 2003. Vol. 47. No. 6. P. 1111–1115.

Поступила в редакцию 07.10.2019 г.; после доработки 07.10.2019 г.; принята к публикации 19.11.2019 г.

Исмаил-Заде Мамед Рашидович – аспирант департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34), mismailzade@hse.ru

References

1. *Extreme environment electronics*. Ed. By Cressler J.D., Mantooth H.A. CRC Press, 2017. 976 p.
2. Akturk K., Peckerar M., Otbhare S. et al. Compact Modeling of 0.35 μm SOI CMOS Technology Node for 4 K DC Operation using Verilog-A. *Journal Microelectronic Engineering*, 2010, vol. 87, iss. 12, pp. 2518–2524.
3. Petrosyants K.O. Compact device models for BiCMOS VLSIs simulation in the extended temperature range (from –200 °C to + 300 °C). *2018 24rd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). IEEE*, 2018, pp. 1–6.

4. Mousa R., Planson D., Morel H., Raynaud C. High temperature characterization of SiC-JFET and modeling. *In 2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. *IEEE*, 2007, pp. 1–10.

5. Funaki T., Kashyap A.S., Mantooth H.A. et al. Characterization of SiC JFET for temperature dependent device modeling. *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE*, 2006, pp. 1–6.

6. Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Petrosiants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovski V.A. The accounting of the simultaneous exposure of the low temperatures and the penetrating radiation at the circuit simulation of the BiJFET analog interfaces of the sensors. In Control and Communications (SIBCON). *International Siberian Conference on*. *IEEE*, 2017, pp. 1–6.

7. Petrosyants K.O., Ismail-Zade M.R., Sambursky L.M., Dvornikov O.V., Lvov B.G., Kharitonov I.A. Automation of parameter extraction procedure for Si JFET SPICE model in the −200…+110 °C temperature range. *In Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. IEEE. Moscow, Workshop on, 2018, pp. 1–5.

8. Petrosyants K.O., Ismail-Zade M.R., Sambursky L.M. Highlights of JFET I-V characteristics simulation in cryogenic temperature range. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 174–184. (in Russian).

9. Li Y., Niu G., Cressler J.D., Patel J., Liu S.T., Reed R.A., Blalock B.J. The operation of 0.35 μm partially depleted SOI CMOS technology in extreme environments. *Solid-State Electronics*, 2003, vol. 47, no. 6, pp. 1111–1115.

Received 07.10.2019; Revised 07.10.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the author:

Mamed R. Ismail-Zade – PhD student of the Electronic Engineering Department of the Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinskaya st., 34), mismailzade@hse.ru

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

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

http://ivuz-e.ru

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 004.023:621.3.049.771.14 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-48-57**

Разработка и сравнительный анализ методов решения задачи размещения для реконфигурируемых систем на кристалле

С.В. Гаврилов, Д.А. Железников, Р.Ж. Чочаев

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

sergey_g@ippm.ru

Одним из основных и наиболее трудоемких этапов проектирования в базисе реконфигурируемых систем на кристалле является размещение элементов. В работе проведен сравнительный анализ методов решения задачи размещения элементов в маршруте топологического синтеза цифровых схем в базисе реконфигурируемых систем на кристалле с островной иерархической архитектурой. Рассмотрены алгоритмы размещения с применением метода имитации отжига. Последовательный многоуровневый алгоритм размещения состоит из двух этапов: глобального размещения групп логических элементов и последовательного детального размещения внутри групп. Конкурентный многоуровневый алгоритм размещения аналогичен первому, но на этапе детального размещения перестановки логических элементов выполнены во всех группах одновременно. В стандартном плоском алгоритме размещения этап глобального размещения отсутствует, а перестановка логических элементов не ограничена рамками групп. Тестирование алгоритмов осуществлено в базисе реконфигурируемой системы на кристалле отечественного производства. Результаты экспериментов показывают, что применение стандартного плоского алгоритма размещения позволяет повысить трассируемость проектируемых схем, уменьшить общую длину межсоединений, а также повысить быстродействие до 49 %.

Ключевые слова: размещение элементов; автоматизация проектирования; программируемые логические интегральные схемы; реконфигурируемые системы на кристалле

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00621) и Минобрнауки России (тема № АААА-А19-119041290011-7).

Для цитирования: Гаврилов С.В., Железников Д.А., Чочаев Р.Ж. Разработка и сравнительный анализ методов решения задачи размещения для реконфигурируемых систем на кристалле // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 48–57. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-48-57

© С.В. Гаврилов, Д.А. Железников, Р.Ж. Чочаев, 2020

Development and Comparative Analysis of Placement Methods for Reconfigurable Systems-on-a-Chip

S.V. Gavrilov, D.A. Zheleznikov, R.Z. Chochaev

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

sergey_g@ippm.ru

Abstract: Placement stage is one of the most crucial and time-consuming stages of design flow in the basis of reconfigurable systems-on-chip (RSoC). In this work the analysis of various approaches to solving the elements' placement in the topological synthesis flow of digital circuits in the RSoC basis with an island hierarchical architecture has been presented. Various approaches of implementation of the placement algorithm using the simulated annealing method have been considered. The first approach represents the global placement of logic elements and sequential detailed placement within groups. The second approach is similar to the first one, but at the detailed placement the rearrangement of logic elements have been performed simultaneously in all groups. In the third approach the global placement step is absent and the rearrangement of the logic elements is not limited by the borders of the groups. The testing of the algorithms has been performed in the domestic RSoC basis. The experimental results demonstrate that usage of the third approach allows to increase the routability of the circuits being designed, to reduce the length of interconnections, as well to improve the speed up to 49 %.

Keywords: placement; computer-aided design; Field-Programmable Gate Array (FPGA); Reconfigurable Systems-on-Chip (RSoC).

Funding: this study has been conducted with financial support from Russian Foundation for Basic Research (project № 18-07-00621) and Ministry of Education and Sciences of Russia (state № AAAA-A19-119041290011-7).

For citation: Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Chochaev R.Z. Development and comparative analysis of placement methods for reconfigurable systems-on-a-chip. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 48–57. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-48-57

Введение. Реконфигурируемая система на кристалле (РСнК) представляет собой интегральную схему, в которой могут быть интегрированы память, процессорные ядра, программируемая логика и различные сложнофункциональные блоки (IP-ядра специального назначения). Программируемая часть чаще всего представляется в виде ПЛИС.

Цель настоящей работы – разработка алгоритмов размещения элементов для РСнК «А01» отечественного производства с островной иерархической архитектурой. Конфигурируемые логические блоки в данной РСнК объединены в группы по 256 элементов. Помимо программируемой логики также имеются сложнофункциональные блоки фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), умножители, блоки оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и интерфейс LVDS (Low Voltage Differential Signaling). Для трассировки используются быстрые локальные трассы и глобальные шины.

Обзор существующих подходов к решению задачи размещения. Задача размещения является одной из самых сложных в маршруте топологического проектирования в базисе ПЛИС и РСнК [1]. Необходимо определить оптимальное расположение элементов на кристалле с точки зрения временных ограничений (timing-driven placement), разводимости (routability-driven placement) и суммарной длины межсоединений (wirelength-driven placement). Существующие алгоритмы размещения можно разделить на несколько групп в зависимости от применяемого подхода к решению этой задачи.

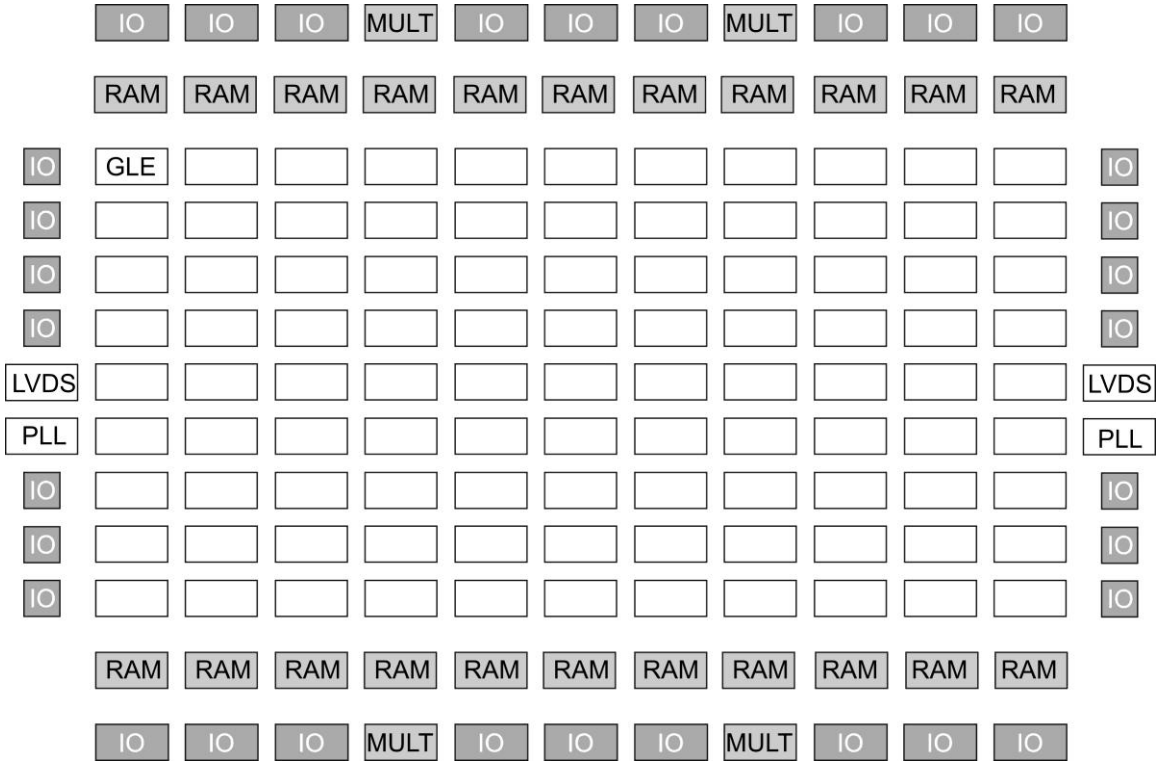
К первой группе относятся алгоритмы дихотомического размещения [2, 3], в основе которых лежат алгоритмы декомпозиции. С помощью этих алгоритмов проектируемая схема и область размещения разбиваются на подсхемы и подобласти с последующим назначением получившихся подсхем на соответствующие подобласти. Целевой функцией в данном случае является взвешенная стоимость сечений, т.е. количество связей между подсхемами. Дихотомические алгоритмы успешно применяются для размещения схем в небольших иерархических ПЛИС и РСнК с симметричной структурой межсоединений. Основные недостатки данных алгоритмов заключаются в сложности единовременного учета разнородных критериев и низкой устойчивости к малым изменениям на входе.

Ко второй группе относятся метаэвристические алгоритмы, например на основе метода имитации отжига [4] или генетические алгоритмы [5]. Данные алгоритмы оптимизации широко используются в современных САПР, особенно распространены алгоритмы на основе метода имитации отжига. Данный метод характеризуется гибкостью, простотой и высокой эффективностью, а также наличием доказательства асимптотической сходимости [6], возможностью преодолевать локальные оптимумы целевой функции благодаря учету решений, ухудшающих значение целевой функции. Также метод имитации отжига используется в комбинации с различными методами генерации начального размещения, позволяющими ускорить его сходимость. Недостатком метаэвристических алгоритмов на основе метода имитации отжига является падение быстродействия с ростом размерности задачи.

Алгоритмы третьей группы возникли при попытке решить проблему размещения для схем, с которыми традиционный метод отжига не справляется. К этой группе относятся так называемые аналитические алгоритмы [7, 8]. Задача размещения представляется в аналитическом виде и решается численными методами. После численного решения задачи, чтобы избежать стягивания элементов в одну точку, также применяются различные методы локальной оптимизации и легализации. Основное преимущество данных алгоритмов заключается в высоком быстродействии для схем большой размерности. В то же время эти алгоритмы достаточно сложны и нуждаются в дополнительных методах легализации и локальной оптимизации, эффективность которых существенно влияет на итоговый результат.

Несмотря на то что в зарубежных коммерческих САПР на данный момент наиболее популярны аналитические алгоритмы, в академической среде не прекращаются попытки повышения быстродействия метода отжига для задач больших размерностей [9].

Проанализируем различные алгоритмы решения задачи размещения с применением метода имитации отжига. В первых двух алгоритмах используется многоуровневый подход. Третий алгоритм представляет собой стандартный плоский подход к задаче размещения. Тестирование алгоритмов осуществляется в базисе РСнК «А01» [10] отечественного производства (рисунок) на тестовых схемах из наборов ISCAS-85/89 [11, 12], LGSynth89 [13], а также на схеме микропроцессора Intel 8051 [14].



Структура РСнК «А01»: GLE – группа логических элементов; IO – группа ячеек ввода-вывода; MULT – умножитель; RAM – блоки памяти ОЗУ; PLL – блок ФАПЧ; LVDS – LVDS-порт
Architecture of RSoC «A01»: GLE – group of logic elements; IO – group of input-output cells; MULT – multiplier; RAM – random access memory; PLL – phase-locked loop; LVDS – low-voltage differential signaling port

Описание разработанных алгоритмов размещения. ***Последовательный многоуровневый алгоритм размещения.*** Последовательный многоуровневый алгоритм размещения (ПМАР) включает в себя два основных этапа: глобальное размещение групп логических элементов (ГЛЭ) и детальное размещение логических элементов (ЛЭ) внутри ГЛЭ.

ПМАР применяется в паре с соответствующим алгоритмом декомпозиции. С помощью него исходная схема разбивается на необходимое количество групп, которые затем передаются на этап глобального размещения. В работе используется комбинация методов, состоящая из модифицированного алгоритма iRAC [15] и оптимизационного алгоритма на основе метода имитации отжига [10].

На этапе глобального размещения применяется подход, описанный в работе [16]. На первом шаге выполняется генерация начального размещения с помощью силового метода. Псевдокод силового метода размещения имеет вид

Пока все ГЛЭ не размещены,
Для каждой ГЛЭ $g \in G$:
    Если среди связанных с g групп есть размещенные,
        Вычислить координаты центра масс (xg, yg),
        Найти ближайшую к центру масс незанятую группу pb,
        Разместить g в pb.

Координаты центра масс вычисляются относительно уже размещенных элементов. После их вычисления выполняется поиск ближайшей свободной к ним позиции. Размещение завершается, когда для всех групп определены их конкретные позиции.

На втором шаге выполняется оптимизация по суммарной длине цепей полученного начального размещения модифицированным методом имитации отжига. Разработанная целевая функция имеет следующий вид:

$$\mathrm{Cost} = \sum_{l \in Labs} \left(\sum_{i \in Inputs} \mathrm{InCost}_l^i + \sum_{j \in Outputs} \mathrm{OutCost}_l^j \right),$$

где InCost^i_l и $\mathrm{OutCost}^j_l$ – «входная» и «выходная» компоненты целевой функции; *Labs* – список всех ГЛЭ; *Inputs*, *Outputs* – списки выходов и выходов *l*-й ГЛЭ.

«Входная» компонента рассчитывается по формуле

$$\mathrm{InCost}_l^i = \varphi\left(|x_l - x_i| + |y_l - y_i|\right),$$

где φ – коэффициент, который равен 4, если среди терминалов цепи есть ячейка ввода-вывода или IP-блок, и равен 1 во всех остальных случаях; (x_l, y_l) – координаты *l*-й ГЛЭ; (x_i, y_i) – координаты источника *i*-го сигнала.

«Выходная» компонента рассчитывается по формуле

$$\mathrm{OutCost}_l^j = \sum_{t \in j} \omega\left(|x_l - x_t| + |y_l - y_t|\right),$$

где *t* – терминал *j*-го выхода *l*-й ГЛЭ; ω – коэффициент, равный 3, если среди терминалов цепи есть IP-блок или ячейка ввода-вывода, и равный 1 во всех остальных случаях; (x_t, y_t) – координаты блока, подключенного к *t*-му терминалу.

Коэффициенты φ и ω предназначены для размещения как можно ближе к группам, связанным с блоками ввода-вывода и IP-блоками, чтобы минимизировать количество используемых трассировочных ресурсов. Для вычисления оставшихся основных параметров используются методы, описанные в работе [4]. Начальная температура вычисляется следующим образом:

$$T_{initial} = 40D(N_{Labs}),$$

где $D(N_{Labs})$ – среднеквадратическое отклонение целевой функции при N_{Labs} перестановках; N_{Labs} – количество групп логических элементов.

В качестве операторов перехода в новое состояние используются следующие: перестановка пары групп логических элементов между собой и перемещение группы на свободную позицию.

Этап размещения логических элементов в группах состоит из генерации начального размещения и его оптимизации методом имитации отжига. Перед генерацией начального размещения определяется порядок ГЛЭ, в которых будет выполняться детальное размещение. Порядок определяется расположением ГЛЭ на кристалле. Первыми размещаются элементы в группах, которые расположены в верхней части кристалла. В пределах одного ряда более высокий порядок имеют элементы, находящиеся ближе к левому краю. После начального размещения осуществляется оптимизация полученного решения методом имитации отжига. В качестве целевой функции используется суммарная длина цепей, для оценки которой применяется модель *Star+* [16]:

$$\mathrm{Cost} = \sum\nolimits_{l \in Nets} \left(\left\| Net_l \right\|_x + \left\| Net_l \right\|_y \right),$$

$$\left\| Net_l \right\|_x = \alpha \sqrt{T_l - \frac{S_l^2}{k_l}} + \beta,$$

где $T_l = \sum_{\forall i \in Net_l} x_i^2$; $S_l = \sum_{\forall i \in Net_l} x_i$; $\alpha = 1,56, \beta = 1,0$; k_l – количество терминалов цепи l; x_i – координаты элемента по оси x.

Количество итераций и параметры процесса охлаждения описаны в работе [4]. Для генерации нового решения используются стандартные операторы перехода (операторы перестановки и перемещения ЛЭ).

Конкурентный многоуровневый алгоритм размещения. В конкурентном многоуровневом алгоритме размещения (КоМАР) применяется тот же подход, что и в ПМАР, но на каждой итерации детального размещения перестановки выполняются конкурентно во всех группах логических элементов. Псевдокод алгоритма имеет следующий вид:

S – некоторое решение, *T* – температура,
Cost(*S*) – значение целевой функции для решения *S*.

S = Начальное решение(),
T = Начальная температура *Tinitial*,
Пока не выполнено условие окончания отжига,
    Пока количество итераций *iter* < максимального значения *L*.
        Для каждой группы логических элементов *g*
        Sgnew = Новое решение (*Sg*),
        Δ = *Cost*(*Snewg*) – *Cost*(*Sg*),
        rand = случайное число в интервале [0, 1].
        Если Δ < 0,
            Sg = *Snewg*.
        Если *Sbestg* > *Sg*,
            Sbestg = *Sg*.
        Иначе, если *rand* < exp(–Δ / *T*),
            Sg = *Snewg*,
    Обновить температуру (*T*).

На каждой итерации внутреннего цикла алгоритма выполняются поочередные перестановки ЛЭ во всех ГЛЭ. Целевая функция рассчитывается отдельно для каждой группы в соответствии с моделью длины межсоединений *Star+*. Остальные параметры алгоритма аналогичны ПМАР.

Стандартный плоский алгоритм размещения. Стандартный плоский алгоритм размещения (СПАР) состоит из этапов начального размещения и оптимизации методом имитации отжига. Начальное решение генерируется за два шага: сначала с помощью силового алгоритма, описанного ранее, вычисляется размещение ГЛЭ, а затем в группах последовательно вычисляется начальное размещение. После этого начинается оптимизация методом имитации отжига. Область перестановок и перемещений ограничена только размерами кристалла и максимальным количеством ЛЭ в группах.

Целевая оценочная функция имеет следующий вид:

$$Cost = \sum_{i=1}^{n} WL(n_i) + 4Do^2,$$

где $WL(n_i)$ – длина цепи n_i согласно модели *Star+*; *Do* – перегруженность, равная

$$Do = \sum \max(0, N_{ij} - D_{\max}).$$

Здесь N_{ij} – количество ЛЭ в группах с относительными координатами (i, j); D_{max} – максимальная емкость ГЛЭ, задаваемая пользователем.

Перегруженность групп также учитывается при генерации нового размещения. Перемещение ЛЭ из одной группы в другую выполняется тогда и только тогда, когда количество элементов в группе после этого не превышает D_{max} на 25 %. Для вычисления остальных параметров алгоритма используются методы, описанные в работе [4].

Результаты численных экспериментов. Тестирование алгоритмов проводилось в базисе РСнК «А01». Кластеризация осуществлялась модифицированным алгоритмом iRAC. После чего выполнялся запуск рассмотренных алгоритмов. Для трассировки полученного размещения использовался модифицированный алгоритм Pathfinder [18], описанный в работе [19]. В качестве тестовых применялись схемы из наборов ISCAS-85/89, LGSynth-89 и схема микроконтроллера Intel 8051. Результаты численных экспериментов по трассируемости тестовых схем представлены в табл.1.

Таблица 1

Результаты экспериментов

Table 1

Experimental results

Схема	Количество		Алгоритм	Длина цепей		Относительное изменение длины цепей после отжига,%	Количество неоттрассированных цепей
	ЛЭ	ГЛЭ		до отжига	после отжига		
apex3	921	10	ПМАР	4,13	3,42	–17	0
			КоМАР		3,32	–19	0
			СПАР		1,7	–58	0
apex4	1514	10	ПМАР	6,1	4,3	–30	0
			КоМАР		4,3	–30	3
			СПАР		2,0	–67	150
s38417	5247	85	ПМАР	14,12	10,1	–28	0
			КоМАР		3,49	–75	0
			СПАР		3,51	–75	0
Intel 8051	6058	86	ПМАР	39,53	33,79	–14	1154
			КоМАР		21,96	–44	642
			СПАР		6,08	–85	239

Из табл.1 видно, что взвешенная общая длина межсоединений при использовании СПАР уменьшается до 85 % относительно начального решения. Уменьшение общей длины межсоединений КоМАР и СПАР также позволяет повысить трассируемость схемы 8051 по сравнению с ПМАР.

В табл.2 приведены результаты статического временного анализа, выполненного после размещения и трассировки тестовых схем. Видно, что применение СПАР позволяет повысить быстродействие схем в базисе РСнК «А01», причем для самой большой схемы s38417 достигается ускорение до 49 % относительно ПМАР и до 40 % относительно КоМАР.

Таблица 2

Результаты статического временного анализа

Table 2

Static timing analysis results

Схема	Количество ЛЭ	Задержка, нс		
		ПМАР	КоМАР	СПАР
c1908	171	46,3	45	42,7
s953	219	20,5	23,8	18,9
c6288	1146	117,4	113,1	100
s38417	5248	114,7	96,5	58

Заключение. Анализ эффективности последовательного многоуровневого, конкурентного многоуровневого и стандартного плоского алгоритмов размещения, проведенный в базисе РСнК «А01», показал следующее. Наиболее эффективным как по трассируемости, так и по быстродействию является стандартный плоский алгоритм размещения. С его помощью удалось добиться повышения трассируемости тестовых схем, уменьшения общей длины межсоединений, а также повышения быстродействия проектируемых схем до 49 %.

Литература

1. ***Hauck S., DeHon A.*** Reconfigurable computing: The theory and practice of FPGA-based computation. San Francisco: CA, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007. 944 p.
2. ***Shahookar K., Mazumder P.*** VLSI cell placement techniques // ACM Computing Surveys (CSUR). 1991. Vol. 23. No. 2. P. 143–220.
3. ***Rose J., Snelgrove W., Vranesic Z.*** ALTOR: an automatic standard cell layout program // Proc. of the Canadian Conference on VLSI. 1985. P. 169–173.
4. ***Betz V., Rose J.*** VPR: a new packing, placement and routing tool for FPGA research. // Proc. of the Seventh International Workshop on Field-Programmable Logic and Applications. Springer-Verlag. 1997. P. 213–222.
5. ***Baruch Z., Cret O., Giurgiu H.*** Genetic algorithm for FPGA placement // Proc. of the 12th International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS12). 1999. Vol. 2. P. 121–126.
6. ***Hajek B.*** Cooling schedules for optimal annealing // Math. Oper. Res. 1988. Vol. 13. P. 311–329.
7. Ripple 2.0: high quality routability-driven placement via global router integration / ***X. He, T. Huang, W.-K. Chow et al.*** // ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC). 2013. P. 152:1–152:6.
8. ***Hajek B.*** Cooling schedules for optimal annealing // Math. Oper. Res. 1988. Vol. 13. P. 311–329.
9. ***Gort M., Anderson J.H.*** Analytical placement for heterogeneous FPGAs // 22nd Intern. Conf. on Field Programmable Logic and Applications (FPL). 2012. P. 143–150.
10. ***Gavrilov S., Zheleznikov D., Khvatov V., Chochaev R.*** Clustering optimization based on simulated annealing algorithm for reconfigurable systems-on-chip // 2018 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow, 2018. P. 1492–1495.
11. ***Brglez F., Bryan D., Kozminski K.*** Combinational profiles of sequential benchmark circuits // Proc. of the Intern. Symposium of Circuits and Systems. 1989. P. 1929–1934.
12. ***Bryan D.*** The ISCAS ‘85 Benchmark circuits and netlist format. North-Carolina State University, 1985. P. 4.
13. ***Yang S.*** Logic synthesis and optimization benchmarks // Technical Report, MCNC, Dec. 1988 MCNC International Workshop on Logic Synthesis, 1989. P. 14.
14. 8051 core: Overview. URL: https://opencores.org/projects/8051 (дата обращения: 18.06.2019).
15. ***Singh A., Marek-Sadowska M.*** Efficient circuit clustering for area and power reduction in FPGAs // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems. 2002. Vol. 7. No. 4. P. 643–663.
16. ***Gavrilov S., Zheleznikov. D., Chochaev R.*** Simulated annealing based placement optimization for reconfigurable systems-on-chip // 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Saint Petersburg; Moscow, 2019. P. 1597–1600.

17. Near-linear wirelength estimation for FPGA placement / ***M. Xu, G. Grewal, S. Areibi et al***. // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2009. Vol. 34. No. 3. P. 125–132.

18. ***McMurchie L., Ebeling C.*** PathFinder: a negotiation-based performance-driven router for FPGAs // Third Intern. ACM Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. Napa Valley, CA, USA. 1995. P. 111–117.

19. ***Гаврилов С.В., Железников Д.А., Чочаев Р.Ж., Эннс В.И.*** Адаптация метода моделирования отжига для размещения элементов в базисе реконфигурируемых систем на кристалле // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2018. № 4 (172). С. 55–61.

Поступила в редакцию 24.06.2019 г.; после доработки 24.06.2019 г.; принята к публикации 19.11.2019 г.

Гаврилов Сергей Витальевич **–** доктор технических наук, профессор, директор Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), sergey_g@ippm.ru

Железников Даниил Александрович **–** научный сотрудник отдела САПР Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), zheleznikov_d@ippm.ru

Чочаев Рустам Жамболатович **–** инженер-исследователь отдела САПР Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), chochaev_r@ippm.ru

References

1. Hauck S., DeHon A. *Reconfigurable Computing: The theory and practice of FPGA-based computation*. San Francisco, CA, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007. 944 p.

2. Shahookar K., Mazumder P. VLSI cell placement techniques. *ACM Computing Surveys* (*CSUR*), 1991, vol. 23, no. 2, pp. 143–220.

3. Rose J., Snelgrove W., Vranesic Z. ALTOR: An automatic standard cell layout program. *Proceedings of the Canadian Conference on VLSI*, 1985, pp. 169–173.

4. Betz V., Rose J. VPR: a new packing, placement and routing tool for FPGA research. *Proceedings of the Seventh International Workshop on Field-Programmable Logic and Applications. Springer-Verlag*, 1997, pp. 213–222.

5. Baruch Z., Cret O., Giurgiu H. Genetic algorithm for FPGA placement. *Proceedings of the 12th International Conference on Control Systems and Computer Science* (*CSCS12*), 1999, vol. 2, pp. 121–126.

6. Hajek B. Cooling schedules for optimal annealing. *Math. Oper. Res*., 1988, vol. 13, pp. 311–329.

7. He X., Huang T., Chow W.-K., Kuang J., Lam K.-C., Cai W., Young E. F. Y. Ripple 2.0: high quality routability-driven placement via global router integration. *ACM/IEEE Design Automation Conference* (*DAC*), 2013, pp. 152:1–152:6.

8. Hajek B. Cooling schedules for optimal annealing. *Math. Oper. Res.*, 1988, vol. 13, pp. 311–329.

9. Gort M., Anderson J.H. Analytical placement for heterogeneous FPGAs. *22nd International Conference on Field Programmable Logic and Applications* (*FPL*), 2012, pp. 143–150.

10. Gavrilov S., Zheleznikov D., Khvatov V., Chochaev R. Clustering optimization based on simulated annealing algorithm for reconfigurable systems-on-chip. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering* (*EIConRus*). Moscow, 2018, pp. 1492–1495.

11. Brglez F., Bryan D., Kozminski K. Combinational Profiles of Sequential Benchmark Circuits. *Proc. Of the International Symposium of Circuits and Systems*, 1989, pp. 1929–1934.

12. Bryan D. *The ISCAS '85 benchmark circuits and netlist format*. North-Carolina State University, 1985, p. 4.

13. Yang S. Logic synthesis and optimization benchmarks. *Technical Report. MCNC. Dec. 1988. MCNC International Workshop on Logic Synthesis*, 1989. p. 14.

14. *8051 core: Overview*. Available at: https://opencores.org/projects/8051 (accessed: 18.06.2019)

15. Singh A., Marek-Sadowska M. Efficient circuit clustering for area and power reduction in FPGAs. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 2002, vol. 7, no. 4, pp. 643–663.

16. Gavrilov S., Zheleznikov D., Chochaev R. Simulated annealing based placement optimization for reconfigurable systems-on-chip. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering* (*EIConRus*), Saint Petersburg and Moscow, 2019. pp. 1597–1600.

17. Xu M., Grewal G., Areibi S., Obimbo C., Banerji D. Near-linear wirelength estimation for FPGA placement. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2009, vol. 34, no. 3, pp. 125–132.

18. McMurchie L., Ebeling C. PathFinder: A negotiation-based performance-driven router for FPGAs. *Third International ACM Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*, Napa Valley, CA, USA, 1995, pp. 111–117.

19. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Chochaev R.Z., Enns V.I. The modification of simulated annealing-based placement algorithm for reconfigurable systems-on-chip. *Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics*, 2018, no. 4 (172), pp. 55–61. (In Russian).

Received 24.06.2019; Revised 24.06.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the authors:

Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), sergey_g@ippm.ru

Daniil A. Zheleznikov – Researcher of the CAD Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), zheleznikov_d@ippm.ru

Rustam Z. Chochaev – Research Engineer of the CAD Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), chochaev_r@ippm.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
BIOMEDICAL ELECTRONICS

УДК [616.7:621.3.019.34]:616.1 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-58-68**

Прогнозирование и оценка надежности аппаратов механического замещения функции сердца

Д.В. Телышев

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), г. Москва, Россия

telyshev@bms.zone

Современные аппараты механического замещения функции сердца представляют собой сложные биотехнические системы, в состав которых, помимо имплантируемых частей, входит периферия, представленная различными электронными модулями для обеспечения контроля, управления и бесперебойной работы. Долговечность данных аппаратов определяется надежностью их элементов. Основная задача разработчиков – повышение их надежности. В работе приведено архитектурное проектирование трех вариантов аппарата механического замещения функции сердца. Разработана структурная схема и выполнен расчет надежности для этих архитектурных решений. Построена математическая модель надежности в виде графа возможных состояний системы и решена система дифференциальных уравнений для вероятностных состояний. Проведен расчет вероятности безотказной работы для трех частных случаев архитектурных решений в зависимости от их технической сложности. Результаты работы показывают, что с повышением уровня сложности технического решения наблюдается снижение вероятности безотказной работы, так как повышается вероятность выхода из строя элементов данной технической системы. Повышение надежности архитектурного решения аппарата механического замещения функции сердца достигается дублированием основных функциональных блоков и снижением уровня системной сложности элементов без резервирования.

Ключевые слова: аппарат механического замещения функции сердца; надежность; вероятность безотказной работы

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского сообщества (проект №19-51-45001).

© Д.В. Телышев, 2020

Для цитирования: Телышев Д.В. Прогнозирование и оценка надежности аппаратов механического замещения функции сердца // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 58–68. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-58-68

Mechanical Circulatory Support Systems Reliability Prediction and Assessment

D.V. Telyshev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
FSAEI HE I.M. Sechenov First MSMU MOH Russia (Sechenovskiy University), Moscow, Russia

telyshev@bms.zone

Abstract: Modern ventricular assist devices (VAD), the devices for mechanical replacement of the cardiac function represent complex biotechnological systems. In addition to implantable parts, such system includes the peripherals, which are represented by various electronic modules, designed to provide precise control, management and uninterrupted operation of VAD. Therefore, the durability of the device is determined by the reliability of the VAD modules and elements. One of the major tasks during the development of VAD is an increase of reliability in these devices for the mechanical replacement of cardiac function. Herein, in the work the architectural designing of three versions of VAD has been performed. The structural circuit has been developed and the calculation of reliability for the given data of the architectural designs has been performed. The mathematical model of reliability in the form of a graph has been built and the system of differential equations for probability states has been solved. The calculation of the operation trouble-free probability for five particular cases of the architectural designs depending on the complexity of the technical cases has been performed. The work results have shown that with an increase of the complexity of the technical solutions the decrease of the probability of the trouble-free operation has been observed, as the probability of failure-free operation of the given system elements increases. The reliability in VAD depends on the probability of the failure-free operation of the system elements without possibility of reservation. An increase of the VAD architectural solution has been achieved by the duplication of the main functional blocks and by the decrease of the system complexity of the elements without reservation.

Keywords: VAD; reliability; steady state availability (*AS*)

Funding: this study has been supported by the grant from Russian Federal Property Fund and the German research community (project № 19-51-45001).

For citation: Telyshev D.V. Mechanical circulatory support systems reliability prediction and assessment. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 58–68. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-58-68

Введение. При разработке современных аппаратов механического замещения функции сердца (АМЗФС) особое внимание уделяется таким параметрам, как эффективность поддержки кровообращения [1], гемосовместимость [2], минимизация риска тромбоза [3], анатомическое удобство имплантации, технологическая возможность

производства. Данные параметры являются ключевыми, и от них зависит качество жизни пациентов. Современные АМЗФС – сложные биотехнические системы, в состав которых, помимо имплантируемых частей, входит периферия, представленная различными электронными модулями для обеспечения контроля, управления и бесперебойной работы АМЗФС.

Согласно последним исследованиям [4], проведенным с апреля 2004 по май 2016 г., выход из строя и неполадки в АМЗФС обусловлены в 30 % случаев поломкой модуля управления (МУ), в 23 % – выходом из строя блока питания, в 14 % – повреждением кабеля и лишь в 13 % случаев поломками имплантируемых частей. Таким образом, около 60 % отказов обусловлено сбоями в периферии. Одноцентровое исследование [5], проведенное с 2011 по 2016 г., показало, что у 22 пациентов с АМЗФС выполнено 45 замен МУ и 128 замен блока питания перезаряжаемого (БПП).

Полученные результаты ставят перед исследователями и разработчиками задачи совершенствования периферии, прогнозирования и оценки надежности в АМЗФС с целью минимизации рисков сбоя в работе, выхода из строя и расширения возможностей удобства их использования.

Цель настоящей работы – оценка вариантов исполнения периферии АМЗФС для выбора наиболее надежного.

Архитектурное проектирование АМЗФС. Ключевые требования к отказоустойчивости сформулированы в стандарте ИСО [6]. Согласно требованиям данного стандарта, активные имплантируемые медицинские устройства должны быть сконструированы таким образом, чтобы выход из строя любого одного компонента, части или программы не создавал недопустимую опасность. Изготовитель должен предопределить и описать надежность конструкции в заданных условиях, определить все критические компоненты и конструкции.

На рис.1 представлено классическое расположение АМЗФС: имплантируемый насос крови посредством чрескожного кабеля подключен к внешнему МУ, который, в свою очередь, соединен с двумя БПП. Данное архитектурное решение принято за базовое (вариант 1). Необходимость двух БПП обусловлена требованием к процессу замены БПП без нарушения параметров вращения электродвигателя имплантируемого насоса крови. Исполнение БПП отдельно от МУ позволяет оперативно заменять весь комплект БПП. Структурная схема надежности данного архитектурного решения, согласно [7], представлена на рис.2,*а*. Схема показывает логическую связь между элементами, необходимую для работы системы.



Рис.1. Носимые компоненты АМЗФС
Fig.1. Wearable components ventricular assist devices

Выход из строя МУ создает недопустимую опасность, что неприемлемо для АМЗФС, и необходима замена МУ. С целью устранения данной проблемы предлагается архитектурное решение (вариант 2), структурная схема надежности которого представлена на рис.2,*б*. В отличие от ва-

рианта 1 здесь имеется резервный МУ, отслеживающий работу основного МУ и в случае отказа берущий на себя функции управления. На рис.2,*в* представлено архитектурное решение (вариант 3), кардинально отличающееся от вариантов 1 и 2. В данном варианте предполагается полное резервирование функций управления и мониторинга посредством использования двух равнозначных модулей, выполняющих функции МУ и БПП. Для коммутации двух МУ с функцией БПП используется сплиттер (СП).

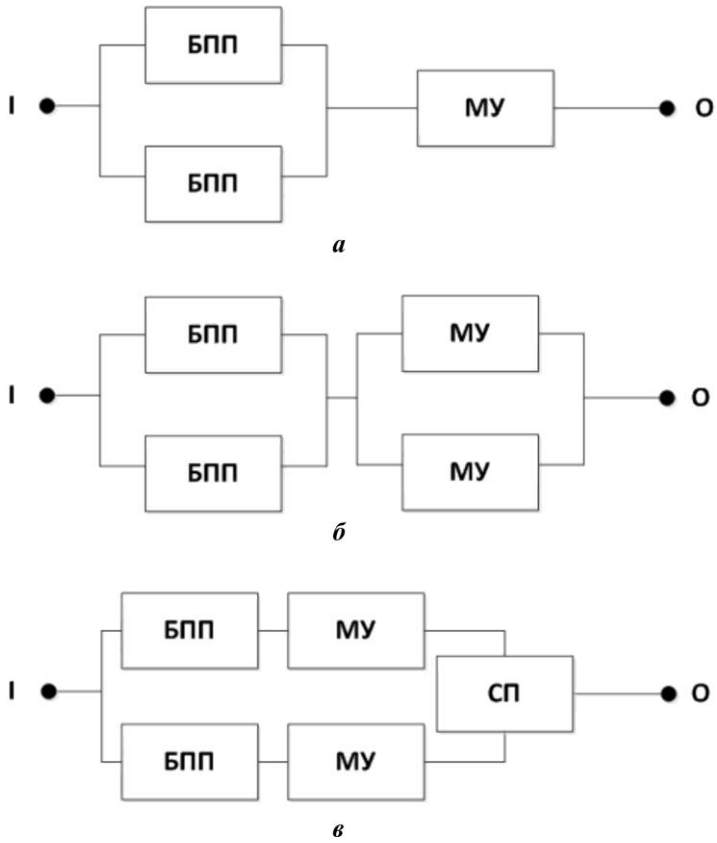


Рис.2. Структурные схемы надежности архитектурных решений:
а – вариант 1; *б* – вариант 2; *в* – вариант 3
Fig.2. Structural diagrams of the reliability of architectural solutions:
a – option 1; *b* – option 2; *c* – option 3

Расчет надежности выбранных архитектурных решений АМЗФС. Согласно [8] надежностью называется свойство технической системы выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения устанавливаемых эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортировки. Одним из ключевых параметров технической системы является ее работоспособность, поэтому при расчете ее надежности необходимо ввести определение работоспособного состояния системы. В рамках расчета надежности используется следующее определение: работоспособное состояние – это состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации [9].

Сбои и отказы в технической системе возникают случайным образом и описываются по законам теории вероятностей и математической статистики. В работе используется экспоненциальный закон времени безотказной работы, или экспоненциальный закон

надежности, который применяется при расчете надежности современных технических систем и систем управления, где первичные элементы высоконадежные [10]. В представленной структуре отказ элемента (блока) системы является статистически независимым. Иными словами, отказ любого элемента системы не повышает вероятности отказа другого элемента системы. Для расчета вероятности безотказной работы устройства используется Булева алгебра и составляется таблица истинности (табл.1).

Таблица 1

Таблица истинности архитектурного решения согласно варианту 1

Table 1

The truth table of option 1 of the architectural solution

Номер системы	Элемент			Состояние системы
	БПП	БПП	МУ	
1	1	1	1	1
2	1	1	0	0
3	1	0	1	1
4	1	0	0	0
5	0	1	1	1
6	0	1	0	0
7	0	0	1	0
8	0	0	0	0

Примечание: 1 – работоспособный элемент; 0 – отказавший элемент.

Из табл.1 видно, что система находится только в трех работоспособных состояниях из восьми возможных.

Рассматриваемые архитектурные решения АМЗФС относятся к восстанавливаемым системам, что обусловлено возможностью замены БПП для вариантов 1 и 2 и замены МУ со встроенным БПП для варианта 3. Поэтому целесообразно применять графы расчета надежности для данного класса систем. При расчете показателей надежности восстанавливаемых систем используются следующие допущения [10]: экспоненциальное распределение времени отказов и экспоненциальное распределение времени восстановления.

Для марковских процессов при расчете надежности восстанавливаемых систем широкое применение получил метод дифференциальных уравнений для вероятностных состояний (уравнений Колмогорова). Сначала строится математическая модель надежности в виде графа вероятности нахождения системы в одном из возможных состояний. Для варианта 1 архитектурного решения имеются восемь возможных состояний (см. табл.1). На рис.3 представлен граф состояний для данной системы. Серым цветом выделены работоспособные состояния системы. Поскольку для данной системы применим экспоненциальный закон надежности, справедливы следующие равенства:

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{р}}}; \quad \mu = \frac{1}{T_{\text{в}}},$$

где λ – интенсивность отказов; $T_{\text{р}}$ – время безотказной работы (работоспособности); μ – интенсивность восстановления; $T_{\text{в}}$ – время восстановления.

При построении графа не учитывается интенсивность восстановления МУ, поскольку для варианта 1 архитектурного решения выход из строя МУ означает состояние, в котором система не подлежит восстановлению.

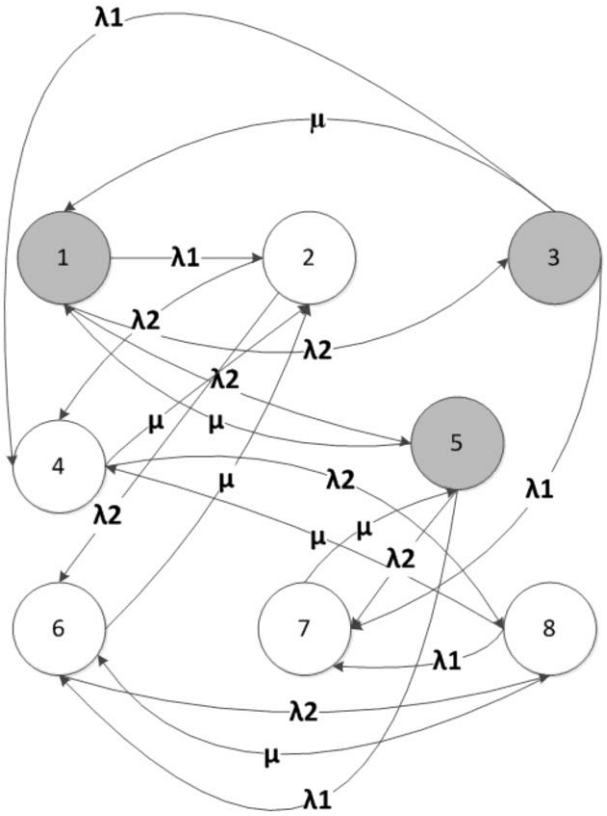


Рис.3. Граф состояний для архитектурного решения согласно варианту 1: λ1 – интенсивность отказов МУ; λ2 – интенсивность отказов БПП; μ – интенсивность восстановления БПП
Fig.3. State graph of option 1 of the architectural solution: λ1 is the failure rate of CM, λ2 is the failure rate of the power unit; μ is the recovery rate of the power unit

Далее на основе графа состояний, приведенного на рис.3, составляется система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = \mu\left(P_3 + P_5\right) - \left(2\lambda_2 + \lambda_1\right)P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_1 P_1 + \mu\left(P_4 + P_6\right) - 2\lambda_2 P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_2 P_1 - \left(\mu + 2\lambda_1\right)P_3, \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_2 P_2 + \lambda_1 P_3 + \mu P_8 - \left(\mu + \lambda_2\right)P_4, \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_2 P_1 + \mu P_7 - \left(\mu + \lambda_1 + \lambda_2\right)P_5, \\ \frac{dP_6}{dt} = \lambda_1 P_5 + \mu P_8 + \lambda_2 P_2 - \left(\mu + \lambda_2\right)P_6, \\ \frac{dP_7}{dt} = \lambda_1 P_3 + \lambda_2 P_5 - \left(\mu + \lambda_1\right)P_7, \\ \frac{dP_8}{dt} = \lambda_2\left(P_4 + P_6\right) + \lambda_1 P_7 - 2\mu P_8. \end{cases} \quad (1)$$

При решении системы уравнений (1) учитывается, что в любой момент времени возможно только одно из представленных состояний, поэтому в систему добавляется еще одно уравнение:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 = 1,$$

а последнее уравнение вычеркивается.

Система уравнений (1) решается численно с использованием метода Эйлера для решения системы дифференциальных уравнений. Начальные условия системы представлены в следующем виде:

$$P_1(0) = 1, \quad P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = 0.$$

Граф состояний на рис.3 и система дифференциальных уравнений (1) верны и для вариантов 2 и 3. Для варианта 2 проведено резервирование МУ без восстановления. Это позволяет использовать формулу расчета среднего времени работы до отказа [10] резервированной группы из n элементов при постоянно включенном (нагруженном) резерве:

$$T_{\text{р}} = \frac{1}{\lambda}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{n-i+1}.$$

Исходя из данного выражения, получаем интенсивность отказов МУ при резервировании для варианта 2:

$$\lambda_{1\text{р}} = \frac{1}{T_{\text{р}}} = \frac{2}{3}\lambda_1.$$

Для численного решения системы (1) необходимо определить параметры интенсивности отказов и интенсивности восстановления элементов. Воспользуемся работой [11] для расчета интенсивности отказов и восстановления отдельных элементов МУ, БПП и СП. Согласно [11] основное расчетное соотношение для вероятности безотказной работы устройства получают из предположения, что все элементы электрической схемы соединены последовательно. Учитывая данное предположение и гипотезу о возможности применения экспоненциального закона надежности, вероятность безотказной работы элемента системы, состоящего из N компонентов, за время t определим следующим выражением:

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t}\cdot e^{-\lambda_2 t}\cdot \ldots \cdot e^{-\lambda_N t} = e^{-t\sum_{i=1}^{N}\lambda_i},$$

где λ_i – интенсивность отказа i-го элемента.

Из данного выражения следует формула определения интенсивности отказа элемента системы, состоящего из N компонентов:

$$\lambda = \sum_{i=1}^{N}\lambda_i.$$

В табл.2 приведена интенсивность отказов отдельных компонентов [11], входящих в состав системы. Компоненты и их количество соответствуют возможному исполнению МУ, БПП и СП. Из таблицы видно, что интенсивность отказа СП на порядок ниже интенсивности отказа МУ, что позволяет говорить о значительном повышении надежности при использовании варианта 3 архитектурного решения.

Таблица 2

Интенсивность отказов отдельных компонентов

Table 2

Failure rate of individual components

Компонент	Интенсивность отказов λ, $ч^{-1}$	Количество компонентов в элементе		
		МУ	БПП	СП
Интегральные микросхемы средней степени интеграции	$5{,}85\cdot10^{-9}$	15	2	0
Интегральные микросхемы большой степени интеграции	$1{,}51\cdot10^{-8}$	4	2	0
Микроконтроллер	$6{,}57\cdot10^{-8}$	2	0	0
Резисторы	$1{,}20\cdot10^{-9}$	150	20	18
Конденсаторы	$2{,}10\cdot10^{-9}$	100	15	0
Индуктивности	$2{,}80\cdot10^{-9}$	16	0	0
Диоды	$1{,}10\cdot10^{-9}$	25	6	0
Транзисторы	$6{,}47\cdot10^{-8}$	20	6	0
Соединения пайкой	$6{,}90\cdot10^{-11}$	1500	156	82
Провода	$2{,}00\cdot10^{-7}$	1	0,50	0,80
Соединители неразъемные (печатный монтаж)	$4{,}10\cdot10^{-9}$	150	0	0
Соединители неразъемные (объемный монтаж)	$2{,}90\cdot10^{-8}$	4	1	3
Соединители разъемные	$1{,}50\cdot10^{-7}$	1	0	1
Индикатор графический	$2{,}10\cdot10^{-7}$	1	0	0
Элемент аккумуляторный Li-Ion	$7{,}00\cdot10^{-5}$	0	8	0
Диоды излучающие	$3{,}40\cdot10^{-8}$	2	0	0
Излучатель звуковой	$9{,}00\cdot10^{-8}$	1	0	0
Микропереключатели	$2{,}00\cdot10^{-7}$	3	0	0
Итого для элементов системы МУ БПП СП	 $4{,}19\cdot10^{-6}$ $5{,}61\cdot10^{-4}$ $4{,}24\cdot10^{-7}$	–	–	–

Результаты и их обсуждение. Рассчитаем вероятность безотказной работы для пяти технических решений в зависимости от уровня их сложности. В табл.3 представлены значения интенсивности отказов для данных решений. Интенсивность восстановления БПП для всех случаев равна 10 $ч^{-1}$, что соответствует 6 мин – среднему времени, необходимому для замены отказавшего элемента на резервный. Введем следующие обозначения: $\lambda_{1СП}$ – интенсивность отказов сплиттера, $\lambda_{2МУ\ БПП}$ – интенсивность отказов МУ с функцией БПП для варианта 3. Поскольку МУ и БПП в варианте 3 (см. рис.1) соединены последовательно, то справедливо следующее равенство:

$$\lambda_{2МУ\ БПП} = \lambda_1 + \lambda_2.$$

Вероятность безотказной работы *SA* для пяти технических решений, согласно табл.3, представлена на рис.4 и вычисляется по формуле

$$SA = P_1(t) + P_3(t) + P_5(t).$$

Таблица 3

Частные случаи интенсивности отказов элементов в зависимости от сложности технических решений

Table 3

Special cases of failure rate of elements depending on the complexity of technical solutions

Техническое решение	λ_1, ч$^{-1}$	λ_2, ч$^{-1}$	$\lambda_{1р}$, ч$^{-1}$	$\lambda_{2МУ\ БПП}$, ч$^{-1}$	$\lambda_{1СП}$, ч$^{-1}$
1	$1\cdot10^{-6}$	$1\cdot10^{-4}$	$0{,}66\cdot10^{-6}$	$1{,}01\cdot10^{-6}$	$1\cdot10^{-7}$
2	$1\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-3}$	$0{,}66\cdot10^{-5}$	$1{,}01\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-6}$
3	$1\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-2}$	$0{,}66\cdot10^{-4}$	$1{,}01\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-5}$
4	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-2}$	$0{,}66\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-4}$
5	$1\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-2}$	$0{,}66\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-3}$

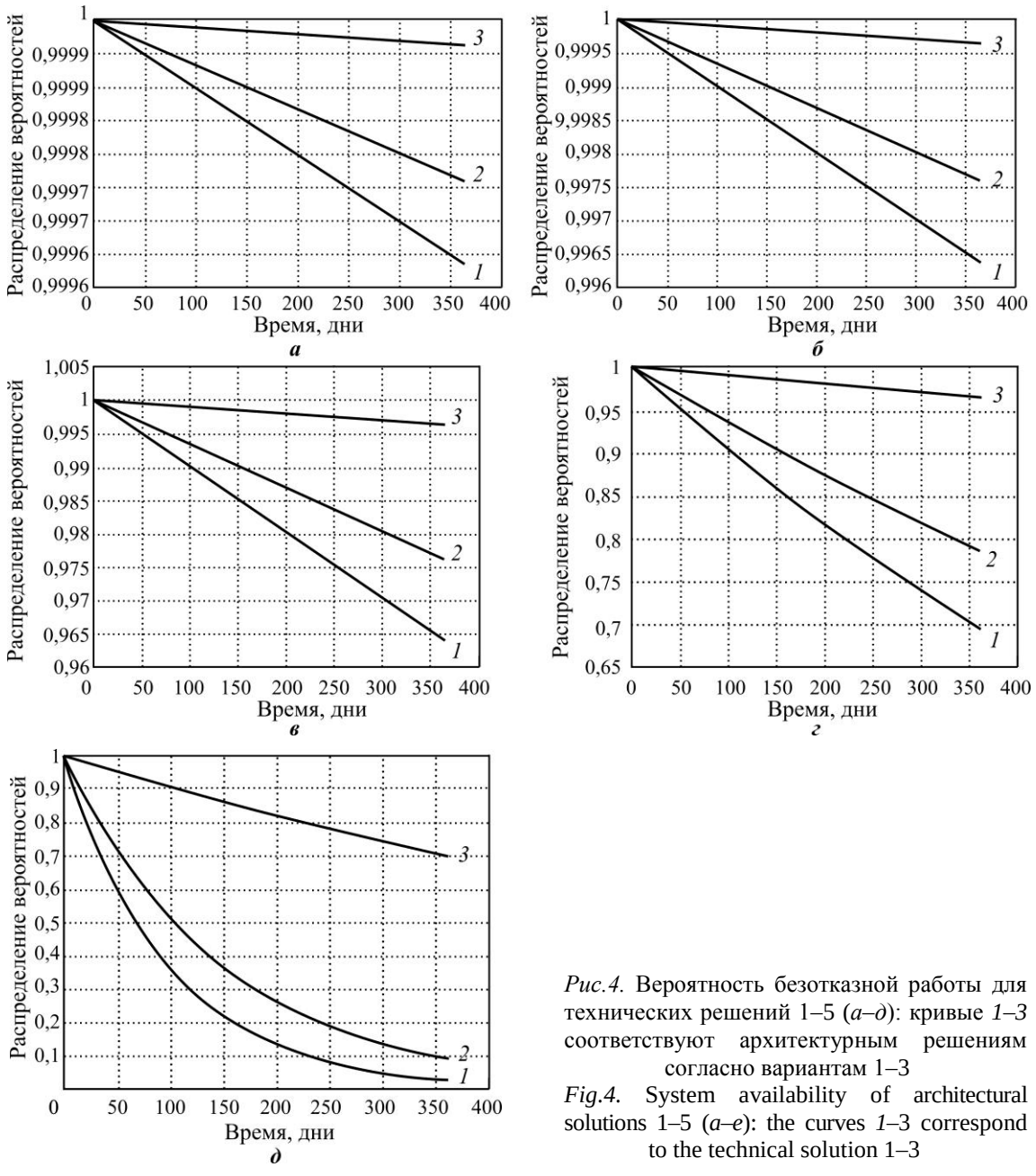


Рис.4. Вероятность безотказной работы для технических решений 1–5 (*а–д*): кривые *1–3* соответствуют архитектурным решениям согласно вариантам 1–3

Fig.4. System availability of architectural solutions 1–5 (*a–e*): the curves *1*–3 correspond to the technical solution 1–3

Заключение. Приведенные результаты показывают, что с повышением уровня сложности технического решения наблюдается снижение вероятности безотказной работы, поскольку повышается вероятность выхода из строя элементов данной технической системы. При полном резервировании управления и мониторинга с использованием двух равнозначных модулей, берущих на себя функции МУ и БПП, наблюдается наибольшая вероятность безотказной работы. Данное архитектурное решения взято за основное при проектировании АМЗФС, поскольку позволяет снизить риск использования СВК до приемлемого, исключить выход из строя СВК из-за сбоя в одном из компонентов и в результате повысить общую надежность системы.

Литература

1. ***Lim H.S., Howell N., Ranasinghe A.*** The physiology of continuous flow left ventricular assist devices // Journal of Cardiac Failure. 2016. Vol. 23. No. 2. P. 169–180.

2. The CentriMag centrifugal blood pump as a benchmark for in vitro testing of hemocompatibility in implantable ventricular assist devices / ***C.H. Chan, I.L. Pieper, R. Hambly et al.*** // Artif Organs. 2015. Vol. 39. No. 2. P. 93–101.

3. ***Shah P., Tantry U.S., Bliden K.P., Gurbel P.A.*** Bleeding and thrombosis associated with ventricular assist device therapy: A state of the art review bleeding and thrombosis in LVADs // Journal of Heart and Lung Transplantation. 2017. Vol. 36. No. 11. P. 1164–1173.

4. Left ventricular assist device malfunctions: It's more than just the pump / ***R. Kormos, M. McCall, A. Althouse et al.*** // Circulation. 2017. Vol. 136. No. 18. P. 1714–1725.

5. Controller and battery changes due to technical problems related to the HVAD® left ventricular assist device – a single center experience / ***E. Najjar, A.H. Kristensen, T. Thorvaldsen et al.*** // Journal of Cardiothoracic Surgery. 2018. Vol. 13. No. 1. 6 p.

6. ISO 14708-5. Implants for surgery – Active implantable medical devices – Part 5: Circulatory support devices. 2010.

7. ГОСТ Р 51901.14-2005. Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности (IEC 61078:1991. Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram method). М.: Стандартинформ, 2005. 18 с.

8. ***Матвеевский В.Р.*** Надежность технических систем: учеб. пособие. М.: МИЭМ, 2002. 113 с.

9. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. URL: https://allgost.ru/03/120/gost_27.002-89.pdf (дата обращения: 20.09.2019).

10. ***Шкляр В.Н.*** Надежность систем управления: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 126 с.

11. ***Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д.*** Расчет показателей надежности радиоэлектронных устройств: учеб.-метод. пособие. Минск: БГУИР, 2010. 68 с.

Поступила в редакцию 26.09.2019 г.; после доработки 26.09.2019 г.; принята к публикации 19.11.2019 г.

Телышев Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной деятельности Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), директор Института бионических технологий и инжиниринга ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) (Россия, 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2), telyshev@bms.zone

References

1. Lim H.S., Howell N., Ranasinghe A. The physiology of continuous flow left ventricular assist devices. *Journal of Cardiac Failure*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 169–180.

2. Chan C.H., Pieper I.L., Hambly R., Radley G., Jones A., Friedmann Y. et al. The CentriMag centrifugal blood pump as a benchmark for in vitro testing of hemocompatibility in implantable ventricular assist devices. *Artif Organs*, 2015, vol. 39, no. 2, pp. 93–101.

3. Shah P., Tantry U.S., Bliden K.P., Gurbel P.A. Bleeding and thrombosis associated with ventricular assist device therapy: A state of the art reviewBleeding and Thrombosis in LVADs. *Journal of Heart and Lung Transplantation*, 2017, vol. 36, no. 11, pp. 1164–1173.

4. Kolmos R., Mc. Call M., Althouse A. et al. Left ventricular assist device malfunctions: it's more than just the pump. *Circulation*, 2017, vol. 136, no. 18, pp. 1714–1725.

5. Najjar E., Kristensen A.H., Thorvaldsen T., Hubbert L., Svenarud P., Dalen M., Broberg A.M., Lund L.H. Controller and battery changes due to technical problems related to the HVAD® left ventricular assist device – a single center experience. *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 2018, vol. 13, no. 1. 6 p.

6. ISO 14708-5. Implants for surgery – Active implantable medical devices. Part 5: Circulatory support devices. 2010.

7. *IEC 61078:1991. Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram method*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 18 p.

8. Matveevsky V.R. *Reliability of technical systems: textbook. Allowance*. Moscow, MIEM Publ., 2002. 113 p. (in Russian).

9. *GOST 27.002-89. Reliability in technology. Basic concepts. Terms and Definitions*. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. (in Russian). Available at: https://allgost.ru/03/120/gost_27.002-89.pdf (accessed 20.09.2019).

10. Shklyar V.N. *Reliability of control systems: textbook allowance*. Tomsk, Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2009. 126 p. (in Russian).

11. Borovikov S.M., Tsyrelchuk I.N., Troyan F.D. *Calculation of reliability indicators of electronic devices: textbook.-method. Allowance.* Minsk, BSUIR Publ., 2010. 68 p.

Received 26.09.2019; Revised 26.09.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the author:

Dmitry V. Telyshev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Deputy Director for Research of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Director of the Institute for Bionic Technologies and Engineering, FSAEI HE I.M. Sechenov First MSMU MOH Russia (Sechenovskiy University) (Russia, 119991, Moscow, Trubetskaya st., 8, build. 2), telyshev@bms.zone

Уважаемые авторы!

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

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
BRIEF REPORTS

УДК 621.315.592.3:546.28’65 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-69-72**

Влияние термического воздействия на электрофизические свойства кремния, легированного редкоземельными элементами

С. Зайнабидинов[1], Д.Э. Назиров[2]

[1]Андижанский университет Узбекистана имени Мирзо Бабура, г. Андижан, Узбекистан
[2]Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, г. Ташкент, Узбекистан

anddu_rector@edu.uz

Эффективность примесей редкоземельных элементов в кремнии и проявление оптических свойств структур зависят от спектра оптически и электрически активных центров, содержащих редкоземельные элементы, их общей концентрации, а также от взаимодействия с неконтролируемыми примесями и с термическими дефектами в объеме материала. В работе проведено исследование влияния редкоземельных элементов на термическое дефектообразование в кремнии *n*-типа методами нейтронно-активационного анализа, ИК-спектроскопии, изотермической релаксации емкости. Для изучения глубоких уровней, расположенных в нижней половине запрещенной зоны *n*-Si, применена оптическая перезарядка. Исследованы электрофизические свойства монокристаллов *n*-Si, легированных при выращивании самарием, гадолинием и иттербием при термическом воздействии. Показано, что наличие этих элементов в кремнии при термообработке в интервале температур 900–1200 °С в течение 2 ч на воздухе и в откачанных ампулах с последующей закалкой или медленным охлаждением подавляет высокотемпературные дефекты.

Ключевые слова: полупроводник; кремний; *n*-Si; эффекты термических воздействий; электрофизические свойства; легирование кремния Sm, Gd и Yb при выращивании; термическая обработка кремния

Для цитирования: Зайнабидинов С., Назиров Д.Э. Влияние термического воздействия на электрофизические свойства кремния, легированного редкоземельными элементами // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 69–72. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-69-72

The Effect of Thermal Treatments on the Electrophysical Properties of Silicon Doped by Rare-Earth Elements

S. Zaynabidinov[1], D.E. Nazirov[2]

[1]Mirzo Babur University of State Andijan, Andijan, Uzbekistan
[2]Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

anddu_rector@edu.uz

Abstract: The efficiency of admixtures of rare-earth elements in silicon, an exhibition of the structures optical properties depends on the spectrum of optically and electrically

© С. Зайнабидинов, Д.Э. Назиров, 2020

active centers, containing rare-earth elements, their total concentration as well as on the interaction with the non-controllable admixtures and with thermal defects in the bulk of the material. In present work the investigations have been performed by the methods of the neutron-activation analysis, IR-spectroscopy, isothermal relaxation of the content. For studying the deep levels, located in the lower half of the prohibited zone n-Si the optical re-charging, has been applied. The influence of thermal treatments on the electrophysical properties of n-type silicon, doped by samarium, gadolinium and ytterbium during growing, has been investigated. It has been shown that the presence of these elements in silicon during the heat treatment in the temperature range 900–1200 ºC for 2 hours in the air and in the pumped out ampoules with subsequent quenching or slow cooling suppresses the high-temperature defects.

Keywords: semiconductor; silicon; n-type silicon; the influence of thermal effects; electrophysical properties; doped with Sm, Gd, and Yb during growth was studied; silicon during heat treatments

For citation: Zaynabidinov S., Nazirov D.E. The effect of thermal treatments on the electrophysical properties of silicon doped by rare-earth elements. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 69–72. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-69-72

Кремний, легированный редкоземельными элементами (РЗЭ), привлекает большое внимание исследователей как перспективный материал для кремниевой оптоэлектроники в качестве источников света. Как известно, эффективность примесей РЗЭ в кремнии, проявление оптических свойств структур зависят как от спектра оптически и электрически активных центров, содержащих РЗЭ, их общей концентрации, так и от их взаимодействия с неконтролируемыми примесями, а также с термическими дефектами в объеме материала [1–4].

Цель настоящей работы – исследование влияния самария (Sm), гадолиния (Gd) и иттербия (Yb) на термическое дефектообразование в Si. Исследования проводили методами нейтронно-активационного анализа, ИК-спектроскопии, изотермической релаксации емкости. Для изучения глубоких уровней (ГУ), расположенных в нижней половине запрещенной зоны *n*-Si, применена оптическая перезарядка. Исследовали образцы монокристаллов *n*-Si, легированные Sm, Gd и Yb при выращивании по методу Чохральского, с удельным сопротивлением 15 Ом·см. Образцы вырезали из шайбы в виде параллелепипедов размером 12×6×2 мм. Контрольные образцы кремния с такими же удельными сопротивлениями, но без примесей РЗЭ выращены в тех же условиях. Концентрации примесей РЗЭ в Si, определенные по методу нейтронно-активационного анализа, составили $N_{РЗЭ}$ = $5\cdot10^{15}$–$5\cdot10^{19}$ см$^{-3}$. С помощью ИК-микроскопии в образцах выявлено образование дислокаций.

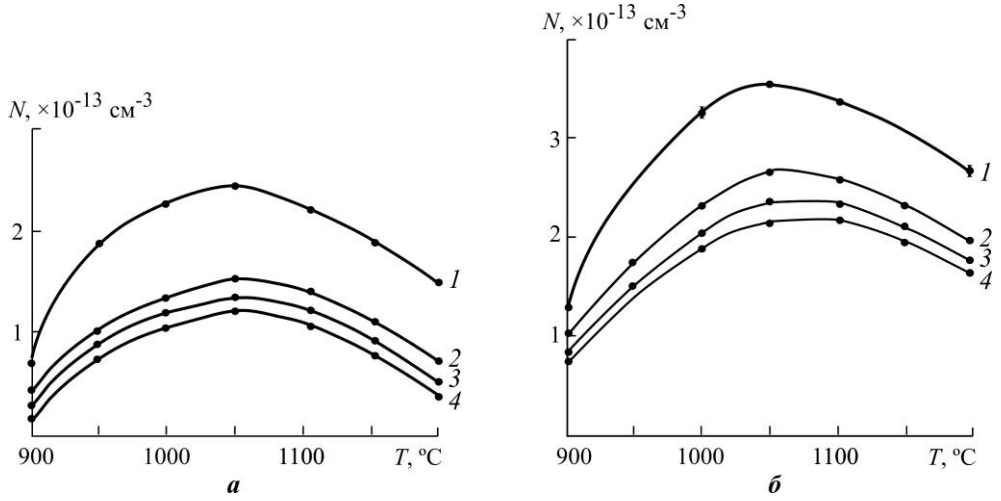
При концентрациях исследуемых РЗЭ в Si более 10^{16} см$^{-3}$ начинается выпадение второй фазы [2]. Результаты электрических измерений показывают, что Sm, Gd и Yb в Si в исходном состоянии находятся в электрически неактивном состоянии. При термической обработке в интервале 900–1200 °С в течение 2 ч на воздухе и в откачанных ампулах с последующей закалкой или при медленном охлаждении преципитация кислорода меньше в Si<РЗЭ>, чем в контрольных образцах. Результаты изотермической релаксации емкости показывают, что Sm, Gd и Yb в Si при термической обработке выступают в качестве геттера для неконтролируемых примесей и структурных дефектов.

Концентрации ГУ с энергиями E_c – 0,17 эВ, E_c – 0,2 эВ, E_c – 0,32 эВ, E_c – 0,41 эВ, E_v+0,4 эВ в образцах Si<РЗЭ> намного меньше, чем в контрольных образцах, прошедших соответствующие этапы термической обработки. Термическая обработка в интервале температур 1373–1473 К в течение 2 ч с последующей закалкой в масле или при медленном охлаждении приводит к компенсации во всех образцах Si<РЗЭ>. Вследствие этого методом изотермической релаксации емкости в образцах в интервале температур 77–300 К не обнаружено перезарядки каких-либо центров ($N_d < 5\cdot10^{11}$ см$^{-3}$), т.е. измеряемая емкость барьеров Шоттки C_b, изготовленных на основе Si<РЗЭ> с концентрацией $N_{РЗЭ} \geq 5\cdot10^{16}$ см$^{-3}$, не зависит от величины приложенного напряжения до температур ~ 80 К. Для образцов с концентрацией $N_{РЗЭ} \geq 10^{17}$ см$^{-3}$ этого не происходит до температуры 100 К, т.е. $C_b \sim C_h$, где C_h – геометрическая емкость образца. При этом степень компенсации в быстроохлажденных образцах была высокой.

Термическая обработка при 1173 К и более приводит к уменьшению концентрации ионизованных центров в образцах Si, легированных исследуемыми примесями РЗЭ, от $3\cdot10^{14}$ до $2{,}6\cdot10^{14}$ см$^{-3}$. Однако образования ГУ, связанных с РЗЭ, в запрещенной зоне Si не обнаружено, хотя их косвенное влияние распространялось на концентрацию большинства наблюдаемых ГУ. Следовательно, можно предположить, что Sm, Gd и Yb образуют мелкие акцепторные уровни в нижней половине запрещенной зоны Si, что подтверждает их акцепторную природу. В контрольных образцах после термических обработок в интервале температур 1173–1473 К выявлены следующие ГУ с энергиями: E_c – (0,17–0,22) эВ, E_c – 0,4 эВ, E_c – 0,54 эВ, E_v + 0,2 эВ, E_v + 0,4 эВ, параметры которых совпадают с известными литературными данными [5]. Концентрация всех этих термических центров не превышала ~ $5\cdot10^{13}$ см$^{-3}$.

В случае термических обработок образцов *n*-Si<РЗЭ> в откачанных кварцевых ампулах, в отличие от отожженных на воздухе, обнаруживаются все ГУ, наблюдаемые в контрольных образцах *n*-Si. При этом их концентрация обычно не превышает ~ $(2–3)\cdot10^{13}$ см$^{-3}$, за исключением центра с ГУ E_v + 0,4 эВ, для которого сечение захвата электронов $\sigma_n \sim 10^{-14}$ см$^{-2}$, в контрольных образцах его концентрация достигает $(3–4)\cdot10^{14}$ см$^{-3}$, а в легированном РЗЭ кремнии составляет порядка $1\cdot10^{14}$ см$^{-3}$. Как известно, этот донорный ГУ связывают с примесью железа [5].

Таким образом, примеси Sm, Gd и Yb подавляют образование как ГУ, связанных с быстродиффундирующими неконтролируемыми примесями Au, так и Fe, а также других термических центров с уровнями E_c – 0,17 эВ (рисунок *а*) и E_c – 0,4 эВ (рисунок *б*), концентрации которых зависят от температуры обработок и от наличия РЗЭ в Si [3,7–9]. Присутствие Sm, Gd и Yb в кремнии уменьшает концентрацию этих термических центров в 2–4 раза и подавляет высокотемпературные термические дефекты. Чем больше концентрация примесей РЗЭ в Si, тем больше степень компенсации образцов и степень подавления термических дефектов.



Зависимости концентрации термических центров с ГУ E_c – 0,17 эВ (*а*), E_c – 0,4 эВ (*б*) от температуры обработки: *1* – *n*-Si; *2* – *n*-Si<Gd>; *3* – *n*-Si<Sm>; *4* – *n*-Si<Yb>; $N_{РЗЭ} = 3\cdot10^{18}$ см$^{-3}$

The dependences of the concentration of thermal centers with a TD E_c – 0.17 eV (*a*), E_c – 0.4 eV (*b*) on the treatment temperature: *1* – *n*-Si; *2* – *n*-Si<Gd>; *3* – *n*-Si<Sm>; *4* – *n*-Si<Yb>; $N_{REE} = 3\cdot10^{18}$ cm^{-3}

Результаты измерений времени жизни неосновных носителей заряда $\tau_{ННЗ}$ в Si, легированном примесями Sm, Gd и Yb при выращивании, показывают, что наличие этих примесей приводит к повышению стойкости образцов при термических обработках, тем самым повышаются значения $\tau_{ННЗ}$ относительно контрольных в 2–4 раза.

Подавление термических дефектов может быть обусловлено очищением объема Si от неконтролируемых быстродиффундирующих примесей, их геттерированием примесями Sm, Gd и Yb или образованием комплексов РЗЭ+дефект акцепторной природы, а также активным взаимодействием РЗЭ с кислородом в Si. В результате исследований ИК-поглощения в Si<РЗЭ> получено, что эф-

фективное взаимодействие РЗЭ с кислородом в Si начинается с концентраций $N_{РЗЭ} \geq 5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$, что, возможно, указывает на наличие в объеме Si включений второй фазы РЗЭ, а также их силицидов, действующих как стоки для неконтролируемых и технологических примесей.

Литература

1. ***Назыров Д.Э., Регель А.Р., Куликов Г.С.*** Кремний, легированный редкоземельными элементами: Препринт ЛФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР №1122. Л., 1987. 56 с.

2. ***Фистуль В.И.*** Атомы легирующих примесей в полупроводниках. М.: Физматлит, 2004. 432 с.

3. ***Libertino S.*** The effects of oxygen and defects on the deep-level properties of Er in crystalline Si // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 78. No. 6. P. 3867–3873.

4. Erbium doping in silicon by thermal in diffusion / ***E. Wong, H. Liu, Sh.Q. Man et al.*** // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. Vol. 37. No. 6B. P. 3669–3672.

5. ***Назыров Д.Э.*** Геттерирование золота самарием и гадолинием в кремнии // Электронная обработка материалов. 2007. № 3 (245). С. 77–82.

6. ***Назыров Д.Э., Базарбаев М.И., Иминов А.А.*** Диффузия иттрия в кремнии // Физика и техника полупроводников. 2006. Т.40. Вып. 7. С. 788–789.

7. ***Назыров Д.Э.*** Диффузия иттербия в кремнии // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1056–1057.

8. ***Назыров Д.Э., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш***. Диффузия эрбия и тулия в кремнии // Физика и техника полупроводников. 1991. Т. 25. Вып. 9. С. 788–789.

9. ***Зайнабидинов С., Назыров Д.Э.*** Диффузия, растворимость и электрические свойства скандия и празеодима в кремнии // Изв. вузов. Физика. 2007. № 1. С. 75–77.

Поступило в редакцию 17.06.2019 г.; после доработки 17.06.2019 г.; принято к публикации 19.11.2019 г.

Зайнабидинов Сиражиддин – академик Академии Республики Узбекистан, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела Андижанского университета Узбекистана имени Мирзо Бабура (Республика Узбекистан, 170100, г. Андижан, ул. Университетская, д. 129), anddu_rector@edu.uz

Назиров Дилшад Эргашевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и полимеров Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека (Республика Узбекистан, 100174, г. Ташкент, ул. Университетская, д. 7), rector@nuu.uz

References

1. Nazyrov D.E., Regel A.R., Kulikov G.S. Silicon, doping rare-earth elements. *Preprint of the A.F. Ioffe Leningrad Physico-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Union of Soviet Socialist Republics* no. 1122., Leningrad, 1987. 56 p. (in Russian).

2. Fistul' V.I. *Atoms of dopants in semiconductors: Monograph*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 432 p. (in Russian).

3. Libertino S. The effects of oxygen and defects on the deep-level properties of Er in crystalline Si. *J. Appl. Phys.* 1995, vol. 78, no. 6, pp. 3867–3873.

4. Wong E., Liu H., Man Sh.Q., Pun E.Y.B., Chung P.Sh. Erbium doping in silicon by thermal in diffusion. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, vol. 37, no. 6B, pp. 3669–3672.

5. Nazyrov D.E. Gettering of gold by samarium and gadolinium in silicon. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007, vol. 43, no. 3, pp. 218–221.

6. Nazyrov D.E., Bazarbaev M.I., Iminov A.A. Diffusion of yttrium in silicon. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, iss.7, pp. 768–769.

7. Nazyrov D.E. Diffusion of ytterbium in silicon. *Semiconductors*, 2003, vol. 37, iss. 9, pp. 1031–1032.

8. Nazyrov D.E., Kulikov G.S., Malkovich R.Sh. Diffusion of erbium and thulium in silicon. *Soviet Physics Semiconductors. USA*, 1991, vol. 25. pp. 997–998.

9. Zainabidinov S., Nazyrov D.E. Diffusion, solubility and electrical properties scandiy and praseodim in silicon. *Russian Physics Journal*, 2007, vol. 50, no.1, pp. 75–77.

Received 17.06.2019; Revised 17.06.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the authors:

Sirojiddin Zainobidinov – Academician of the Academy of the Republic of Uzbekistan, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Solid State Physics Department, Mirzo Babur University of State Andijan (Uzbekistan, 170100, Andijan, University st., 129), anddu_rector@edu.uz

Dilshad E. Nazirov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Physics of Semiconductors and Polymers Department, Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan (Uzbekistan, 100174, Tashkent, University st., 7), rector@nuu.uz

УДК 621.38:621.3.049 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-73-78

Принципы проектирования бортовых многолучевых приемных АФАР систем спутниковой связи

А.Г. Ефимов[1], А.Г. Каменев[1], С.А. Корнеев[2], В.В. Чистюхин[3]

[1]Обособленное подразделение ООО «Ижевский радиозавод» в г. Москве, г. Москва, Россия
[2]АО «Ижевский радиозавод», г. Ижевск, Россия
[3]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

a.efimov@irz.ru

Использование активных фазированных антенных решеток (АФАР) дает возможность перераспределять информационную емкость системы связи сканированием независимых лучей с электронным управлением. Процесс создания АФАР представляет собой решение многофакторной задачи в условиях значительного количества требований и ограничений, предъявляемых к бортовым АФАР в составе космического аппарата. В работе рассмотрены варианты построения многолучевых приемных антенных систем на основе АФАР. Представлены критерии выбора излучателей для антенн различного диапазона и назначения. Приведены оценки энергетических характеристик АФАР Ka-, C-, S-диапазонов. Даны рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости связных систем. Показано, что применение фазовращателей на основе арсенид-галлиевых полевых транзисторов с затвором Шоттки в пассивном включении позволяет снизить мощность потребления по цепям управления без ухудшения технических параметров.

Ключевые слова: СВЧ; приемная АФАР; излучатель; фазовращатель; устройство управления; малошумящий усилитель; полосно-пропускающий фильтр

Для цитирования: Ефимов А.Г., Каменев А.Г., Корнеев С.А., Чистюхин В.В. Принципы проектирования бортовых многолучевых приемных АФАР систем спутниковой связи // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 73–78. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-73-78

Multi-Beam Receiving APAA Space Communication Systems

A.G. Efimov[1], A.G. Kamenev[1], S.A. Korneev[2], V.V. Chistyukhin[3]

[1]JSC «Izhevsky Radiozavod» Moscow, Moscow, Russia
[2]JSC «Izhevsky Radiozavod», Izhevsk, Russia
[3]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

a.efimov@irz.ru

Abstract: The options of constructing the multipath receiving antenna systems based on APAA have been considered. The criteria for the selection of emitters for antennas of different range and purpose have been presented. It has been shown that the use of the phase shifters based on arsenide-gallium FET in the passive inclusion can reduce the consumption of control circuits without deterioration of the technical parameters. The estimates of the energy characteristics of three types of APAA have been given. The recommendations on the electromagnetic compatibility have been presented.

© А.Г. Ефимов, А.Г. Каменев, С.А. Корнеев, В.В. Чистюхин, 2020

Keywords: microwave signal; receiving active phased array antenna; radiator; phase shifter; control module; LNA; band-pass filter

For citation: Efimov A.G., Kamenev A.G., Korneev S.A., Chistyukhin V.V. Multi-beam receiving APAA space communication systems. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 73–78. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-73-78

Использование многолучевых антенн в системах связи позволяет за счет пространственно-частотного разделения расширить зону обслуживания и увеличить количество абонентов. Применение активных фазированных антенных решеток (АФАР) дает возможность перераспределять информационную емкость системы связи сканированием независимых лучей с электронным управлением [1]. Процесс создания АФАР представляет собой решение многофакторной задачи в условиях значительного объема требований и ограничений, предъявляемых к бортовым АФАР в составе космического аппарата, основными из которых являются:

- обеспечение частотных диапазонов и энергетических потенциалов на прием и передачу;
- выбор количества и секторов сканирования лучей;
- минимизация массогабаритных характеристик и мощности потребления от систем электропитания космического аппарата;
- использование специфических интерфейсов управления и телеметрического контроля.

Цель настоящей работы – выявить основные принципы проектирования многолучевых приемных АФАР на современной элементной базе. Для решения поставленной задачи рассмотрим варианты построения многолучевых приемных АФАР разных частотных диапазонов и различной орбиты космического аппарата, обобщенная схема которых представлена на рис.1.

Выбор типа излучателя определяется сектором сканирования и частотным диапазоном антенны с учетом технологичности изготовления. Для получения высокого коэффициента усиления при небольшом секторе сканирования используются рупорные и спиральные излучатели [2]. Для широкоугольного сканирования больше подходят турникетные и плоскопечатные излучатели. Общее усиление антенны определяется усилением единичного излучателя и числом излучателей. Добротность системы на прием G/T_{eff} определяется общим усилением антенны G и эффективной шумовой температурой приемного канала T_{eff} с учетом потерь на входе малошумящего усилителя (МШУ). Следует учитывать, что в некоторых случаях на входе приемного тракта необходимо устанавливать фильтр, потери которого неизбежно повысят интегральную шумовую температуру приемного тракта.

В многолучевых АФАР наиболее многочисленным элементом является фазовращатель. Количество фазовращателей определяется числом приемных каналов N и числом лучей M. Кроме того, скорость переключения фазовых состояний определяет скорость переключения луча, а потребление по цепям управления фазовращателя играет важную роль. Наибольшее распространение получили фазовращатели на основе арсенид-галлиевого полевого транзистора с затвором Шоттки (ПТШ) в пассивном включении. Скорость переключения такого элемента составляет единицы наносекунд, а токи управления определяются токами утечки затвора ПТШ, которые составляют единицы микроампер [3]. Использование арсенида галлия обеспечивает высокую радиационную стойкость и позволяет реализовать функциональные узлы в виде монолитных интегральных схем. Для управления такими фазовращателями требуется отрицательное напряжения для преобразования логических уровней.

В таблице приведены характеристики многолучевых приемных АФАР, которые изготавливаются или проектируются на предприятии АО «Ижевский радиозавод» (Россия).

Антенна Ка-диапазона предназначена для геостационарного ретранслятора, что определяет угол сканирования и выбор тонкостенного рупорного излучателя с линейной поляризацией (рис.2). Каждый одноканальный приемный модуль содержит МШУ и четыре трехразрядных фазовращателя, которые реализованы в виде гибридной ИС на поликоре на основе переключательного ПТШ с балочными выводами.

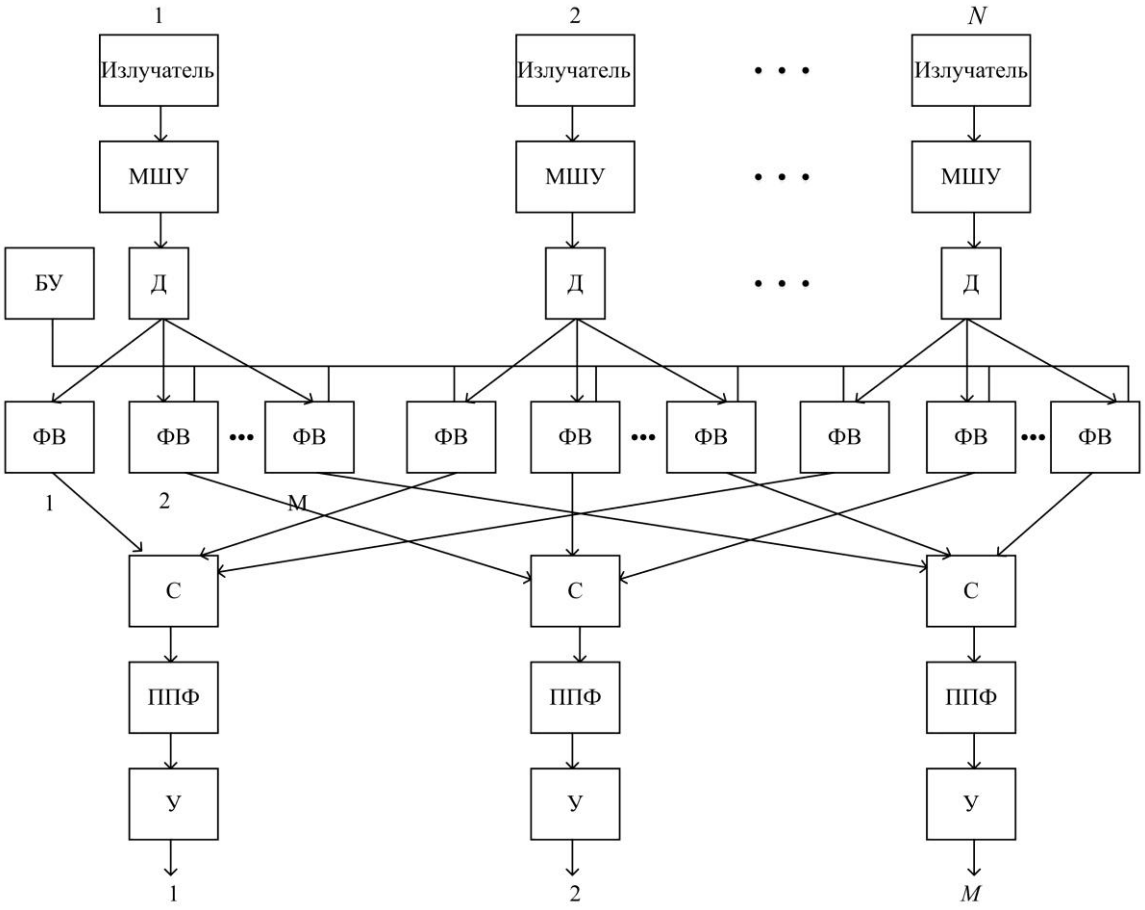


Рис.1. Схема многолучевой приемной АФАР: МШУ – малошумящий усилитель; БУ – блок управления; Д – делитель; ФВ – фазовращатель; С – сумматор; ППФ – полосно-пропускающий фильтр; У – усилитель
Fig.1. Diagram multi beam receiving APAA: МШУ – low noise amplifier; БУ – control module; Д – divider; ФВ – phase shifter; С – adder; ППФ – band-pass filter; У – amplifier

Характеристики приемных АФАР
Specifications receiving APAA

Диапазон	Число излучателей	Число лучей	Сектор сканирования, град.	G/T_{eff}, дБ/К	Тип излучателя
Ka	64	4	±8,5	6,5	Рупорный
C	256	19	±8,5	9	Спиральный
S	16	8	±52	–11	Турникетный

Антенна С-диапазона для геостационарного ретранслятора имеет спиральные излучатели с круговой поляризацией (рис.3) и построена на основе четырехканальных приемных модулей [4]. В каждом канале установлено по восемь трехразрядных фазовращателей в гибридном исполнении на основе транзистора 3П388 с разрядами 180, 90 и 45º. В формировании узких лучей участвуют фазовращатели всей апертуры антенны. Для формирования нескольких широких лучей задействованы фазовращатели части апертуры. АФАР формирует четыре узких луча с шириной диаграммы направленности 1,7×1,7º и 16 широких лучей с шириной диаграммы направленности 3,5×3,5º.

Восьмилучевая приемная АФАР S-диапазона для низколетящего космического аппарата построена на турникетных излучателях с круговой поляризацией, реализованных печатным способом на текстолите (рис.4).

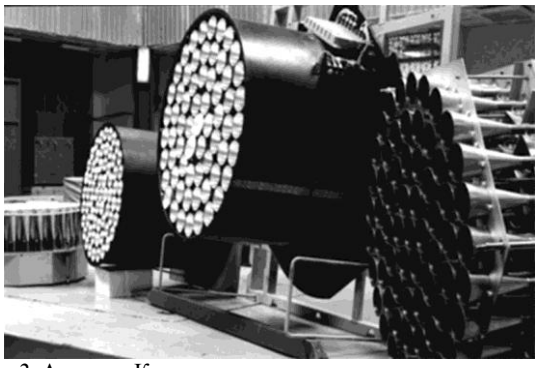


Рис.2. Антенна Ка-диапазона с рупорными излучателями
Fig.2. Antenna with horn radiator Ka-band



Рис.3. Спиральный излучатель С-диапазона
Fig.3. Spiral radiator C-band

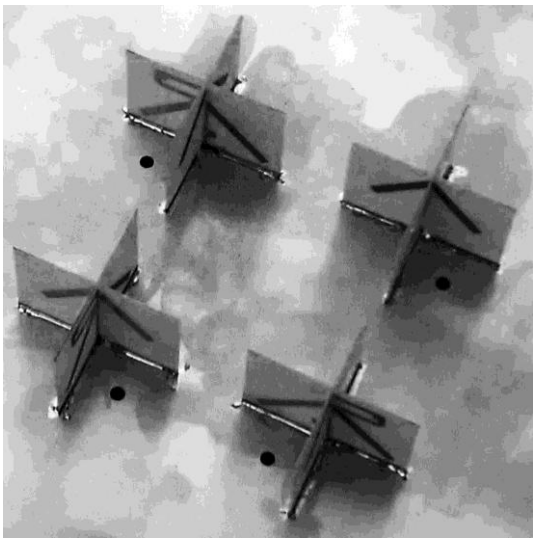


Рис.4. АФАР на базе турникетных излучателей S-диапазона
Fig.4. Turnstile radiator S-band

Многоканальный приемный модуль содержит по восемь фазовращателей в каждом канале, реализованных в виде интегральных схем. На входе каждого приемного канала устанавливается полосно-пропускающий фильтр на высокодобротных диэлектрических резонаторах для обеспечения электромагнитной совместимости [5].

В процессе проектирования многолучевых АФАР решались проблемы разделения лучей. В случае значительного пространственного разноса лучей нарушается обеспечение сплошного покрытия зоны обслуживания. Выбранная конфигурация антенны позволяет формировать статическое расположение лучей и независимое динамическое выставление лучей по рассчитываемым фазовым программам или по заранее вычисленным табличным значениям фазовых состояний массива фазовращателей. Другим способом формирования независимых лучей является частотное разделение рабочих частот в смежных лучах, что требует использования полосно-пропускающих фильтров или каналообразующей аппаратуры. Также широко используется поляризационная развязка, где разворот подрешетки с линейной поляризацией на 90º обеспечивает значительную развязку. Известна реализация излучателей с переключением поляризации, что несколько ухудшает их параметры [6]. В каждом случае выбирается конкретный способ разделения лучей или их комбинация в зависимости от назначения космического аппарата и технических возможностей.

Работа усилителей в многочастотном режиме требует сохранения линейности каждого каскада во всех режимах и условиях эксплуатации [4]. Анализ сохранения режима линейности проводился для всех положений луча с учетом работы передающих устройств собственной системы связи и смежных радиотехнических систем, расположенных рядом друг с другом на космическом аппарате.

Энергетические характеристики антенны значительно ухудшаются в результате возникновения паразитной амплитудной и фазовой модуляций при одновременном управлении лучами. Во всех рассматриваемых случаях использовались кольцевые бинарные делители, что обеспечивало развязку между каналами порядка 20 дБ в рабочей полосе частот. Для Ка- и С-диапазонов делители и сумматоры реализованы на поликоре, а для S-диапазона использо-

ван стеклотекстолит. Степень взаимного влияния каналов оценивалась по изменению коэффициента передачи и фазового сдвига при управлении соседним каналом приемного модуля.

Выбранная структура многолучевых АФАР требует использования большого количества фазовращателей, где кроме параметров данных элементов определяющими становятся их геометрические размеры и стоимость.

Таким образом, использование фазовращателей на основе арсенид-галлиевых ПТШ в пассивном включении позволяет снизить мощность потребления по цепям управления до единиц микроампер при скорости переключения фазовых состояний за единицы наносекунд.

Литература

1. ***Аппилогов В.Р., Шишлов А.В., Эйдус А.Г***. Многолучевые антенные системы HTS // Технологии и средства связи. 2013. № 6-2 (99). С. 54–67.

2. ***Hansen R.C.*** Phased array antennas: Second edition. A. John Willey&Sons, Inc., Publication, 2009. 550 p.

3. ***Aysli Y.*** Microwave switching with GaAs MESFET // Microwave J. 1982. Vol. 25. No 11. P. 61–74.

4. ***Timoshenkov V., Efimov A., Losev V.*** Multi-channel receiving module of multi beam c-band active phased array antenna // Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. 2017. P. 4–7.

5. ***Безбородов Ю.М., Нарытник Т.Н., Федоров В.Б.*** Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах. К.: Техника, 1989. 184 с.

6. ***Калиновский А.К., Лупан Ю.А., Панькина А.А., Романов Ю.И.*** Устройство управления поляризацией // А.с. 1841183 SU. Опубл. 2016. Бюл. № 26.

Поступило в редакцию 17.06.2019 г.; после доработки 17.06.2019 г.; принято к публикации 19.11.2019 г.

Ефимов Андрей Геннадьевич – доктор технических наук, начальник отдела обособленного подразделения ООО «Ижевский радиозавод» в г. Москве (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Генерала Алексеева, 8), a.efimov@irz.ru

Каменев Александр Григорьевич – начальник отдела обособленного подразделения ООО «Ижевский радиозавод» в г. Москве (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Генерала Алексеева, 8), a.kamenev@irz.ru

Корнеев Станислав Алексеевич – начальник отдела АО «Ижевский радиозавод» (Россия, 426034 г. Ижевск, ул. Базисная, 19), stas@irz.ru

Чистюхин Виктор Васильевич – кандидат технических наук, профессор Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Chistyuhinvv@gmail.com

References

1. Anpilogov V.R., Shishlov A.V., Eydus A.G. Mnogoluchevyye antennyye sistemy HTS. *Tekhnologii I sredstva svyazi = Communication Technologies& Equipment Magazine*, 2013, no. 6-2 (99), pp. 54–67. (In Russian).

2. Hansen R.C**.** *Phased array Antennas*. Second edition A. John Willey&Sons, Inc., Publication, 2009. 550 p.

3. Aysli Y. Microwave switching with GaAs MESFET. *Microwave J*., 1982, vol. 25, no. 11, pp. 61–74.

4. Timoshenkov V., Efimov A., Losev V**.** Multi-channel receiving module of multi beam C-band active phased array antenna. *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference*, 2017, pp. 4–7.

5. Bezborodov Y.M., Narytnik T.N., Fedorov V.B. *Filtry svch na dielektricheskikh rezonatorakh*. Kiyev, Tekhnika Publ., 1989. 184 p. (In Russian).

6. Kalinovskiy A.K., Lupan Y.A., Pankina A.A., Romanov Y.I. *Polarization control unit*. Copyright Certificate 1841183 SU, 2016. (In Russian).

Received 17.06.2019; Revised 17.06.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the authors:

Andrey G. Efimov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Separate Division Department, JSC «Izhevskiy Radiozavod» Moscow (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, General Alekseev st., 8), a.efimov@irz.ru

Alexander G. Kamenev – Head of the Separate Division Department, JSC «Izhevskiy Radiozavod» Moscow (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, General Alekseev st., 8), a.kamenev@irz.ru

Stanislav A. Korneev – Head of the Department, JSC «Izhevskiy Radiozavod» (Russia, 426034, Izhevsk, Bazisnaya st., 19), stas@irz.ru

Victor V. Chistyukhin – Cand. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Chistyuhinvv@gmail.com

УДК 621.375:621.3.029.6:621.382.3 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-78-82**

СВЧ-усилитель мощности до 100 Вт на GaN-транзисторах в режиме большого сигнала

В.Т. Комаров

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

valerkomarov@gmail.com

Для эффективного использования GaN-транзисторов в составе усилителя большой мощности на практике требуется точная модель эквивалентной схемы транзистора. Для комплексного исследования усилителя необходим анализ полной электрической схемы, содержащей схемы смещения, питания, согласования на входе и выходе транзистора, который эффективно осуществляется алгоритмами частотного анализа нелинейных схем методом гармонического баланса. В работе проведено исследование высокочастотных усилителей большой мощности с уровнем 100 Вт с использованием нелинейных моделей транзисторов Modelithics GaN компании Qorvo в компьютерной среде Keysight Technologies Advanced Design System. Рассмотрена полная электрическая схема усилителей большой мощности на сосредоточенных и микрополосковых элементах. Элементы схемы вычислены с помощью параметрической оптимизации, целевой функцией которой является комплекс параметров усилителя, а именно: максимальная выходная мощность, максимальный КПД, максимальная полоса рабочих частот, устойчивая работа усилителя. Определена конфигурация схемы согласования на выходе мощного транзистора, которая обеспечивает мощность 100 Вт, КПД не менее 60 % в полосе частот 40 % от центральной частоты 500 МГц. Электрическая схема позволяет формировать гармоники в режиме большого сигнала на выходе транзистора, необходимые для реализации высокого КПД.

Ключевые слова: GaN-транзистор; усилитель мощности; КПД; коэффициент стабильности

Благодарности: автор выражает благодарность компании Mjodelithics за предоставленные модели GaN-транзистора.

Для цитирования: Комаров В.Т. СВЧ-усилитель мощности до 100 Вт на GaN-транзисторах в режиме большого сигнала // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 78–82. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-78-82

© В.Т. Комаров, 2020

Amplifier of Power up to 100 Wt Based on GAN Transistors in Large Signal Mode

V.T. Komarov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

valerkomarov@gmail.com

Abstract: GaN-transistors have a relatively high input resistance, which permits to design the broad-band chains of concordance, providing high efficiency and high output power. For efficient using the GaN-transistors as a part of the high power amplifier in practice a precise model of the equivalent circuits of the transistor is required. For complex studying the amplifier the estimation of the total electric circuit, containing the circuits of shift, power, matching at the transistor input and output, high power added efficiency (PAE) and greater output power are necessary. Such estimation is efficiently executed by the algorithms of the frequency analysis of non-linear circuits by the harmonic balance method. In the work the investigation of the high-frequency high-power amplifiers with 100 Wt level, based on using the non-linear models of transistors Modelithics GaN of Oorvo Company in the Keysight Technologies Advanced Design System (ADS) computer environment, has been carried out. The complete electric circuit of the high power amplifiers on the concentrated and microstrip elements has been considered. The elements of the circuit have been calculated using the parameters optimization, the purpose function of which is the complex of the amplifier parameters, that is: the maximum output power, the maximum efficiency, the maximum band of operating frequency, the stable operation of the amplifier. As an example, the amplifier based on the 100Wt GaN transistor of Oorvo model TGF2929 Company has been presented. The configuration of the matching circuit at the output of the high power transistor, providing 100Wt power, the efficiency not less than 60% in the frequency band 40% from the central frequency 500 MHz has been determined. The electric circuit permits to form harmonics in the large signal mode at the transistor output, necessary for high efficiency realization.

Keywords: GaN transistor; power amplifier; power added efficiency (PAE); K factor

Acknowledgments: the author expresses his gratitude to Mjodelithics for the GaN transistor models provided.

For citation: Komarov V.T. Amplifier of power up to 100 Wt based on GAN transistors in large signal mode. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 78–82. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-78-82

Направления развития СВЧ транзисторных усилителей мощности непрерывного режима рассмотрены в работе [1]. Усилители мощности на GaN-транзисторах представляют собой дальнейшее развитие технологии высокочастотных полевых транзисторов с барьером Шоттки. Основные преимущества GaN-транзисторов по сравнению с транзисторами из других материалов (например, GaAs) – большая плотность съема мощности с единицы площади кристалла и относительно высокие входное и выходное сопротивления, что позволяет проектировать широкополосные цепи согласования, обеспечивающие высокий КПД и большую выходную мощность. В работе [2] рассмотрены программный комплекс Advanced Design System компании Keysight и компьютерные модели мощных GaN-транзисторов компании Modelithics [3]. Базой исследуемых транзисторов служат реальные транзисторы компании Qorvo, которые позволяют реализовывать высокочастотную мощность более 100 Вт с одного транзистора. В [2] предложена методика проектирования усилителей мощности, заключающаяся в предварительном моделировании режима большого сигнала усилителя при заданных входной мощности усилителя и

напряжениях смещения и питания транзистора. Вместо схем согласования на входе и выходе транзистора содержатся нагрузочные комплексные сопротивления. Результатом моделирования являются контуры нагрузок на диаграмме Смита на входе и выходе транзистора на основной частоте и частотах гармоник, соответствующие значениям максимальной колебательной мощности и максимальному КПД. Проектирование конструкции усилителя предполагает этап синтеза реальных цепей согласования, эквивалентных вычисленным оптимальным нагрузкам. Синтез реальной схемы в микрополосковом исполнении реализован в работе [4]. Методика проектирования [2, 4] требует значительных временных затрат для вычислительных процессов в случае реализации максимальной мощности, высокого КПД, зависящей от влияния высших гармоник основной частоты на полосу пропускания усилителя. Полученные результаты должны быть подтверждены устойчивой работой усилителя. В работе [5] представлена электрическая схема усилителя, содержащая цепи согласования усилителя на сосредоточенных элементах и отрезках длинной линии, предложена конфигурация схемы усилителя с выходной мощностью 10 Вт и КПД = 75%.

Цель настоящей работы – создание схемы мощного высокоэффективного усилителя на GaN-транзисторе с увеличенной полосой пропускания. Активным элементом усилителя выбран транзистор компании Qorvo TGF2929 с предполагаемой мощностью 100 Вт. На рис.1 представлена электрическая схема усилителя мощности.

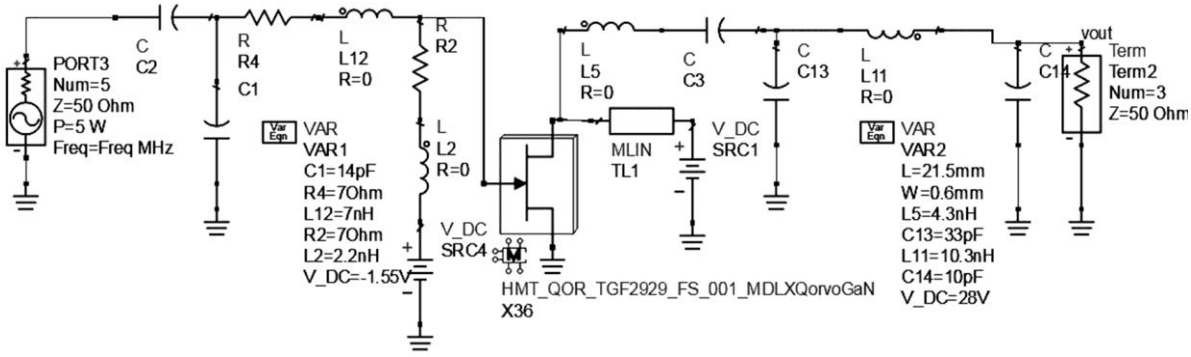


Рис.1. Электрическая схема усилителя большой мощности на GaN-транзисторе
Fig.1. Electrical diagram of a high-power amplifier on a GaN transistor

Элементы схемы C1, L12 на входе транзистора обеспечивают согласование входного импеданса транзистора с импедансом высокочастотного источника 50 Ом, элементы L5, C13, L11, C14 на выходе транзистора – согласование оптимальной нагрузки транзистора с внешней нагрузкой 50 Ом. Микрополосковый отрезок TL1 обеспечивает питание транзистора по постоянному току, элементы R4 и R2 – устойчивый режим работы транзистора. Большая высокочастотная мощность реализуется на стоке GaN-транзистора за счет больших питающих напряжений и выбора напряжения смещения на затворе транзистора, обеспечивающего максимальный ток. На рис.2 представлены зависимости выходной мощности усилителя P и КПД от частоты.

Оптимальные параметры элементов согласования схемы определялись параметрической оптимизацией. Режим работы с максимальными показателями прошел проверку на стабильность. На рис.3 приведены результаты исследования устойчивости усилителя мощности. При выборе смещения –1,5 В реализуются максимальная крутизна тока стока и максимальный коэффициент усиления в режиме малого сигнала, что позволяет вычислить критерии стабильности усилителя (коэффициенты устойчивости): StabFact ≥ 1; StabMeas ≥ 0. Максимальный КПД усилителя достигается в режиме насыщения тока на выходе транзистора, при котором проявляется влияние гармоник на формы тока и напряжения на стоке транзистора. Из графиков следует, что в полосе частот от 100 МГц до 4 ГГц усилитель сохраняет абсолютную устойчивость.

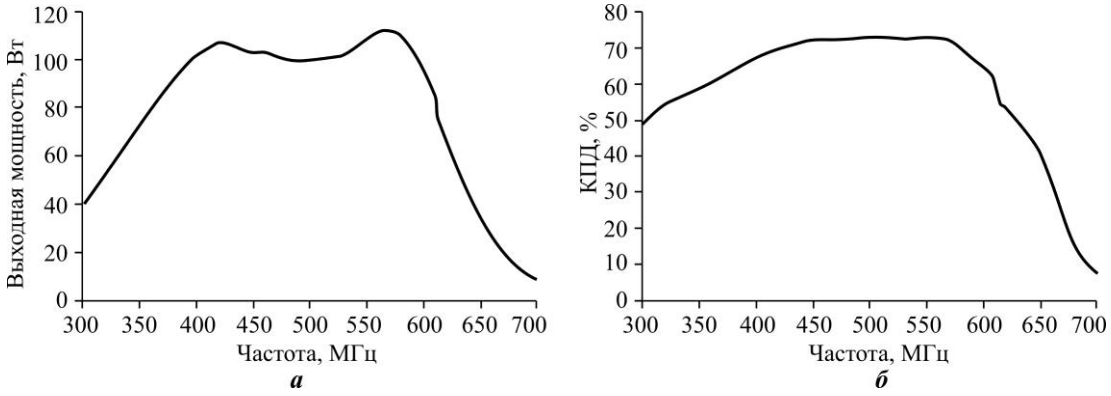


Рис.2. Зависимости выходной мощности усилителя P (*а*) и КПД (*б*) от частоты
Fig.2. Dependence of the output power of the amplifier P (*a*) and the efficiency of PAE (*b*) on the frequency

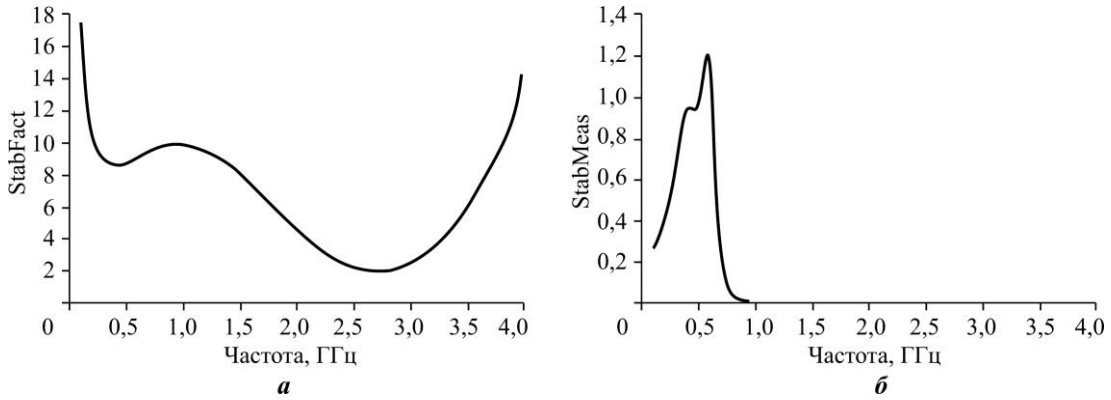


Рис.3. Частотная характеристика коэффициентов устойчивости усилителя мощности: *а* – StabFact; *б* – StabMeas
Fig.3. Frequency response of the stability coefficient of a power amplifier: *a* – StabFact; *b* – StabMeas

Спектральный анализ мощности показывает наличие на стоке транзистора гармоник основной частоты (рис.4,*а*) и основной гармоники на выходе усилителя (рис.4,*б*). Характеристики усилителя, приведенные на рис.2–4, получены в результате параметрической оптимизации схемы усилителя мощности (см. рис.1). Параметры входной цепи: напряжение смещения V_{DC} = –1,55 В; входная мощность P = 5 Вт; R2 = 7 Ом; R4 = 7 Ом; C1 = 14 пФ; L2 = 2,2 нГн; L12 = 7,6 нГн. Параметры выходной цепи: напряжение питания V_{DC} = 28 В; длина микрополосковой линии L = 21,5 мм; ширина W = 0,6 мм; толщина положки 0,5 мм; диэлектрическая проницаемость Er = 3,4; L5 = 4,3 нГн; C13 = 33 пФ; L11 = 10,3 нГн; C14 = 10 пФ.

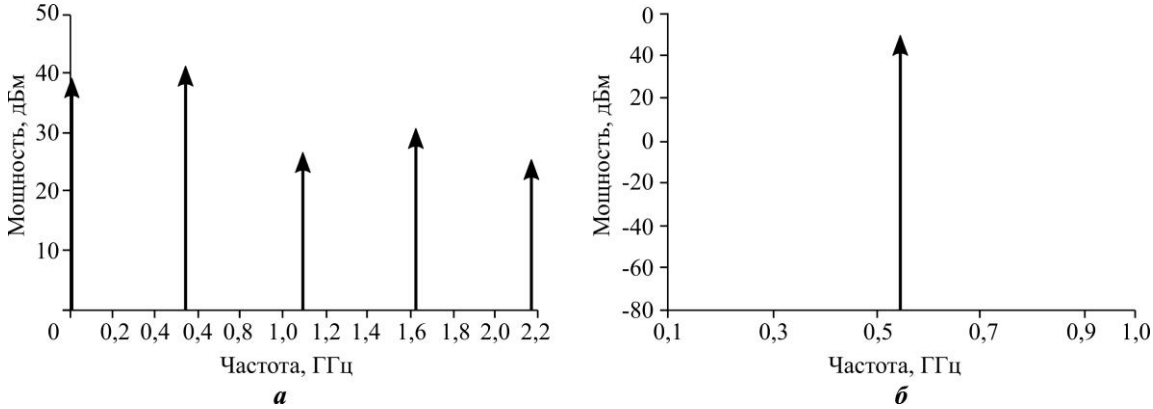


Рис.4. Спектральный анализ мощности на стоке транзистора (*а*), на выходе усилителя (*б*)
Fig.4. Amplifier power spectrum at the drain of the transistor (*a*), at the output of the amplifier (*b*)

В результате исследования высокочастотных усилителей большой мощности определена конфигурация схемы согласования на выходе транзистора, которая обеспечивает мощность 100 Вт в полосе частот 40 % от центральной частоты 500 МГц. Электрическая схема позволяет формировать гармоники в режиме большого сигнала на выходе транзистора, необходимые для реализации высокого КПД. В полосе частот КПД составляет не менее 60 %, максимальный КПД равен 75 %. Схема обеспечивает фильтрацию гармоник в нагрузке усилителя. Режим максимальной мощности обеспечивает устойчивость усилителя. Моделирование усилителя в программной среде ADS позволяет решать задачу реализации реального усилителя на основе схемы, представленной на рис.1, используя замену сосредоточенных индуктивностей схемы эквивалентными микрополосковыми конфигурациями.

Литература

1. ***Кищинский А.*** Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ-диапазона – смена поколений // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 2. С. 11–16.

2. ***Dunleavy L., Morales H., Suckling C., Kim Tran.*** Device and PA circuit level validations of a high power GaN model library // Microwave Journal. 2016. Vol. 59. P. 33–38.

3. ***Angelov, Zirath H., Rorsman N.*** A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40. No. 12. P. 2258–2266.

4. ***Brunning J., Rayit R.*** Designing a broadband, highly efficient, GaN RF power amplifier // Microwave Journal. 2018. Vol. 61. Iss. 6. P. 72–82.

5. ***Али Аль-Райм М.*** Усилитель мощности класса F с новой конфигурацией схемы согласования нагрузки // СВЧ электроника. 2017. № 2. С. 49–57.

Поступило в редакцию 06.11.2019 г.; после доработки 06.11.2019 г.; принято к публикации 19.11.2019 г.

Комаров Валерий Терентьевич – кандидат технических наук, доцент Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шохина, д. 1), valerkomarov@gmail.com

References

1. Kiszczynski A. Broadband transistor power amplifiers of microwave power-generation. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2010, no. 2, pp.11–16. (in Russian).

2. Dunleavy L., Morales H., Suckling C., Kim Tran. Device and PA Circuit Level Validations of a High Power GaN Model Library. *Microwave Journal*, 2016, vol. 59, pp. 33–38.

3. Angelov, Zirath H., Rorsman N. A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1992, vol. 40, no. 12, pp. 2258–2266.

4. Brunning J., Rayit R. Designing a broadband, highly efficient, GaN RF power amplifier. *Microwave Journal*, 2018, vol. 61, iss. 6, pp. 72–82.

5. Ali Al-Raim M. Class F power amplifier with new load matching circuit configuration. *SVCH elektronika = Microwave Electronics*, 2017, no. 2, pp. 49–57. (in Russian).

Received 06.11.2019; Revised 06.11.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the author:

Valery T. Komarov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), valerkomarov@gmail.com

УДК 621. 382.323 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-83-88

Влияние емкостей HEMT-транзистора на основные параметры усилителей СВЧ

Мьо Мин Тхант, В.А. Романюк, Н.В. Гуминов

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

v.a.romanjuk@gmail.com

Исследование влияния межэлектродных емкостей HEMT-транзистора на частоту, коэффициент усиления мощности и КПД усилителя проводится с целью оптимизации его конструкции. Для количественной оценки увеличения максимальной частоты при уменьшении емкостей транзистора в работе проведено моделирование электрических схем усилителей на HEMT-транзисторе с использованием модели EEHEMT в программе Microwave Office. HEMT-транзистор выполнен на основе GaN с длиной затвора 0,25 мкм. Максимальная частота усилителя равна 59 ГГц. Показано, что уменьшение входной и проходной емкостей HEMT-транзистора на 20 % приводит к возрастанию максимальной частоты усилителя до 90 ГГц. Моделирование, проведенное на частоте 4 ГГц, продемонстрировало снижение входной мощности, поступающей на транзистор, примерно на 2 дБ. Это приводит к увеличению коэффициента усиления и КПД добавленной мощности усилителя. Установлено, что удаление диэлектрического слоя Si_3N_4 между металлом затвора и слоем AlGaN приводит к уменьшению относительной диэлектрической проницаемости пространства между затвором и каналом транзистора с соответствующим уменьшением емкостей HEMT-транзистора с *T*-образным затвором.

Ключевые слова: усилители СВЧ; HEMT-транзисторы на основе GaN

***Для цитирования*:** Мьо Мин Тхант, Романюк В.А., Гуминов Н.В. Влияние емкостей HEMT-транзистора на основные параметры усилителей СВЧ // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 1. С. 83–88. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-83-88

Effect of HEMPT Capacitances on Microwave Amplifier Main Parameters

Myo Min Thant, V.A. Romanyuk, N.V. Guminov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

v.a.romanjuk@gmail.com

Abstract: The effect of transistor capacitance on the frequency, gain and amplifier efficiency has been studied. It is known that the maximum frequency of an amplifier on HEMT decreases with a decrease in the gate-source and gate-drain capacitance. The effect of the transistor inter-electrode capacitances on frequency, the power gain and the efficiency has been estimated. In the work the amplifiers circuits simulation based on HEMT, manufactured at MIET, has been performed. The transistor has been made on the basis of GaN with 0.25 μm gate, the EEHEMT model has been used. The amplifier maximum frequency was 59 GHz. A 20% decrease in the gate – source and gate – drain

© Мьо Мин Тхант, В.А. Романюк, Н.В. Гуминов, 2020

capacitances increase the maximum frequency up to 90 GHz. The transistor capacitance affects the power consumed from the input source. This is due to the direct power passage from the input source to the amplifier output. The simulations, carried out at the 4 GHz frequency, have shown a decrease in the input power, supplied to the transistor, while reducing the input and passage capacitances. With a 20% decrease in capacitance the input power has decreased by ~ 2dB, which leads to an increase amplifier Pgain and PAE. A method for reducing the capacitances of a HEMT with a T-gate has been proposed. After manufacturing the transistor the Si_3N_4 dielectric layer between the gate metal and the AlGaN layer should be deleted. Removing the dielectric layer leads to a decrease in the relative permittivity of the space between the gate and the transistor channel with a corresponding decrease in capacitances. Since the capacitances of the transistor structure are an essential part of the total capacitances (up to 40%), this method leads to the decrease in the inter-electrode capacitances, which makes it possible to implement the simulation conclusions. The result of the paper can be useful for optimizing the HEMT design with *T*-gate.

Keywords: HEMT; GaN; amplifiers

For citation: Myo Min Thant, Romanyuk V.A., Guminov N.V. Effect of HEMPT capacitances on microwave amplifier main parameters. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 83–88. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-1-83-88

При разработке новых монолитных микроволновых интегральных схем рассматриваются возможности улучшения их основных параметров. Для оценки влияния межэлектродных емкостей транзистора на основные параметры усилителей мощности СВЧ проведено компьютерное моделирование электрических схем усилителей. Основой усилителей являются интегральные НЕМТ-транзисторы на базе GaN, изготовленные в МИЭТ.

Для определения максимальной частоты усиления $f_{\max}$ схема усилителя, работающего в линейном режиме, настраивается на наибольшую частоту, при которой коэффициент усиления мощности имеет приемлемое для практики значение (K_P > 6–7 дБ). Выражение для максимальной частоты усилителя имеет вид [1]:

$$f_{\max} = \frac{f_t}{\sqrt{(R_g + R_s + R_i)(\frac{G_d}{f_t} + C_{gd})R_g}}, \quad (1)$$

где f_t – предельная частота усиления по току:

$$f_t = \left[2\pi(\frac{l_g}{v_e} + C_{gs}(R_s + R_d) \right]^{-1}; \quad (2)$$

R_g, R_s, R_d – сопротивление затвора, истока и стока соответственно; R_i – внутреннее сопротивление затвор – исток; C_{gd}, C_{gs} – емкость затвор – сток и затвор – исток соответственно; G_d – проводимость нагрузки; l_g – длина затвора; v_e – дрейфовая скорость электронов.

Как следует из выражений (1) и (2), максимальная частота $f_{\max}$ может быть увеличена путем уменьшения входной C_{gs} и проходной C_{gd} емкостей НЕМТ-транзистора. В программе Microwave Office промоделированы электрические схемы линейных усилителей, настроенных на наибольшую частоту. При C_{gs} = 0,2156 пФ, C_{gd} = 0,1216 пФ модели EEHEMT максимальная частота равна 59 ГГц. С целью увеличения максимальной частоты и других основных параметров усилителя составлена электрическая схема на НЕМТ-транзисторе с уменьшенными на 20 % входной и проходной емкостями (рис.1).

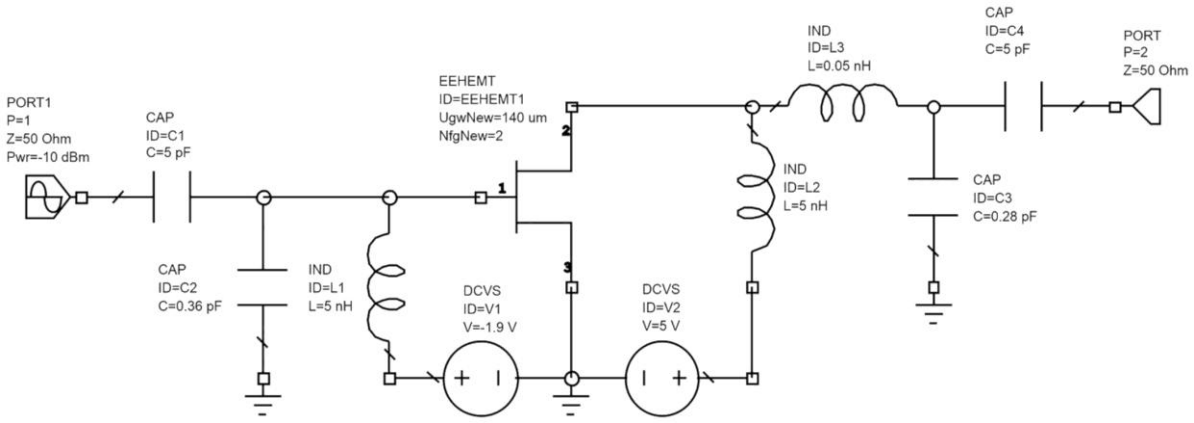


Рис.1. Электрическая схема усилителя с уменьшенными емкостями транзистора, рассчитанная на максимальную частоту усиления
Fig.1. Amplifier circuitry with reduced transistor capacities, designed for maximum gain frequency

Амплитудно-частотная характеристика усилителя при уменьшенных емкостях показана на рис.2. Как следует из рисунка, уменьшение емкостей HEMT-транзистора увеличивает максимальную частоту примерно на 30 ГГц.

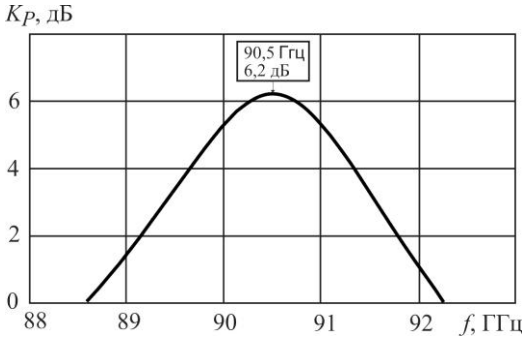


Рис.2. Амплитудно-частотная характеристика усилителя на HEMT-транзисторе
Fig.2. The amplifier frequency response

Воспользовавшись простейшей эквивалентной схемой транзистора, состоящей из входной C_{gs}, проходной C_{gd}, выходной C_{ds} емкостей и генератора выходного тока [2], несложно получить выражение для мощности, поступающей из входного источника к транзистору:

$$P_{\text{вх}} \approx 0{,}5U_{\text{вх}}^2 \frac{\omega^2 C_{gs} C_{dg} C_{ds}}{\tau G_d^2}, \qquad (3)$$

где $U_{\text{вх}}$ – амплитуда входного напряжения усилителя; ω – круговая частота; τ – среднее время пролета электронов от истока к стоку.

Поскольку в простейшей схеме транзистора не учтены резистивные элементы, определяющие потери мощности, то входная мощность, рассчитываемая по формуле (3), – это мощность, проходящая на выход транзистора без усиления. Входная мощность может быть больше мощности, определяемой формулой (3), если проводимость транзистора имеет не только действительную часть проводимости G_d, но и мнимую часть емкостного характера. Следует отметить, что входная мощность проходит на выход транзистора только в случае, когда мнимая часть выходной проводимости имеет емкостной характер. Если мнимая часть проводимости индуктивна и компенсирует проводимость выходной емкости, то возможно появление положительной обратной связи с опасностью самовозбуждения усилителя.

Как видно из (3), входная мощность может быть снижена путем уменьшения емкостей транзистора. Поскольку выражение (3) приближенное, для количественной оценки мощности, поступающей на вход транзистора при изменении межэлектродных емкостей, проведено моделирование в программе Microwave Office на частоте 4 ГГц в линейном усилителе с использованием HEMT-транзисторов, изготовленных на основе GaN [3]. В процессе исследования изменялись емкости транзистора и рассчитывалась мощность, поступающая на вход транзистора.

Порядок измерений следующий:

1. В линейном режиме программы рассчитывается коэффициент усиления мощности [4]: $K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}$, где $P_{\text{вых}}$ – мощность выходных колебаний.

2. В нелинейном режиме работы программы измеряется выходная мощность первой гармоники P_1.

3. Рассчитывается входная мощность: $P_{\text{вх}} = P_1 - G_p$.

Результаты расчетов при уменьшении емкостей HEMT-транзистора на 20 % показаны в таблице.

Зависимость входной мощности от емкостей HEMT-транзистора
The dependence of the input power from capacitance of the HEMT

Входная емкость C_{gs},пФ	Проходная емкость C_{gd}, пФ	Мощность, поступающая на вход транзистора $P_{\text{вх}}$, дБм
0,2156	0,1216	19,3
0,17	0,1	21,1

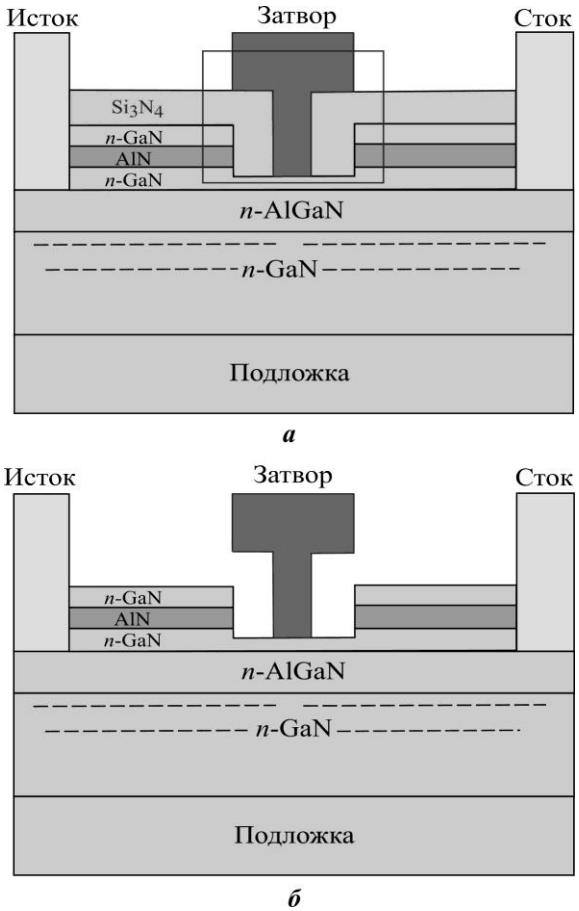


Рис.3. Структура HEMT-транзистора: *а* – исходная; *б* – после удаления диэлектрика
Fig.3. HEMT structure: *a* – initial structure; *b* – after removal of the dielectric

С уменьшением емкостей уменьшается мощность, потребляемая транзистором. При этом увеличиваются коэффициент усиления мощности $K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}$ и КПД добавленной мощности PAE (Power Added Efficiency):

$$\text{PAE} = \frac{P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}}{P_0},$$

где P_0 – мощность, потребляемая транзистором из источника питания.

Межэлектродные емкости HEMT-транзистора состоят из внутренних частей, определяемых зарядом электронов, поступающих из области AlGaN в канал, и внешних частей, зависящих от конструкции транзистора [5]. Изменение внутренних емкостей связано с изменением активных свойств транзистора, поэтому для уменьшения входной и проходной емкостей целесообразно попытаться изменить его конструкцию. Структура исследуемого HEMT-транзистора с *T*-образным затвором приведена на рис.3,*а*. Основные размеры транзистора: длина затвора 0,25 мкм, ширина затвора 200 мкм (2 по 100 мкм).

Внешние емкости транзистора (конденсаторы) созданы пространством между боковыми частями затвора и каналом. В исходной конструкции транзистора конденсаторы заполнены диэлектриком Si_3N_4 с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon \approx 7$. Полностью удалив диэлектрик после изготовления транзистора, получим конденсаторы с воздушным заполнением ($\varepsilon = 1$) с соответствующим уменьшением емкостей. Возможно также частичное удаление диэлектрика (рис.3,*б*). В работе [6] указано, что внешние емкости могут составлять более 40 % полных емкостей. Таким образом, данный способ дает возможность увеличить частоту, коэффициент усиления и КПД микросхем на HEMT-транзисторах с *T*-образным затвором.

Результаты исследования показали следующее. При уменьшении межэлектродных емкостей HEMT-транзистора на 20 % увеличивается частота усилителей мощности примерно на 30 ГГц и уменьшается входная мощность примерно на 2 дБм с соответствующим возрастанием коэффициента усиления и КПД добавленной мощности. С целью уменьшения емкостей HEMT-транзистора с *T*-образным затвором удален диэлектрический слой Si_3N_4. В результате уменьшается диэлектрическая проницаемость внешних частей межэлектродных емкостей. Результаты работы полезны для оптимизации конструкции HEMT-транзисторов.

Литература

1. AlGaN/GaN-СВЧ HEMT-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности *f* max до 100 ГГц / ***В.Г. Мокеров, А.Л. Кузнецов, Ю.В. Федоров и др.*** // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. Вып. 4. С. 561–567.

2. Extraction method for parasitic capacitances and inductances of HEMT models / ***HengShuang Zhang, PeiJun Ma, Yang Lu et al.*** // Solid-State Electronics. 2017. Vol. 129. P.108–113.

3. ***Гуминов Н.В., Мьо Мин Тхант, Романюк В.А., Шомахмадов Д.П.*** Сравнение характеристик GaAs и GaN HEMT-транзисторов // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. №1. С. 43–50.

4. ***Бахвалова С.А., Романюк В.А.*** Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office. М.: СОЛОН – Пресс, 2016. 150 с.

5. Analytical modeling of capacitances for GaN HEMTs, including parasitic components / ***Aixi Zhang, Lining Zhang, Zhikai Tang et al.*** // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61. No. 3. P. 755–761.

6. Effect of fringing capacitances on the RF performance of GaN HEMTs with T-gates / ***Bo Song, Berardi Sensale-Rodriguez, Jia Guo et al.*** // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61. No. 3. P. 747–754.

Поступило в редакцию 24.06.2019 г.; после доработки 04.10.2019 г.; принято к публикации 19.11.2019 г.

Мьо Мин Тхант – аспирант Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), myominthant5129@gmail.com

Романюк Виталий Александрович – кандидат технических наук, доцент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), v.a.romanjuk@gmail.com

Гуминов Николай Владимирович – старший преподаватель кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gummi.qdn@gmail.com

References

1. Makarov V.G., Kuznetsov A.L., Fedorov Yu.V. et al. AlGaN / GaN-microwave HEMT transistors with breakdown voltage above 100 V and with maximum frequency of fmax power gain up to 100 GHz. *Fizika I tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 561–567. (in Russian).

2. HengShuang Zhang, PeiJun Ma, Yang Lu et al. Extraction method for parasitic capacitances and inductances of HEMT models. *Solid-State Electronics*, 2017, vol. 129, pp. 108–113.

3. Guminov N.V., Myo Min tan, Romanyuk V.A. Shomakhmadov D.P. Comparison of characteristics and parameters of GaAs and GaN HEMTs. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 43–54. (in Russian).

4. Bakhvalova S.A., Romanyuk V.A. *Modeling and design of radio engineering devices in microwave office*. Moscow, SOLON-Press Publ., 2016, 150 p. (in Russian).

5. Aixi Zhang, Lining Zhang, Zhikai Tang et al. Analytical Modeling of Capacitances for GaN HEMTs, including parasitic components. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, vol. 61, no. 3, pp. 755–761.

6. Bo Song, Berardi Sensale-Rodriguez, Jia Guo et al. Effect of fringing capacitances on the RF performance of GaN HEMTs with T-gates. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, vol. 61, no. 3, pp. 747–754.

Received 24.06.2019; Revised 04.10.2019; Accepted 19.11.2019.

Information about the authors:

Myo Min Thant – PhD student of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), myominthant5129@gmail.com

Vitaly A. Romanyuk – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), v.a.romanjuk@gmail.com

Nikolay V. Guminov – Senior Lecturer of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gummi.qdn@gmail.com

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

Памяти Таирова Юрия Михайловича



01.11.1931-14.12.2019

На 89-м году ушел из жизни Юрий Михайлович Таиров – замечательный человек, выдающийся ученый, вся профессиональная деятельность которого была связана с Санкт-Петербургским государственным электротехническим университетом «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), заслуженный профессор ЛЭТИ, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии Правительства РФ в области образования.

Юрий Михайлович окончил ЛЭТИ в 1959 г. по кафедре диэлектриков и полупроводников (ДП, в настоящее время – МНЭ), получив квалификацию инженера-электрофизика по специальности «Диэлектрики и полупроводники». В период работы на кафедре ДП прошел все ступени и этапы инженерной и научно-образовательной деятельности: студент-лаборант (до 1959 г.), аспирант (1959–1962 гг.), кандидат технических наук (1963 г.), доцент (с 1965 г.), доктор технических наук (1975 г.), профессор (с 1976 г.), заведующий кафедрой (с 1984 г.).

В период обучения в аспирантуре Юрий Михайлович стажировался в Калифорнийском университете (США). По возвращении он стал активно заниматься вопросами синтеза и исследования свойств малоизученного в то время полупроводникового соединения – карбида кремния. Юрий Михайлович стал признанным мировым лидером в технологии получения данного материала и на протяжении своей дальнейшей деятельности поддерживал творческие связи с ведущими специалистами многих зарубежных университетов.

Юрий Михайлович Таиров создал в ЛЭТИ научно-образовательную школу в области широкозонных полупроводников. С его именем связана целая эпоха технологического развития полупроводникового карбида кремния. При активном участии Юрия Михайловича был разработан и внедрен (1976 г.) метод сублимационного выращивания монокристаллических слитков этого материала, который во всем мире называется методом ЛЭТИ. Эта технология фактически определила промышленное освоение карбида кремния как материала экстремальной электроники. На сегодняшний день метод ЛЭТИ использу-

ют практически все ведущие лаборатории и фирмы мира.

Юрий Михайлович активно участвовал в организации и проведении международных и отечественных конференций по карбиду кремния и родственным материалам для экстремальной электроники, неоднократно выступал с пленарными докладами.

Под научным руководством Ю.М. Таирова защищено более 50 кандидатских и докторских диссертаций, авторами которых являются отечественные и иностранные специалисты.

С 1970 по 1988 г. Юрий Михайлович был проректором ЛЭТИ по научной работе, а с 1984 по 2009 г. – заведовал кафедрой.

Ю.М. Таиров является автором и соавтором многих учебников и учебно-методических изданий, а также монографий, статей, авторских свидетельств и патентов, высоко оцененных мировым научным сообществом. Как проректор, он внес большой личный вклад в создание и развертывание в 1986 г. Центра микротехнологии и диагностики ЛЭТИ.

Юрий Михайлович всегда активно занимался общественной работой: был участником и руководителем первых ССО, секретарем комитета ВЛКСМ ЛЭТИ, заместителем секретаря парткома ЛЭТИ, членом редколлегий ведущих научно-технических журналов. Последние годы он руководил Исторической комиссией ученого совета Университета.

Профессиональная деятельность Ю.М. Таирова отмечена орденами Трудового Красного Знамени, «Знак Почета», медалями и почетным знаком ЛЭТИ «За заслуги», званием «Заслуженный профессор ЛЭТИ».

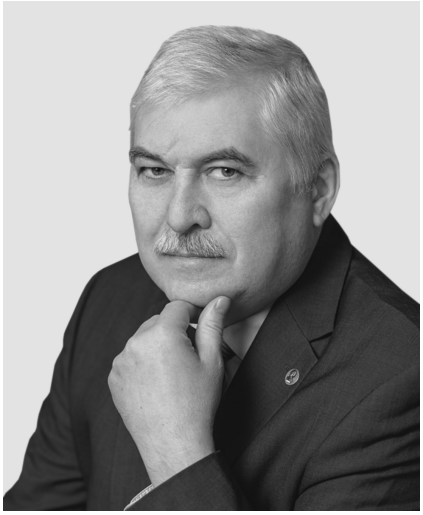
Человеческое обаяние Таирова Юрия Михайловича, его неистощимый оптимизм, позитивный взгляд на жизнь, способность видеть перспективы снискали ему огромный авторитет в вузе, стране и за рубежом. Светлую память о нем сохранят благодарные коллеги и друзья.

Выражаем соболезнование родным и близким Юрия Михайловича

Ректорат МИЭТ
Редколлегия

ЮБИЛЕИ

Саурову Александру Николаевичу – 60 лет



3 января 1960 г. исполнилось 60 лет Саурову Александру Николаевичу – директору Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (ИНМЭ РАН), действительному члену Российской академии наук, профессору, доктору технических наук, трижды лауреату Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

В 1977 г. А.Н. Сауров поступил в Московский институт электронной техники (МИЭТ), который окончил с отличием с квалификацией инженера-физика. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию, с 1989 г. – руководитель Научно-производственного комплекса «Технологический центр» МИЭТ, который он возглавлял в течение 30 лет.

В 1999 г. А.Н. Саурову присуждена степень доктора технических наук, в 2001 г. присвоено ученое звание профессора. В 2008 г. избран членом-корреспондентом Российской академии наук по Отделению нанотехнологий и информационных технологий (ОНИТ РАН), в 2016 г. – действительным членом РАН.

Академик А.Н. Сауров принимал непосредственное участие в создании, строительстве и организации ИНМЭ РАН – новейшего института РАН, директором которого он стал в 2009 г. Под его руководством завершено создание экспериментальной базы ИНМЭ РАН, позволяющей проводить передовые исследования в новейших областях: кремний-углеродные технологии, технологии гетерогенной интеграции, а также комплексные аналитические исследования в сфере наноэлектроники.

Область научных интересов академика А.Н. Саурова – создание новых конструктивно-технологических методов и приемов изготовления интегральных устройств и систем микро- и наноэлектроники на основе методов самоформирования и самосовмещения, позволяющих создавать базовые элементы с нанометровыми конструктивными размерами для систем и аппаратуры и имеющих большое прикладное значение.

Под руководством А.Н. Саурова коллективу ИНМЭ РАН удалось решить проблему совмещения технологий микроэлектроники и управляемого синтеза углеродных наноматериалов. Это расширяет возможности существующей элементной базы микроэлектроники и открывает перспективу для эволюционного перехода от микроэлектроники и микросистемной техники к наноэлектронике.

По инициативе А.Н. Саурова созданы базовые кафедры «Микроэлектроника и микросистемы» в МИЭТ и «Нанотехнология микроэлектроники» в НИУ МЭИ. Под его руководством подготовлены 4 кандидата наук.

А.Н. Сауров – член Межведомственного совета по присуждению премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Основные результаты научной работы А.Н. Саурова только за последние 10 лет представлены в более чем 30 патентах и 90 научных трудах, в том числе 2 монографиях.

Многолетняя плодотворная научно-педагогическая деятельность А.Н. Саурова высоко оценена государством. Он награжден орденом «Знак Почета», медалями ордена «За заслуги перед Отечеством» II и I степени, орденом Александра Невского.

Поздравляем Александра Николаевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и успехов на благо российской науки!

Редколлегия

КОНФЕРЕНЦИИ

Об итогах Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях – 2019»

28–29 ноября 2019 г. в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» проходила первая Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях» (до 2019 г. было проведено 11 всероссийских научно-практических конференций «Актуальные проблемы информатизации в науке, образовании и экономике»). Конференция состоялась по инициативе Института системной и программной инженерии и информационных технологий МИЭТ (СПИНТех).

Основная цель конференции – обмен опытом по проблемам цифровизации в научных исследованиях, при разработке информационно-управляющих систем и комплексов и их практическом использовании в наукоемких отраслях экономики, а также при подготовке специалистов.

В Оргкомитет конференции, наряду с учеными из ведущих вузов и организаций Москвы, вошли Андерсен Карл (IBM Fellow, IBM USA); д.т.н., проф. Патрик Эдуард (INTAMT, Германия); проф. Университета прикладных наук Анхальта Сименс Эдуард (Кёттен, Германия), д.т.н., проф. Чжо Зо Е (Научно-исследовательский Центр при Министерстве обороны Республики Союз Мьянма).

С приветственным словом к участникам конференции обратились директор Института СПИНТех МИЭТ д.т.н., проф. Л.Г. Гагарина, а также выпускник МИЭТ д.т.н., проф. Чжо Зо Е.

На пленарном заседании выступили к.ф.-м.н. А.Д. Яшунский (Институт при-



Заседание секции «Информационные технологии в научных исследованиях и цифровой экономике». Слева направо: д.т.н. проф. Е.М. Портнов, д.т.н., проф. Чжо Зо Е, д.т.н., проф. Л.Г. Гагарина, к.п.н., доц. Е.Л. Федотова

кладной математики им. М.В. Келдыша РАН) с докладом «Виртуальное население России» и к.т.н. С.А. Амелькин (Институт программных систем имени А.К. Айламазяна РАН) с докладом «Энергоэффективные суперкомпьютеры: на пути к экзафлопсным вычислительным системам».

В адрес Оргкомитета поступило 120 докладов из Москвы, Петрозаводска, Смоленска, Томска, Минска (Республика Беларусь), Алматы (Республика Казахстан).

На конференции работали три секции:

• *информационные технологии в научных исследованиях и цифровой экономике;*

• *микроэлектронные информационно-управляющие системы и комплексы;*

• *подготовка кадров в области информационных технологий для цифровой экономики*.

Всего на секциях выступили 67 докладчиков. По результатам выступлений проведен конкурс работ молодых ученых. 10 докладчиков стали лауреатами конференции.

Более 20 лучших работ опубликованы в сборнике статей «Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях»» (М., МИЭТ, 2019. 136 с.).

Ряд проектов инновационной направленности получил рекомендацию для участия в региональном конкурсе по программе «УМНИК», 5 победителей которого получили финансирование от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в размере 500 тыс руб.

Л.Г. Гагарина,
д.т.н., проф. директор Института СПИНТех МИЭТ

О.Г. Харач,
к.э.н, доц. Института СПИНТех,
кафедры экономики, менеджмента
и финансов МИЭТ

27-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2020»

Национальный исследовательский университет «МИЭТ» проводит *16–17 апреля 2020 года 27-ю Всероссийскую межвузовскую научно-техническую конференцию студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика-2020».*

Оргкомитет приглашает молодых исследователей принять участие в работе конференции.

Научные направления работы конференции (по секциям):

1. Нанотехнологии в электронике.
2. Материалы микро- и наноэлектроники.
3. Проектирование и технология электронных компонентов.
4. Микромеханика, сенсоры, робототехнические комплексы.
5. Математическое моделирование процессов и технологий.
6. Автоматизированные информационные системы и информационные технологии.
7. Информационно-управляющие и вычислительные системы и устройства.
8. Радиотехника, системы и устройства связи и телекоммуникаций.
9. Информационная безопасность.
10. Биомедицинская электроника.
11. Экологические проблемы электроники и окружающей среды.
12. Менеджмент, маркетинг в электронике и информатике.

Форма участия в работе конференции – выступление с докладом на секции, продолжительность выступления – 10 мин.

По итогам работы секций проводится конкурс работ студентов, авторами которых являются только студенты, и конкурс работ аспирантов, авторами которых являются только аспиранты. Лучшие работы будут отмечены дипломами лауреатов.

По материалам конференции предполагается издание сборника статей конференции с индексированием в РИНЦ. Отбор работ для опубликования в сборнике проводится Оргкомитетом конференции по результатам выступлений.

Тезисы докладов будут опубликованы в сборнике и представлены участникам к началу работы конференции.

Ознакомиться с требованиями к представлению и оформлению тезисов и докладов можно на сайте МИЭТ в разделе «Наука и инновации», «Конференции и семинары»: https://miet.ru/page/124059

Ответственный секретарь Оргкомитета – Харач Валентина Павловна.

Адрес Оргкомитета:124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», ОНТИ, на конференцию «МэИнфо-2020».

Тел.: +7-499-720-85-30
E-mail: onti@miee.ru (для справок)

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

Внимание! Введены новые требования к выполнению рисунков.

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

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

Основные рубрики:

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

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом ***в 2-х экземплярах.***
2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.
3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).
4. Лицензионный договор о передаче авторского права в 2-х экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: http://ivuz-e.ru/authors/

Статья должна быть подписана всеми авторами.

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

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

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

Аннотация:

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

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

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

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

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

Текст:

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

Формулы:

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

Иллюстрации:

1. Векторные рисунки представляются в формате файла *.SVG (версии 1.1). Для выполнения иллюстраций рекомендуется использовать свободно распространяемый векторный редактор Inkscape 0.92 (официальный сайт https://inkscape.org). Текст и линии на рисунке должны быть редактируемыми (текст не «в кривых»).
2. Полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в формате TIFF (без компрессии). **Использование MS Word не допускается.**
3. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

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

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

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

Библиографический список:

- оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];
- нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;
- русскоязычные источники также должны быть переведены на английский язык.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

- оформляется отдельным файлом;
- необходимо указать: фамилию, имя, отчество полностью; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, служебный адрес (на русском и английском языках), служебный телефон, e-mail;
- указать автора, ответственного за прохождение статьи, для аспирантов – научного руководителя.

Плата за публикацию статей не взимается.

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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru

ПОДПИСКА 2020

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

Периодичность журнала - 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

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

Подписной индекс 47570

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

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

через редакцию - с любого номера и до конца года

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

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

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

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

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

Topics of interests:

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

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

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

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

Deadlines:

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

Organising Committee:

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

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