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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 26
№ 5
сентябрь - октябрь

Vol. 26
No. 5
September - October

2021

Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях – 2021»

Национальный исследовательский университет «МИЭТ» 25–26 ноября 2021 г. проводит *Международную научно-практическую конференцию* «*Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях – 2021*». В случае ухудшения эпидемиологической обстановки проведение конференции возможно в очно-заочной форме (в системе Zoom). Материалы на конференцию следует направить **до 10 ноября 2021 г.** по e-mail: id@miee.ru.

Цель конференции – обмен опытом по проблемам цифровизации в научных исследованиях, разработки информационно-управляющих систем и комплексов на микроэлектронной компонентной базе и их практического использования в наукоемких отраслях экономики. Также будет поднят вопрос подготовки специалистов в области информационных технологий и систем в цифровой экономике.

Организационный комитет конференции: председатель – Гаврилов С.А., д.т.н., проф. МИЭТ; заместитель председателя – Гагарина Л.Г., д.т.н., проф. МИЭТ.

Ответственный секретарь Оргкомитета: Харач Валентина Павловна.

Основные направления работы конференции:

1. Информационные технологии в научных исследованиях и цифровой экономике.
2. Микроэлектронные информационно-управляющие системы и комплексы.
3. Подготовка кадров в области информационных технологий для цифровой экономики.

В рамках конференции проводится конкурс научных работ студентов и аспирантов. Победители конкурса будут отмечены дипломами лауреатов, их работы опубликуют в сборнике научных трудов конференции с размещением в РИНЦ.

Проекты инновационной направленности будут выдвинуты на региональный конкурс по программе «УМНИК», победители которого получат финансирование от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

По материалам конференции будет издан сборник тезисов конференции.

Более подробную информацию о конференции можно получить на сайте: https://www.miet.ru/page/138033.

Адрес Оргкомитета: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», ОНТИ, на конференцию «АПИЦЭиНИ – 2021».

Тел.: +7-499-720-85-30

E-mail: onti@miee.ru (для справок)

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 26, № 5, 2021
сентябрь – октябрь

Научно-технический журнал
Издается с 1996 г.
Выходит 6 раз в год

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

Главный редактор: ***Чаплыгин Юрий Александрович*** – академик РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), 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)
Коноплёв Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
Кубарев Юрий Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова (Москва, Россия)
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Максимов Иван Александрович – PhD, проф., Университет города Лунд (Швеция), ORCID: 0000-0003-1944-4878
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© «Известия вузов. Электроника», 2021
© МИЭТ, 2021

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

Заведующая редакцией *И.М. Доронина*
Редактор *А.В. Тихонова*
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 06.10.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 11,625 усл.печ.л., 10,9 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 5. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

Включен ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам специальностей:

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

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

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

Является членом Crossref.

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

Вигдорович Е.Н. Тензиметрические исследования состава пара мышьяка и фосфора 347

Технологические процессы и маршруты

Царик К.А. Экспонирование фокусированным ионным пучком сверхтонкого электронного резиста для создания контактов наноразмерного полевого транзистора 353

Элементы интегральной электроники

Белов Е.Н., Савостин Ю.А. Определение LC-параметров корпусов ИМС с помощью электромагнитного моделирования 363

Петросянц К.О., Силкин Д.С., Попов Д.А., Бо Ли, Сюй Чжан. TCAD-моделирование нанометровых структур FinFET на объемном кремнии с учетом воздействия радиации 374

Схемотехника и проектирование

Хватов В.М., Гаврилов С.В. Формирование библиотек СФ-блоков в маршруте проектирования пользовательских схем на ПЛИС и РСнК 387

Заплетина М.А., Гаврилов С.В. Модификация алгоритма Pathfinder для этапа трассировки межсоединений ПЛИС 399

Интегральные радиоэлектронные устройства

Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Ахмедов Р.А., Садыхов М.В. Математические модели характеристик акустооптической линии задержки и оценка их адекватности 410

Краткие сообщения

Сергеев В.А., Ходаков А.М., Сальников М.Ю. Тепловая модель сквозного металлизированного отверстия печатной платы при одностороннем нагреве 426

Неустроев С.А. Энергия активизации атомов углерода в алмазе 432

Памяти Кубарева Юрия Васильевича 435

Юбилеи

Неустроеву Степану Архиповичу – 95 лет 437

Конференции

Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях – 2021» ..... 2-я стр. обложки

К сведению авторов 439

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 26, No. 5, 2021
September – October

The scientifical and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

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

Editor-in-Chief: ***Yury A. Chaplygin*** – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-7505-5175

Editorial Board:

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

© «Proceedings of Universities. Electronics», 2021
© MIET, 2021

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

Head of editorial staff *Doronina I.M.*
Chief editors *Tikhonova A.V., Proskuryakova I.V.*
Make-up *Ryzhkov S.Yu., Ryzhkov A.Yu.*

Editorial Board's address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET, editorial office of the Journal «Proceedings of Universities. Electronics»
Tel.: +7-499-734-62-05
E-mail: magazine@miee.ru
http://ivuz-e.ru

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

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

Signed to print 06.10.2021. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 11,625. Number of copies 150. Order no. 5. Free price.
The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

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

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

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

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

Is the member of Crossref.

The fee for the publication of articles is not charged.

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

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

CONTENTS

Electronics materials

Vigdorovich E.N. Tensimetric Studies of Arsenic and Phosphor Vapor Composition 347

Technological processors and routes

Tsarik K.A. Focused Ion Beam Exposure of Ultrathin Electron-Beam Resist for Nanoscale Field-Effect Transistor Contacts Formation 353

Integrated electronics elements

Belov E.N., Savostin Yu.A. IC Packages' LC Parameters Definition Using Electromagnetic Modeling 363

Petrosyants K.O., Silkin D.S., Popov D.A., Bo Li, Xu Zhang. TCAD Modeling of Nanoscale Bulk FinFET Structures with Account of Radiation Exposure 374

Circuit engineering and design

Khvatov V.M., Gavrilov S.V. Complex Functional Block Libraries Formation in the Design Flow of User Circuits on FPGA and RSoC 387

Zapletina M.A., Gavrilov S.V. Pathfinder Algorithm Modification for CPLD and FPGA Routing Stage 399

Integrated radioelectronic devices

Gasanov A.R., Gasanov R.A., Ahmadov R.A., Sadikhov M.V. Mathematical Models of the Acousto-Optic Delay Line Characteristics and Their Adequacy Assessment 410

Brief reports

Sergeev V.A., Khodakov A.M., Salnikov M.Yu. Thermal Model of Printed Circuit Board Plated-Through Hole under One-Sided Heating Conditions 426

Neoustroev S.A. Carbon Atoms Activization Energy in Diamond 432

In memory of Kubarev Yury Vasilievich 435

Anniversaries

Neustroev Stepan Apkhipovich is 95 years old 437

Conferences

International Scientific and Practical Conference «Actual Problems of Informatization in the Digital Economy and Scientific Research – 2021» ..... 2 cover page

Instructions for authors 439

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

УДК 621.315.592:[072:51]:621.383 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-347-352**

Тензиметрические исследования состава пара мышьяка и фосфора

Е.Н. Вигдорович

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

evgvig@mail.ru

Основными активными элементами в диапазоне частот от единиц до сотен гигагерц остаются полевые транзисторы с барьером Шоттки на арсениде галлия, других соединениях $A^{III}B^{V}$ и различных гетероструктурах на их основе. Для оптоэлектроники большое значение приобрел фосфид галлия и его соединения. Получение этих гетероструктур осуществляется, как правило, газофазными методами, при реализации которых необходимо знание состава пара их летучих компонентов. В работе тензиметрическим статическим методом исследован состав пара мышьяка и фосфора. Создана математическая модель для обработки экспериментальных результатов. Данные по давлению ненасыщенного пара мышьяка получены с помощью кварцевого мембранного манометра в интервале температур 973–1173 К и давлении $1{,}3\cdot10^{3}$–$1{,}9\cdot10^{4}$ Па. В результате расчета показано, что пар мышьяка и фосфора состоит в основном из двух- и четырехатомных молекул. С применением наиболее достоверных справочных данных по энтальпии и энтропии As_4, As, P_4 и P определены соответствующе термодинамические значения для As_2: $\Delta H^0_{298} = (178{,}90 \pm 3{,}77)$ кДж/моль; $\Delta S^0_{298} = (227{,}17 \pm 5{,}44)$ Дж/(моль·К) и для P_2: $\Delta H^0_{298} = (229{,}01 \pm 3{,}55)$ кДж/моль; $\Delta S^0_{298} = (156{,}16 \pm 0{,}83)$ Дж/(моль·К).

Ключевые слова: мышьяк; фосфор; состав пара; арсенид галлия; фосфид галлия; константа равновесия

Для цитирования: Вигдорович Е.Н. Тензиметрические исследования состава пара мышьяка и фосфора // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 347–352. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-347-352

© Е.Н. Вигдорович, 2021

Tensimetric Studies of Arsenic and Phosphor Vapor Composition

E.N. Vigdorovich

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

evgvig@mail.ru

Abstract: Main active elements in the frequency range from a few to a hundred gigahertz still are field-effect transistors with Schottky barrier based on gallium arsenide, other $A^{III}B^{V}$ compounds and various heterostructures based on them. For optoelectronics, gallium phosphide and its compounds are of high importance. As a rule, these heterostructures are obtained by vapor phase methods, the use of which requires correct data on volatile components vapor composition. In this work, arsenic and phosphor vapor composition was studied by tensimetric static method. A mathematical model for processing of experimental results was built. Data on superheated arsenic vapor pressure were obtained using quartz gauge membrane in the range of temperature 973–1173 K and pressure $1{,}3\cdot10^{3}$–$1{,}9\cdot10^{4}$ Pa. The calculations have found that arsenic and phosphor vapor mainly consist of two- and four-atomic molecules. Using best documented reference data on As_4, As, P_4 and P enthalpies and entropies, corresponding thermodynamic values have been determined for As_2: $\Delta H^0_{298} = (178{,}90 \pm 3{,}77)$ kJ/mol, $\Delta S^0_{298} = (227{,}17 \pm 5{,}44)$ J/(mol·K); and for P_2: $\Delta H^0_{298} = (229{,}01 \pm 3{,}55)$ kJ/mol, $\Delta S^0_{298} = (156{,}16 \pm 0{,}83)$ J/(mol·K).

Keywords: arsenic; phosphor; vapor composition; gallium arsenide; gallium phosphide; equilibrium constant

For citation: Vigdorovich E.N. Tensimetric studies of arsenic and phosphor vapor composition. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 347–352. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-347-352

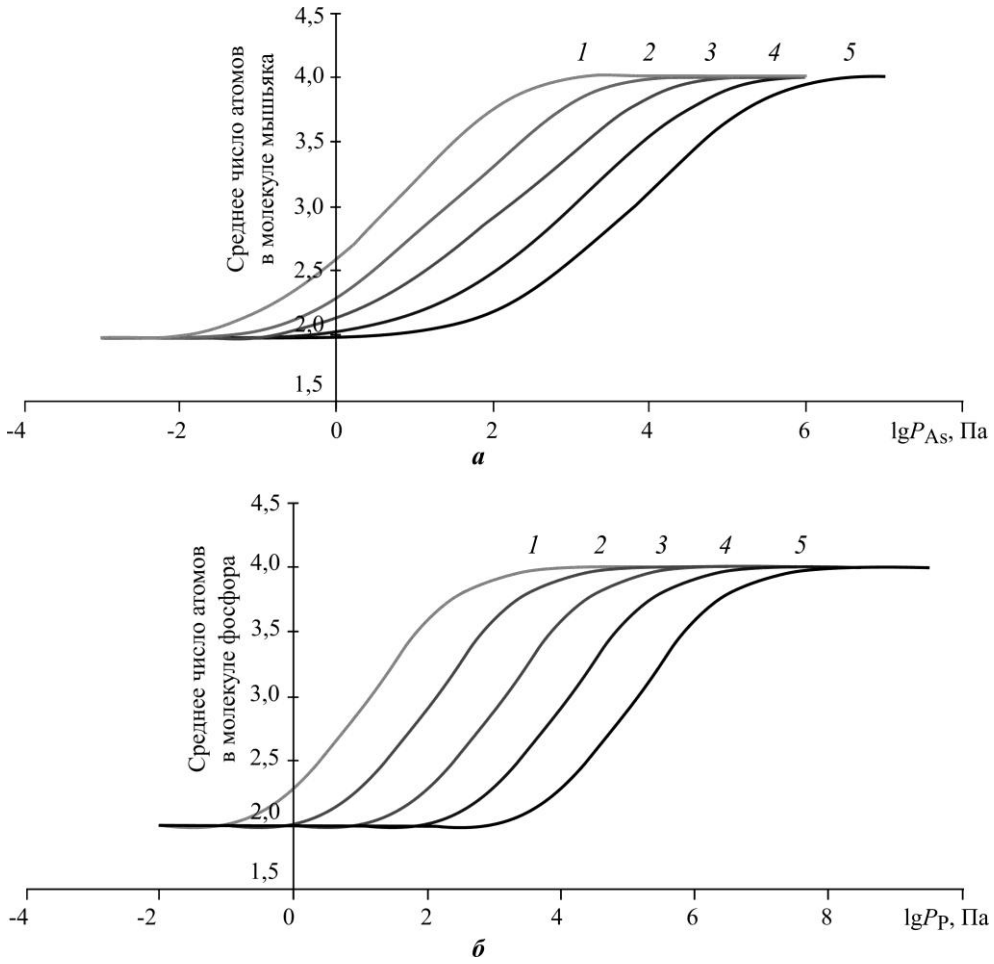
Введение. Основными активными элементами в диапазоне частот от единиц до сотен гигагерц являются полевые транзисторы с барьером Шоттки на основе арсенида галлия и различных гетероструктурах $A^{III}B^{V}$. Несмотря на большое количество разработок в этой области, серийные приборы существенно отличаются от лабораторных образцов. Для промышленного производства требуются не единичные уникальные результаты, а воспроизводимость и стабильность параметров электронных компонентов, их низкая стоимость, возможность изготовления на достаточно простом и дешевом оборудовании, простых структурах и т.д.

Разработка электронных компонентов на основе фосфида галлия является частью программы создания элементной базы не только для бытовой техники, но и для приборов специального назначения. Эпитаксиальные структуры фосфида галлия достаточно широко используются и в оптоэлектронике, в основном для изготовления светодиодов и фотоприемников. При этом также известно о перспективности структур широкозонного фосфида галлия для датчиков температуры с характеристиками, превышающими достигнутые на современных кремниевых сенсорах температуры [1]. В связи с этим разработки эпитаксиальных технологий, конструкций и приборов на основе

фосфида галлия актуальны. Так, в работе [2] показано, что верхний предел температур, измеряемых диодными термодатчиками на основе фосфида галлия, может превысить 800 К [3, 4].

Для получения материалов на основе соединений $A^{III}B^{V}$ основными являются газофазные методы, и для их исследования и моделирования необходимы достоверные данные по составу пара. Литературные данные [5–9] по мышьяку и фосфору существенно различаются. В настоящей работе проведены тензиметрические исследования с использованием новой методики обработки получаемых данных.

Методика определения давления пара и обработка экспериментальных данных. Состав пара мышьяка и фосфора исследовали статическим методом с использованием мембранного манометра. Методика исследования подробно описана в работе [10]. Давление в компенсационной части мембранного манометра измеряли пьезоэлектрическим датчиком PREMASGARD 1140 (Германия). Датчик позволяет определять давление в широком диапазоне с погрешностью ±1,5 %.



Зависимость среднего числа атомов в молекуле мышьяка (*а*) и фосфора (*б*) от давления при различной температуре, К: *1* – 1073; *2* – 1173; *3* – 1273; *4* – 1373; *5* – 1473
Dependence of the average number of atoms in an arsenic molecule (*a*) and phosphorus molecule (*b*) on pressure at different temperatures, K: *1* – 1073; *2* – 1173; *3* – 1273; *4* – 1373; *5* – 1473

Мембранный манометр состоит из трех объемов, соединенных тонкими трубками для перепайки при изменении объема загрузочной части манометра. Для получения *P*–*T*–*V*-диаграммы после проведения одного опыта из крайней емкости загрузочной

части мембранного манометра вещество перегоняли в емкость, более близкую к мембране, и крайнюю емкость отпаивали [10]. Разработанная методика позволяет измерять температурную зависимость давления ненасыщенного пара при разных объемах загрузочной части манометра и в широком диапазоне давлений.

Рассмотрим систему, состоящую из одно-, двух- и четырехатомных молекул вещества A, парциальные давления которых обозначим соответственно P_1, P_2, P_4.

Константы равновесия реакций

$$A_2 \rightleftarrows 2A_1, \quad A_4 \rightleftarrows 2A_2$$

традиционно представим в виде

$$K_1 = \frac{P_1^2}{P_2}, \quad K_2 = \frac{P_2^2}{P_4}.$$

Далее составим баланс давлений для данной системы, продифференцируем полученные уравнения по общему давлению при постоянной температуре и после некоторых преобразований получим линейную систему для определения парциальных давлений [10].

Приведенная методика позволяет обрабатывать экспериментальные данные по давлению ненасыщенного пара мышьяка и фосфора, полученные с помощью кварцевого мембранного манометра в интервале температур 973–1173 К и давлений $1{,}3\cdot10^3$–$1{,}9\cdot10^4$ Па. Графики зависимости среднего числа атомов в молекуле мышьяка и фосфора от давления приведены на рисунке.

Заключение. В результате экспериментов и расчета установлено следующее. Пар мышьяка состоит в основном из двух- и четырехатомных молекул. Температурная зависимость константы равновесия реакции $As_4 = 2As_2$ описывается уравнением $\lg K_P = (6{,}497 \pm 0{,}312) - (11\,174 \pm 200)/T$. Доверительный интервал (95 %) установлен по формулам дисперсионного анализа с использованием распределения Стьюдента.

С применением уравнения и наиболее достоверных данных по энтальпии и энтропии As_4, As [9] определены соответствующие термодинамические значения для As_2: $\Delta H^0_{298} = (178{,}90 \pm 3{,}77)$ кДж/моль; $\Delta S^0_{298} = (227{,}17 \pm 5{,}44)$ Дж/(моль·К). По найденным значениям получено уравнение температурной зависимости константы равновесия реакции $As_2 = 2As$: $\lg K_P = (6{,}330 \pm 0{,}312) - (20826 \pm 200)/T$.

Приведенные в литературе данные по теплотам диссоциации мышьяка, полученные динамическим методом, следует считать завышенными, так как авторы ошибочно принимали коэффициент испарения равным единице.

Давление ненасыщенного пара фосфора определено в интервале давлений $3{,}9\cdot10^3$–$6\cdot10^4$ Па и температур 873–1273 К. Расчет парциальных давлений показал, что в исследуемом интервале температур и давлений пар состоит из молекул P_2 и P_4, а температурная зависимость константы равновесия реакции $P_4 = 2P_2$ описывается линейным уравнением [11] $\lg K_2 = (8{,}162 \pm 0{,}421) - (11950 \pm 180)/T$. Откуда $\Delta H^0_{298} = (229{,}01 \pm 3{,}55)$ кДж/моль, $\Delta S^0_{298} = (156{,}16 \pm 0{,}83)$ Дж/(моль·К).

Актуальность создания элементной базы на основе соединений $A^{III}B^{V}$ связана с дальнейшим развитием таких приоритетных направлений современной техники, как аэрокосмические технологии и вопросы безопасности ядерных реакторов, глубинное бурение и гелиоэнергетика, мониторинг двигателей внутреннего сгорания и создание робототехнических устройств для работы в экстремальных условиях.

Литература

1. Расчет упругонапряженной гетероструктуры $Al_xGa_yIn_{1-x-y}$ As/InP с квантовыми ямами для эффективных лазерных излучателей / ***В.Н. Светогоров, Р.Х. Акчурин, А.А. Мармалюк и др.*** // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 2 (22). С. 46–55.

2. Тонкие пленки бинарных халькогенидов As_2X_3 (X = S, Se), полученные методом спин-коатинга / ***Тхи Ханг Нгуен, Е.В. Текшина, П.И. Лазаренко и др.*** // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 3 (17). С. 51–57.

3. Investigation of planar photodiodes of a focal plane array based on a heteroepitaxial InGaAs/InP structure / ***D.S. Andreev, K.O. Boltar, P.V. Vlasov et al.*** // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61. Iss. 10. P. 1220–1225. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064226916100028

4. Performance evaluation of multi-junction solar cells by spatially resolved electroluminescence microscopy / ***L. Kong, Z. Wu, S. Chen et al.*** // Nanoscale Research Letters. 2015. Vol. 10. Art. No. 40. DOI: https://doi.org/10.1186/s11671-014-0719-9

5. ***Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С.*** Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 1 (10). С. 4–20.

6. ***Казакова А.Е.*** Исследование твердых растворов AlInGaPAs, выращенных на подложках арсенида галлия и фосфида индия в поле температурного градиента: дис. … канд. физ.-мат. наук. Новочеркасск, 2018. 122 с.

7. Synthesis and properties of $In_xAl_yGa_{1-x-y}P_zAs_{1-z}$/GaAs heterostructures / ***D.L. Alfimova, L.S. Lunin, M.L. Lunina et al.*** // Inorganic Materials. 2017. Vol. 53. No. 12. P. 1217–1227. DOI: https://doi.org/10.1134/S0020168517120019

8. Формирование массивов квантовых точек Ga_xIn_{1-x} As_yP_{1-y}/GaAs в процессе ионно-лучевого осаждения / ***И.А. Сысоев, М.Л. Лунина, Д.Л. Алфимова и др.*** // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 3. Ст. № 237. С. 1–7. DOI: https://doi.org/10.7868/S0002337X14020171

9. ***Чеботарёв С.Н., Пащенко А.С., Лунин Л.С., Ирха В.А.*** Закономерности ионно-лучевой кристаллизации и свойства полупроводниковых наногетероструктур InAs-QD/GaAs(001) // Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 7-8. С. 51–57.

10. ***Панютин Е.А.*** Высокотемпературные приборы на основе фосфида галлия: эпитаксиальная технология, концепция легирования, электрические свойства: дис. … канд. физ.-мат. наук. СПб., 2009. 132 с.

11. ***Baranov A.I., Gudovskikh A.S., Nikitina E.V., Egorov A.Yu.*** Photoelectric properties of solar cells based on GaPNAs/GaP heterostructures // Technical Physics Letters. 2013. Vol. 39. Iss. 12. P. 1117–1120. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063785013120171

Поступила в редакцию 17.03.2021 г.; после доработки 17.03.2021 г.; принята к публикации 08.07.2021 г.

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

References

1. Svetogorov V.N., Akchurin R.Kh., Marmalyuk A.A., Ladugin M.A., Yarotskaya I.V. Calculation of the elastically stressed quantum wells heterostructure $Al_xGa_yIn_{1-x-y}$ As/InP for efficient diode lasers. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian Technological Journal,* 2018, vol. 6, no. 2 (22), pp. 46–55. (In Russian).

2. Thi Hang Nguyen, Tekshina E.V., Lazarenko P.I., Ivanov V.K., Kozyukhin S.A. Thin films of binary chalcogenides As_2X_3 (X = S, Se) prepared by spin coating method. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian Technological Journal,* 2017, vol. 5, no. 3 (17), pp. 51–57. (In Russian).

3. Andreev D.S., Boltar K.O., Vlasov P.V., Irodov N.A., Lopuhin A.A. Investigation of planar photodiodes of a focal plane array based on a heteroepitaxial InGaAs/InP structure. *J. Commun. Technol. Electron.,* 2016, vol. 61, iss. 10, pp. 1220–1225. DOI: https://doi.org/10.1134/S1064226916100028

4. Kong L., Wu Z., Chen S., Cao Y., Zhang Y., Li H., Kang J. Performance evaluation of multi-junction solar cells by spatially resolved electroluminescence microscopy. *Nanoscale Res. Lett.*, 2015, vol. 10, art. no. 40. DOI: https://doi.org/10.1186/s11671-014-0719-9

5. Belkin M.E., Kudzh S.A., Sigov A.S. Novel principles of microwave band radioelectronic devices design with the use of microwave photonics technology. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian Technological Journal*, 2016, vol. 4, no. 1 (10), pp. 4–20. (In Russian).

6. Kazakova A.E. *Study of AlInGaPAs solid solutions grown on gallium arsenide and indium phosphide substrates in the temperature gradient field*. Diss. for the Cand. Sci. (Phys. and Math.). Novocherkassk, 2018. 122 p. (In Russian).

7. Alfimova D.L., Lunin L.S., Lunina M.L., Kazakova A.E., Pashchenko A.S., Chebotarev S.N. Synthesis and properties of $In_xAl_yGa_{1-x-y}P_zAs_{1-z}$/GaAs heterostructures. *Inorganic Materials*, 2017, vol. 53, no. 12, pp. 1217–1227. DOI: https://doi.org/10.1134/S0020168517120019

8. Sysoev I.A., Lunina M.L., Alfimova D.L., Blagin A.V., Gusev D.A., Seredin B.M. Growth of Ga_xIn_{1-x} As_yP_{1-y}/GaAs quantum dot arrays by ion beam deposition. *Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 215–221. DOI: https://doi.org/10.1134/S0020168514020174

9. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A. Regularities of ion-beam-induced crystallization and properties of InAs-QD/GaAs(001) semiconductor nanoheterostructures. *Nanotechnologies in Russia*, 2016, vol. 11, no. 7-8, pp. 435–443. DOI: https://doi.org/10.1134/S1995078016040030

10. Panyutin E.A. *High-temperature devices based on gallium phosphide: epitaxial technology, doping concept, and electrical properties*. Diss. for the Cand. Sci. (Phys. and Math.). Saint Petersburg, 2009. 132 p. (In Russian).

11. Baranov A.I., Gudovskikh A.S., Nikitina E.V., Egorov A.Yu. Photoelectric properties of solar cells based on GaPNAs/GaP heterostructures. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, iss. 12, pp. 1117–1120. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063785013120171

Received 17.03.2021; Revised 17.03.2021; Accepted 08.07.2021.

Information about the author:

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

Уважаемые авторы!

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 537.534.35:621.382.323-022.532 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-353-362**

Экспонирование фокусированным ионным пучком сверхтонкого электронного резиста для создания контактов наноразмерного полевого транзистора

К.А. Царик

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

tsarik_kostya@mail.ru

При создании контактов к наноструктурам менее 100 нм используются литографические методы, в частности электронно-лучевая литография и литография фокусированным ионным пучком с применением электронно-чувствительного резиста. Литография фокусированным ионным пучком характеризуется большей чувствительностью к резисту, высоким значением обратного рассеяния и эффектом близости, наилучшим отношением быстродействия и контрастности к минимальным размерам экспонируемых элементов по сравнению с электронно-лучевой литографией. В работе описана методика экспонирования фокусированным ионным пучком ультратонкого резиста. Определена зависимость толщины электронно-чувствительного резиста от степени его разбавления толуолом. Показано, что утонение электронно-чувствительного резиста на основе α-хлорметакрилата с α-метилстиролом до 30 нм позволяет формировать металлические контакты с зазором 500 нм на протяжении 30 мкм. Получены кремниевые наноструктуры в металлическом субмикронном зазоре на диэлектрической подложке. Геометрия полученных наноструктур исследована методами оптической, электронной, ионной и зондовой микроскопии. Установлено, что дополнительные знаки совмещения при создании наноразмерных полевых транзисторов на основе кремниевых наноструктур можно не использовать.

Ключевые слова: фокусированный ионный пучок; плазмохимическое травление; ионная литография; ультратонкий электронно-чувствительный резист; наноразмерные полупроводниковые структуры; кремний на сапфире

Благодарности: автор выражает благодарность профессору В.К. Неволину за полезные рекомендации.

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание FSMR-2020-0017).

© К.А. Царик, 2021

Для цитирования: Царик К.А. Экспонирование фокусированным ионным пучком сверхтонкого электронного резиста для создания контактов наноразмерного полевого транзистора // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 353–362. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-353-362

Focused Ion Beam Exposure of Ultrathin Electron-Beam Resist for Nanoscale Field-Effect Transistor Contacts Formation

K.A. Tsarik

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

tsarik_kostya@mail.ru

Abstract: The lithographic methods are used to form contacts for nanostructures smaller than 100 nm , in part, e-beam lithography and focused ion beam lithography with the use of electron-sensitive resist. Focused ion beam lithography is characterized by greater susceptibility to resist, high value of backward scattering, proximity effect, and best ratio of speed performance and contrast to exposed elements' minimal size, compared to e-beam lithography. In this work, a method of ultrathin resist exposure by focused ion beam is developed. Electron-sensitive resist thickness dependence on increase of its toluene dilution was established. It was shown that electron-sensitive resist thinning down to 30 μm based on α-chloro-methacrylate with α-methylstyrene allows the 500-nm gapped metal contacts formation over a span of 30 μm. Silicon nanostructures within metallic nanoscale gap on dielectric substrate have been obtained. The geometry of obtained nanostructures was studied by optical, electron, ion, and probe microscopy. It has been established that it is possible to not use additional alignment keys when nanoscale field-effect transistors are created based on silicon nanostructures.

Keywords: focused ion beam; plasma-chemical etching; ion lithography; ultrathin electron-sensitive resist; nanoscale semiconductor structures; silicon-on-sapphire

Acknowledgments: the author expresses gratitude to Professor V.K. Nevolin for useful recommendations.

Funding: the study has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state program FSMR-2020-0017).

For citation: Tsarik K.A. Focused ion beam exposure of ultrathin electron-beam resist for nanoscale field-effect transistor contacts formation. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 353–362. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-353-362

Введение. Уменьшение размеров полевых транзисторов и, соответственно, тела канала до 10–20 нм стимулирует активные исследования методов создания таких объектов и их работоспособности. Один из наиболее распространенных методов изготовления наноразмерных структур – фрезерование с использованием фокусированного ионного пучка (ФИП). Метод позволяет удалять материал с помощью ионного луча. Однако воздействие ионов Ga^+ является причиной повреждения материала в мелком поверхностном слое. Как и любой другой разрушающий метод анализа и формирова-

ния структур, ФИП может привести к радиационным и структурным повреждениям подложки. Взаимодействие облучающих ионов с материалом мишени вызывает зарождение дислокаций, аморфизацию, изменение плотности и упругих свойств [1, 2].

Обработку ФИП также можно использовать только в областях непосредственно над необходимыми наноструктурами, которые остаются после плазмохимического травления. Во время травления кремния имплантированный галлий реагирует с плазмой SF_6/Ar, образуя энергонезависимую маску GaF_x, которая защищает получающиеся наноструктуры от процесса травления. Кроме того, литография ФИП не требует дополнительных этапов нанесения резиста или проявки. Таким образом, использование ФИП галлия в совокупности с методами оптической литографии позволяет формировать полевые транзисторы нового поколения, например FinFET [3–5]. При этом удается избавиться от некоторых процессов, таких как нанесение резиста и травление твердой маски, которые при переходе в наноразмерную область достаточно трудоемки и энергозатратны. ФИП является инструментом для получения наноразмерного рельефа и позволяет формировать тела каналов в форме плавников целыми массивами с варьированием расстояния между ними как на кремниевых, так и на германиевых подложках [6].

В качестве литографических методов для создания контактов к наноструктурам менее 100 нм можно выделить электронно-лучевую литографию и литографию ФИП. В обоих методах применяется электронно-чувствительный резист и для создания литографической маски проводится его проявка сухим или жидкостным травлением. Литография ФИП имеет значительные преимущества перед электронно-лучевой литографией с точки зрения чувствительности к резисту, величины обратного рассеяния и эффектов близости. Метод ФИП характеризуется наилучшим отношением быстродействия и контрастности к минимальным размерам экспонируемых элементов.

При экспонировании резистов ионным пучком во избежание повреждения поверхности подложки важно подобрать оптимальные параметры для формирования шаблонов, такие как толщина и количество слоев резистов, доза излучения пучка, апертура, шаг между точками воздействия, энергия используемых ионов. Подбор данных параметров позволяет добиться высокого пространственного разрешения и минимально возможных расстояний между системой контактов сток-исток.

В настоящей работе рассматривается возможность формирования наноразмерных кремниевых структур в субмикронном зазоре металлических контактов в нужном месте подложки с помощью маскирования методом ФИП путем легирования приповерхностной области по заданному рисунку и плазмохимического травления (ПХТ) для образцов кремний на сапфире и метода ионной литографии с применениям электронно-чувствительного резиста.

Эксперимент. В качестве исследуемых образцов использовали подложки кремний на сапфире диаметром 100 мм, с толщиной кремния 220 нм, удельным сопротивлением легированного фосфором слоя кремния 0,3 Ом·см. Из них вырезали образцы размером 2 × 2 см.

Сначала на образце создавали контакты, между которыми будут находиться наноструктуры. Использовали метод воздействия ФИП на электронно-чувствительный резист. На поверхность подложки методом центрифугирования наносили два слоя резиста. В качестве первого слоя выступал резист для обратной литографии LOR 3A, необходимый для лучшего формирования топологии контактов сток-исток. В качестве второго слоя использовали позитивный электронно-чувствительный резист AR-P 6200.04 на основе α-хлорметакрилата с α-метилстиролом с максимально возможным разрешением менее 10 нм. Каждый слой после нанесения методом центрифугирования сушили на плите при следующих условиях: первый слой – 180 °C в течение 2 мин, второй слой – 150 °C

в течение 1 мин. При этом недостаточное время или температура отжига первого слоя могли привести к перемешиванию слоев и невозможности качественной проявки верхнего слоя. Перегрев или превышение времени при сушке вызывает задубливание резиста и приводит к невозможности дальнейшего его проявления.

Паспортные данные резиста предполагают его экспонирование в электронном, а не ионном луче. Найдена зависимость глубины проявления от дозы воздействия ионного пучка при толщине резиста без его разбавления. Для использования высокого разрешения при воздействии ФИП электронный резист должен иметь малую толщину, поэтому его разбавили и нашли зависимость получения толщины резиста от содержания в резисте толуола, позволяющего получить необходимую толщину резиста.

Нанесенный двухслойный резист экспонировали фокусированным ионным пучком в нанотехнологическом комплексе «Нанофаб-100». Экспонирование контактных областей происходило при апертуре ионного пучка 1 пА, энергия ионов галлия равна 30 кэВ. Координаты точек воздействия и время воздействия в точке, а также расстояние между точками воздействия и ориентацию рисунка топологии в пространстве определяли в потоковом файле-шаблоне управления ионным пучком. Специально созданный на языке программирования PHP скрипт формировал данный потоковый файл. Оптимальная доза воздействия определена из полученной зависимости глубины проявки от дозы воздействия ионного пучка. Проявку электронно-чувствительного резиста осуществляли в проявителе AR 600-546 в течение 1 мин, проявку нижнего слоя – в проявителе MF319 в течение 35 с с последующей промывкой в деионизованной воде. Далее образец подсушивали при температуре 130 °С на плите в течение 1 мин и передавали на напыление металла. Топологию проявленных структур контролировали с помощью оптического микроскопа и атомно-силового микроскопа Solver PRO. При проведении обратной литографии пленки Al/Ti толщиной 150 нм/30 нм наносили методом магнетронного распыления и «взрыва» резистов в диметилсульфоксиде. В результате были сформированы контакты сток-исток. Сформированные контакты анализировали методами оптической и атомно-силовой микроскопии для определения оптимальных параметров ионной литографии.

Образцы подложек кремний на сапфире с созданными на поверхности кремния контактами маскировали ФИП с последующим ПХТ для формирования рельефа в виде массива выступающих линий на сапфировой подложке. Доза воздействия ионным пучком была оптимальной для формирования протяженных наноструктур с толщиной в сечении порядка 50 нм. Принцип подбора оптимальных параметров легирования для маскирования опробован и описан в работе [7], моделирование формы области залегания атомов галлия после внедрения показано в [8]. В результате оптимизации в зазоре между каждой парой контактов создано по десять областей в виде линий из ионов галлия для маскирования при ПХТ. По завершении ПХТ образованные группы наноструктур исследовали на проводимость.

Результаты и их обсуждение. Для достижения наноразмерного разрешения необходимо оптимизировать состав, последовательность и толщину слоев резистов. Так как жидкостная проявка резиста LOR имеет изотропный характер, то минимальный зазор между контактами должен быть больше удвоенной толщины резиста LOR, иначе образующийся мостик из резистов, разрывающий области будущих контактов, не будет иметь опоры. Толщину второго резиста определяли с учетом того, что ионный пучок после попадания в материал в результате тормозного пути ионов расходится и имеет сечение по глубине слоя в форме луковицы. Размеры максимальной глубины составляют порядка 80–100 нм. Для того чтобы ограничить расхождение пучка ионов, предпринята попытка утонить резист.

Дальнейшее расширение пучка попадает на резист, не реагирующий на ионы. Оптимальная толщина резистов с точки зрения обеспечения качественных границ при литографии следующая: для LOR 3A – 200 нм, для AR-P 6200.04 – 30 нм.

При формировании зазора литографическими методами необходимо учитывать проявление нижнего слоя резиста на ширину, примерно равную его толщине. Это связано с жидкостным изотропным травлением слоя. Использование сухого травления не предполагалось, так как оно стравливает верхний резист. В настоящей работе выбран зазор между будущими контактами 400–500 нм. Для достижения этого толщина слоя резиста LOR не должна превышать 200 нм, чтобы в результате распроявления между экспонированными областями не обрушился мостик и остался зазор между металлическими дорожками.

Отработан режим нанесения двухслойного резиста путем подбора степени разбавления для верхнего электронно-чувствительного резиста и варьирования следующих параметров: объема наносимого резиста, частоты оборотов центрифуги и времени нанесения. На рис.1 показана зависимость толщины резиста при 6000 оборотах центрифуги от степени его разбавления толуолом. Указанные толщины резиста получены при одинаковом режиме нанесения, кроме разбавления. Представленные на рисунке значения отсутствуют в паспортных данных резиста. Необходимо отметить, что использовать тонкий резист для создания нависающих краев при обратной литографии достаточно сложно ввиду увеличения хрупкости слоя при уменьшении толщины. Эмпирическим путем установлено, что минимальный предел толщины верхнего резиста для использования обратной литографии 30 нм. В случае дальнейшего снижения толщины резиста для длинных, более 10 мкм, структур происходит обвал нависающих краев при проявлении нижнего слоя и металличесая структура при напылении на проявленный участок запыляет боковые стенки проявленной области. В итоге после удаления резиста эти дополнительные области металла остаются и свисают по сторонам, образуя «уши».

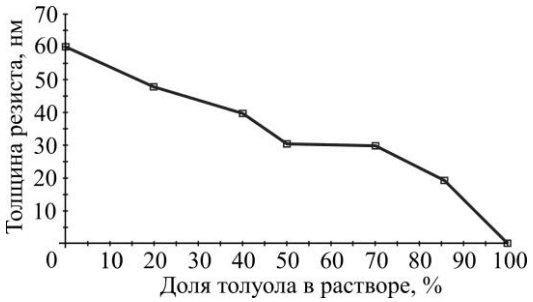


Рис.1. Зависимость толщины резиста от степени разбавления его толуолом при центрифугировании

Fig.1. Dependence of the resist thickness on its dilution with toluene when applied by centrifugation at 6000 rpm

Параметры центрифугирования подбирали из паспортных значений, количество резиста для центрифугирования выбирали исходя из полного покрытия поверхности образца размером 2 × 2 см (таблица).

Оптимальные параметры нанесения двухслойного резиста для обратной литографии при экспонировании ФИП

Optimal parameters for applying a two-layer resist for lift-off lithography using focused ion beam exposure

Резист	Параметры нанесения резиста	Условия сушки	Толщина резиста, нм
LOR 3A	50 мкл 2000 об./мин,10 с 6000 об./мин, 60 с	180 °C, 2 мин	200
AR-P 6200.04 (разбавлен толуолом 1:5 (60:300 мкл))	50 мкл 2000 об./мин,10 с 6000 об./мин, 100 с	150 °C,1 мин	30

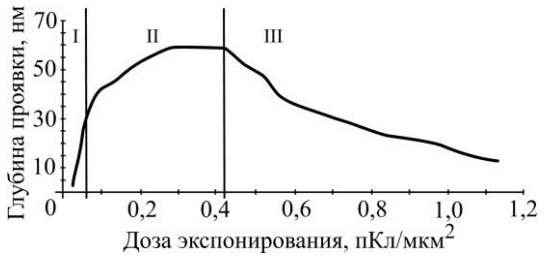


Рис.2. Зависимость глубины проявки от дозы экспонирования резиста на основе α-хлорметакрилата с α-метилстиролом с помощью ФИП (I, II, III – стадии экспонирования)

Fig.2. Dependence of the development depth on the exposure dose of a resist based on α-chloromethacrylate with α-methylstyrene with using focused ion beam (I, II, III – stages of exposure)

Исследовано влияние дозы ионов при экспонировании ФИП на глубину дальнейшей проявки. С этой целью использовали слой AR-P 6200.04 без разбавления при нанесении на 6000 оборотах центрифуги. С помощью ФИП проэкспонирована серия шаблонов с увеличением дозы воздействия от 0,2 до 1,15 пКл/мкм^2 (рис.2). Эффект травления контролировали после экспонирования и вычитали из значения глубины после проявки.

Из рис.2 видно, что при начальном увеличении дозы экспонирования (стадия I) происходит увеличение проявляемой глубины до необходимой для работы. По границе данной стадии можно определить минимальную дозу воздействия для проявления необходимой толщины резиста. Далее резист будет проявляться полностью, пока не начнет возникать эффект полимеризации резиста (стадия III), а затем и травления. Схематично все стадии показаны на рис.3. При дальнейшем увеличении дозы воздействия начинает преобладать травление резиста и глубина проявления будет соответствовать глубине после экспонирования ионным пучком. При травлении резиста эффекты экспонирования и полимеризации будут присутствовать на краях обрабатываемых областей.

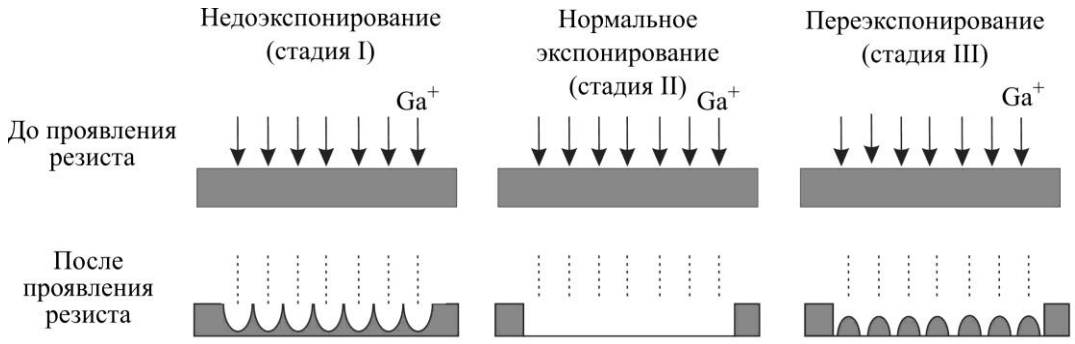


Рис.3. Схематичное изображение проявленных областей для трех стадий воздействия ионного пучка на резист при экспонировании ФИП

Fig.3. Schematic representation of the developed areas for three stages of the action of an ion beam on a resist during exposure focused ion beam

После оптимизации параметров нанесения и дозы воздействия ионов на резист проведено экспонирование литографического рисунка с апертурой ФИП 1 пА при времени воздействия 1,5–2,5 мкс. Расстояние между точками воздействия пучка при этом равно 50 нм. Результат экспонирования и проявления контролировали с помощью оптического микроскопа (рис.4). Из рисунка видно, что мостик резиста между проявленными областями не имеет повреждений и структура готова к нанесению металла с дальнейшим «взрывом» резиста. После данной процедуры на образце формируются металлические контакты с зазором порядка 500 нм.

Для формирования в зазоре кремниевых наноструктур применяли методику маскирования поверхности кремния. Для получения узких наноструктур использовали апертуру 1 пА. Время воздействия в точке составляло 0,5 мкс, число проходов равно 10 000. При шаге точек воздействия 25 нм доза воздействия составляла 0,43 нКл/мкм^2. Выбор времени за один проход обоснован минимально возможным травлением образца, а количество проходов ионного пучка по шаблону определяло суммарную дозу внесенных в приповерхностный слой кремния ионов галлия. Таким образом создавалась устойчивая маска для фторсодержащей плазмы в режиме ПХТ. Это связано с образованием фторида галлия, который препятствует травлению кремния. Десять линий обрабатывались за 40 с, что в совокупности с акустическими колебаниями подложки дает небольшое уширение линий. Благодаря уже полученным контактным площадкам изготовление знаков совмещения не требовалось.

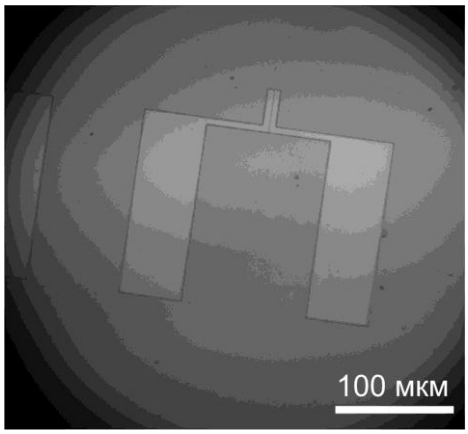
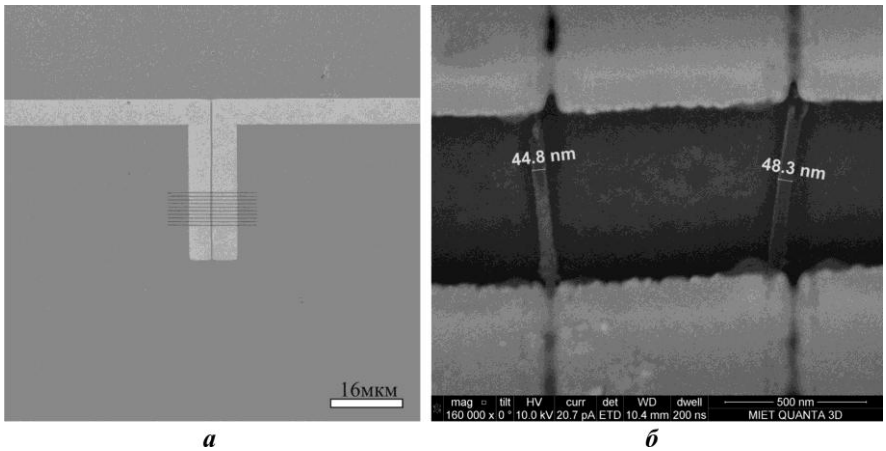


Рис.4. Изображение проявленной области резиста после экспонирования ФИП и обработки в проявителе, полученное с помощью оптического микроскопа

Fig.4. An optical microscope image of the developed resist area after exposure with focused ion beam and processing in a developer

На рис.5 показаны структуры, полученные после плазмохимического травления маскированных областей. Из рис.5,*б* видно, что при маскировании кремния частично протравлен металлический контакт. Однако коэффициент распыления металлической пленки при воздействии ускоренными ионами гораздо меньше, чем у кремния, а кремний травится примерно на 2 нм в глубину при маскировании. Можно сделать вывод, что перерезания металла не произошло.



а ***б***

Рис.5. ФИП-изображение (*а*) и СЭМ-изображение (*б*) кремниевых наноструктур с поперечным размером менее 50 нм, расположенных в зазоре 500 нм

Fig.5. Focused ion beam image (*a*) and SEM image (*b*) of silicon nanostructures with a transverse size of less than 50 nm, located in a gap of 500 nm

ВАХ полученных наноструктур показаны на рис.6,*а*. Измерения проводили с помощью зондовой станции и измерительного прибора ИППП 1. Из рисунка видно, что струкутры имеют изгибающуюся ВАХ, характерную для контактов Шоттки. Для того чтобы оценить проводимость одной кремниевой наноструктуры, на одной из структур с помощью фокусированного ионного пучка обрезали девять из десяти кремниевых наноструктур. Результат измерения ВАХ этой структуры представлен на рис.6,*б*. Сопротивление одной структуры составляет 1,8 ГОм.

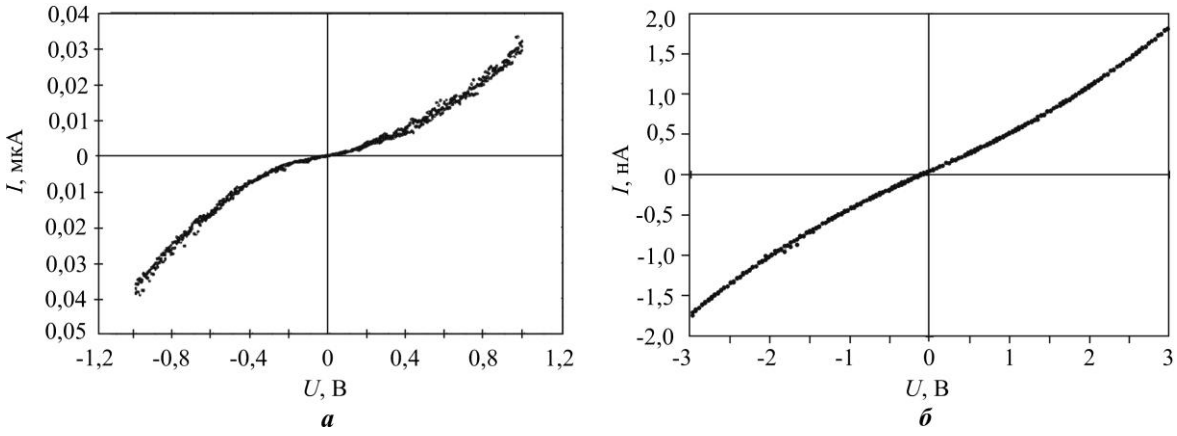


Рис.6. ВАХ группы из десяти наноструктур (*а*) и одной наноструктуры (*б*) между металлическими контактами

Fig.6. Current-voltage characteristics of a group of ten nanostructures (*a*) and one nanostructure (*b*) between metal contacts

Низкая проводимость структуры может быть связана с формированием оксида на поверхности кремния. Другим возможным вариантом может быть эффект недостаточного маскирования кремния ионами галлия в областях на границе металлического контакта. Имеется в виду, что плазмохимическое травление кремния происходит с небольшим подтравом областей, находящихся под металлом. Таким образом, у кремниевых наноструктур есть утонения в местах, где кремний заходит под металл. Однако наличие проводимости и возможность ограничения ее с помощью контроля количества наноструктур свидетельствуют о контакте с металлом. Контакт с металлом осуществляется через пленку кремния, которая скрыта под металлическим контактом и из которой сделаны протяженные наноструктуры между контактами.

Заключение. В результате проведенных экспериментов исследована методика получения кремниевых наноструктур в металлическом наноразмерном зазоре на диэлектрической подложке. Установлено, что толщина электронно-чувствительного резиста зависит от степени его разбавления толуолом, а глубина проявки – от дозы воздействия ионного пучка (1 пА, 30 кэВ). Найдены граничные условия для толщин пленок в случае обратной литографии с высоким разрешением. Полученные полупроводниковые наноструктуры совместимы с заранее изготовленным металлическим субмикронным зазором. Исследования геометрии полученных наноструктур методами оптической, электронной, ионной и зондовой микроскопии показали, что дополнительные знаки совмещения при создании наноразмерных полевых транзисторов на основе кремниевых наноструктур можно не использовать.

Литература

1. ***Razali W.R.W., Rashid N.N.M., Hosman N.K., Aid S.R.*** Surface patterning of silicon and germanium using focused ion beam for the development of FinFET structure // 2019 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM). Pahang: IEEE, 2019. P. 116–118. DOI: https://doi.org/10.1109/RSM46715.2019.8943520

2. Nanoscale structural damage due to focused ion beam milling of silicon with Ga ions / ***E. Salvati, L.R. Brandt, C. Papadaki et al.*** // Materials Letters. 2018. Vol. 213. P. 346–349. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.11.043

3. ***Priya A., Rai S., Mishra R.A.*** Comparative analysis of junctionless bulk and SOI/SON FinFET // 2017 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems (ICPCES). Allahabad: IEEE, 2017. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/ICPCES.2017.8117647

4. ***Kaur G., Gill S.S., Rattan M.*** Design and performance analysis of 20nm 5-fin SOI FinFET for different channel materials // 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA). Greater Noida: IEEE, 2017. P. 1569–1572. DOI: https://doi.org/10.1109/CCAA.2017.8230053

5. ***Leonhardt A., Puydinger dos Santos M.V., Diniz J.A., Manera L.T.*** Ga+ focused ion beam lithography as a viable alternative for multiple fin field effect transistor prototyping // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2016. Vol. 34. Iss. 6. P. 06KA03. DOI: https://doi.org/10.1116/1.4963879

6. A high aspect ratio silicon-fin FinFET fabricated upon SOI wafer / ***Y.G. Liaw, W.-Sh. Liao, M.-Ch. Wang et al.*** // Solid-State Electronics. 2016. Vol. 126. P. 46–50. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sse.2016.09.017

7. Silicon-based nanostructures formed by plasma etching through a mask formed by a focused beam of Ga+ ions / ***I.I. Bobrinetskii, A.V. Volkova, A.A. Zaitsev et al.*** // Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. Iss. 7. P. 482–486. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739715070045

8. ***Bobrinetskii I.I., Nevolin V.K., Tsarik K.A., Chudinov A.A.*** A distribution of Ga+ ions in a silicon substrate for nano-dimensional masking // Russian Microelectronics. 2014. Vol. 43. Iss. 1. P. 15–20. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739713060036

Поступила в редакцию 15.04.2021 г.; после доработки 15.04.2021 г.; принята к публикации 08.07.2021 г.

Царик Константин Анатольевич – научный сотрудник Научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), tsarik_kostya@mail.ru

References

1. Razali W.R.W., Rashid N.N.M., Hosman N.K., Aid S.R. Surface patterning of silicon and germanium using focused ion beam for the development of FinFET structure. *2019 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)*, Pahang, IEEE, 2019, pp. 116–118. DOI: https://doi.org/10.1109/RSM46715.2019.8943520

2. Salvati E., Brandt L.R., Papadaki C., Zhang H., Mousavi S.M., Wermeille D., Korsunsky A.M. Nanoscale structural damage due to focused ion beam milling of silicon with Ga ions. *Materials Letters*, 2018, vol. 213, pp. 346–349. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.11.043

3. Priya A., Rai S., Mishra R.A. Comparative analysis of junctionless bulk and SOI/SON FinFET. *2017 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems (ICPCES)*. Allahabad, IEEE, 2017, pp. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/ICPCES.2017.8117647

4. Kaur G., Gill S.S., Rattan M. Design and performance analysis of 20nm 5-fin SOI FinFET for different channel materials. *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*. Greater Noida, IEEE, 2017, pp. 1569–1572. DOI: https://doi.org/10.1109/CCAA.2017.8230053

5. Leonhardt A., Puydinger dos Santos M.V., Diniz J.A., Manera L.T. Ga+ focused ion beam lithography as a viable alternative for multiple fin field effect transistor prototyping. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2016, vol. 34, iss. 6, p. 06KA03. DOI: https://doi.org/10.1116/1.4963879

6. Liaw Y.-G., Liao W.-Sh., Wang M.-Ch., Lin Ch.-L., Zhou B., Gu H., Li D., Zou X. A high aspect ratio silicon-fin FinFET fabricated upon SOI wafer. *Solid-State Electronics*, 2016, vol. 126, pp. 46–50. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sse.2016.09.017

7. Bobrinetskii I.I., Volkova A.V., Zaitsev A.A., Nevolin V.K., Tsarik K.A., Chudinov A.A. Silicon-based nanostructures formed by plasma etching through a mask formed by a focused beam of Ga+ ions. *Russian Microelectronics*, 2015, vol. 44, iss. 7, pp. 482–486. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739715070045

8. Bobrinetskii I.I., Nevolin V.K., Tsarik K.A., Chudinov A.A. A distribution of Ga+ ions in a silicon substrate for nano-dimensional masking. *Russian Microelectronics*, 2014, vol. 43, iss. 1, pp. 15–20. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739713060036

Received 15.04.2021; Revised 15.04.2021; Accepted 08.07.2021.

Information about the author:

Konstantin A. Tsarik – Researcher of the Scientific and Educational Center «Probe Microscopy and Nanotechnology», National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), tsarik_kostya@mail.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- **по каталогу** «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «УП Урал-Пресс». Подписной индекс 47570
- **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

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 621.3.049.774 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-363-373**

Определение LC-параметров корпусов ИМС с помощью электромагнитного моделирования

***Е.Н. Белов*[1,2], *Ю.А. Савостин*[1]**

[1]*АО «ПКК Миландр», г. Москва, Россия*
[2]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*

Belov.e@milandr.ru

Для уменьшения негативного влияния защитного корпуса на конечные характеристики интегральной микросхемы еще на этапе разработки необходимо подобрать оптимальные параметры корпуса. Для расчета электрических параметров электродвигателей, печатных плат, микросхем широко используется электромагнитное моделирование. В работе для характеризации LGA-корпуса интегральной микросхемы проведено полноволновое трехмерное электромагнитное моделирование методом конечных элементов в частотной области. Полученные в результате моделирования *S*-параметры преобразованы в эквивалентную модель линии передач RLGC для определения электрических параметров – собственной емкости и индуктивности выводов, емкости связи между соседними выводами, от которых зависят полоса пропускания корпуса и перекрестные помехи. Сравнение результатов моделирования и измерения емкостей показало, что расхождение составляет менее 5 %. Результаты моделирования индуктивности оказались менее точными, однако это не имеет существенного значения для низко- и среднечастотного применения.

Ключевые слова: уравнения Максвелла; метод конечных элементов; корпус ИМС; линия передачи RLGC

Для цитирования: Белов Е.Н., Савостин Ю.А. Определение LC-параметров корпусов ИМС с помощью электромагнитного моделирования // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 363–373. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-363-373

© Е.Н. Белов, Ю.А. Савостин, 2021

IC Packages' LC Parameters Definition Using Electromagnetic Modeling

***E.N. Belov*[1,2], *Yu.A. Savostin*[1]**

[1]*JSC «ICC Milandr», Moscow, Russia*
[2]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

Belov.e@milandr.ru

Abstract: At the IC design phase it is required to consider all possible factors to ensure the produced device's compliance with specified requirements. For instance, it is necessary to select an optimum package and to lower its impact on IC's final characteristics. Electromagnetic simulation is widely used to calculate electrical parameters of the electric motors, printed circuit boards, and microcircuits. In this work, full-wave three-dimensional finite element method simulation in frequency domain was used to characterize LGA package. *S*-parameters matrix obtained by modeling was converted to an equivalent RLGC transmission line model to determine the electrical parameters of the package – self-capacitance and inductance of the leads, mutual capacitance of the adjacent leads, – on which the package bandwidth and crosstalk depend. Correctness of the obtained results was confirmed by comparison with the measurements results. It has been found that discrepancy between the results of modeled and measured capacitance was less than 5 %. The inductance modeling results turned out to be less accurate, which, however, is not significant for low and medium frequency applications.

Keywords: Maxwell equations; finite element method; IC package; RLGC transmission line

For citation: Belov E.N., Savostin Yu.A. IC packages' LC parameters definition using electromagnetic modeling. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 363–373. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-363-373

Введение. Кристаллы ИМС для защиты от влияния окружающей среды, как правило, помещают в корпус. Однако защитный корпус оказывает негативное влияние на такие характеристики ИМС, как полное входное и выходное сопротивления, время фронта и среза выходного сигнала, полоса пропускания ИМС, максимальная потребляемая мощность. И хотя это влияние незначительно, при разработке ИМС, к характеристикам которой предъявляются жесткие требования, его следует учитывать. Чтобы изготовленный прибор удовлетворял всем предъявляемым к нему требованиям, еще на этапе разработки ИМС необходимо подобрать защитный корпус, который нивелировал бы его негативное влияние схемотехнически. В этом случае наиболее существенными параметрами являются собственная емкость проводящей дорожки вывода, емкость связи между соседними выводами, собственная индуктивность и взаимная индуктивность выводов, задержка распространения сигнала, тепловое сопротивление корпуса [1]. И если тепловое сопротивление только ограничивает максимальную выделяемую мощность ИМС, то остальные параметры влияют на электрические характеристики схемы [1, 2].

Емкость выводов корпуса обычно варьируется от десятков фемтофарад до десятков нанофарад, а индуктивность – от единиц до десятков наногенри. При этом и емкость, и индуктивность выводов корпуса – частотно-зависимые параметры, соответственно для корректной оценки влияния параметров корпуса на работу микросхемы требуется исследовать корпус на всем рабочем диапазоне микросхемы. Для измерения данных параметров на низких и средних частотах необходим качественный анализатор цепей, а требования к оснастке минимальные. В то же время измерения на высоких частотах, которые представляют наибольший интерес (именно по результатам данных измерений, например, можно судить о граничной частоте корпуса), требуют более точного оборудования и налагают серьезные ограничения на используемую оснастку. Отдельной проблемой являются измерения индуктивности выводов, так как внешний вывод исследуемого тракта расположен с одной стороны корпуса, а внутренний – с другой. В таком случае приходится либо исследовать корпус без крышки, что отразится на окончательных результатах, либо использовать различные косвенные методы измерения, которые достоверны только на определенном диапазоне частот.

Моделирование электрофизических параметров. Один из способов получения электрофизических параметров – их моделирование на заданном диапазоне частот с последующим подтверждением полученных данных результатами измерений на низких частотах. Для точного расчета емкости и индуктивности выводов корпуса следует применять электромагнитное моделирование, основанное на решении системы дифференциальных уравнений Максвелла [3]. Существуют разные подходы к решению системы дифференциальных уравнений в частных производных: расчет во временной и частотной областях, квазистатический [4] и полноволновый расчеты [5], интегральные и дифференциальные методы и т.д.

В настоящей работе трехмерное электромагнитное моделирование проводится в частотной области путем решения интегральной системы уравнений Максвелла [6]. С этой целью используется метод конечных элементов [7], суть которого заключается в разбиении области решения на конечное число подобластей (элементов). В каждом элементе выбирается вид аппроксимирующей функции, которая вне границ элемента равна нулю. Как правило, можно выбирать между полиномами нулевого (константа) и первого (линейное уравнение) порядков. Коэффициенты аппроксимирующих функций выбираются из условия равенства значений функций соседних элементов на общей границе, эти значения на общих границах (в узлах) и являются решением. Зная коэффициенты функции, можно построить систему линейных алгебраических уравнений, которая может быть решена аналитически [8].

Результатом моделирования в большинстве случаев являются матрицы *S*-параметров портов, точно характеризующих их поведение, однако в ряде случаев могут потребоваться эквивалентные емкость и индуктивность тракта [9]. От *S*-параметров можно перейти к модели с распределенными или сосредоточенными параметрами. Модель с сосредоточенными параметрами представляет собой один блок модели с распределенными параметрами и отличается простотой (SPICE работает только с такими типами моделей). Однако на высоких частотах данная модель теряет достоверность: несколько резонансных контуров свести к одному физически невозможно. Моделью с сосредоточенными параметрами для описания межсоединений и проводников является линия передачи RLGC [10], перейти к ней от *S*-параметров можно по следующим формулам:

$$Z = \sqrt{Z_0^2 \frac{\left(1+S_{11}\right)^2 - S_{21}^2}{\left(1-S_{11}\right)^2 - S_{21}^2}},$$

$$\gamma = \ln\left(\frac{1-S_{11}^2+S_{21}^2 \pm \sqrt{\left(1+S_{11}^2-S_{21}^2\right)^2 - 4S_{11}^2S_{21}^2}}{2S_{21}}\right)\cdot L^{-1},$$

$$\begin{cases} R = \mathrm{Re}\left(\gamma Z\right), \\ L = \mathrm{Im}\left(\gamma Z\right)/\omega, \\ G = \mathrm{Re}\left(\gamma Z\right), \\ C = \mathrm{Im}\left(\gamma Z\right)/\omega, \end{cases}$$

где ω – частота, Гц; L – длина линии, м.

Как правило, преобразовывается матрица $S(\omega)$ центральной частоты имеющегося диапазона, что позволяет полученной RLC-модели максимально соответствовать исходным S-параметрам. Однако для оценки частотной зависимости RLC-параметров преобразование проводится для всего диапазона частот. Входными данными для моделирования служат топология проводящих слоев, а также параметры используемых при изготовлении материалов. И то и другое может предоставить фирма-изготовитель корпуса.

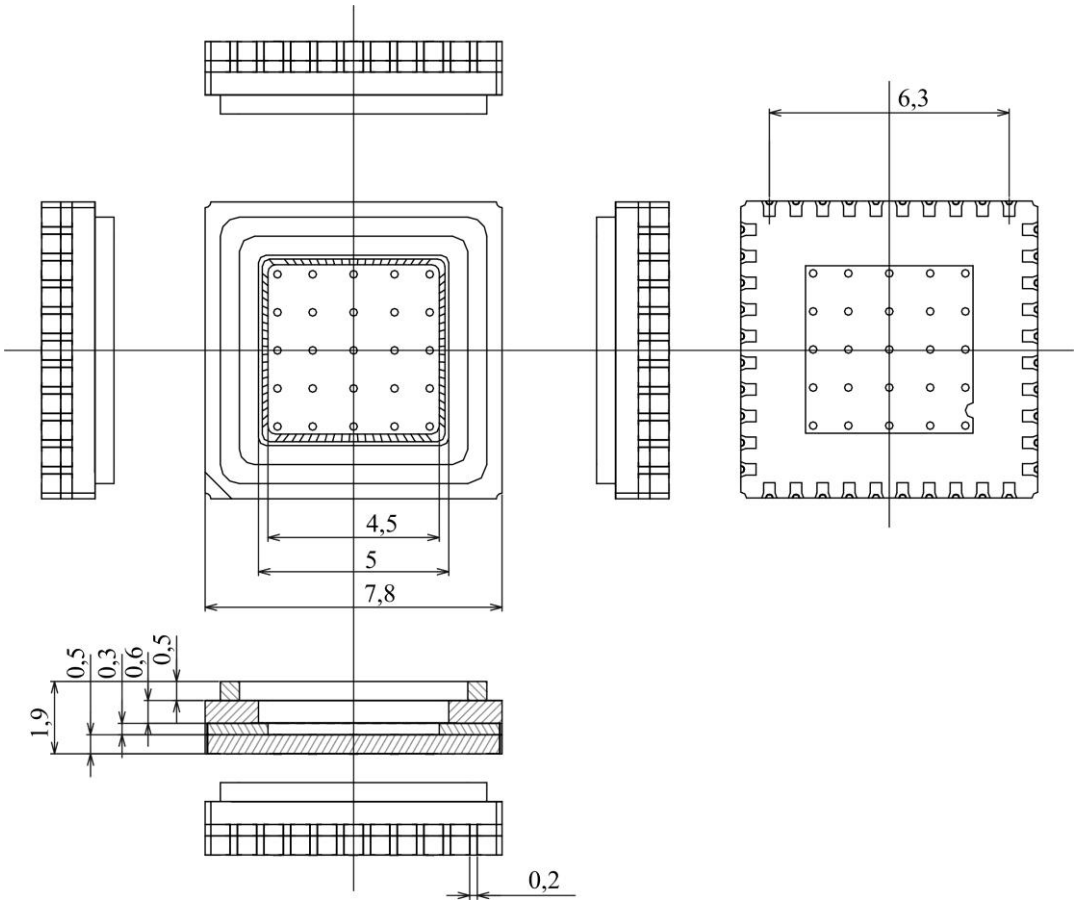


Рис.1. Чертеж корпуса ИМС
Fig.1. Drawing of the IC package

Преимущество данного подхода по сравнению с классическим – возможность исследования корпуса в широком диапазоне частот без необходимости разработки специальной оснастки, специфичной для каждой модели корпуса. Также снижаются требования, налагаемые на измерительное оборудование. Недостатком данного подхода является меньшая точность результатов, во многом зависящая от точности модели. Чертеж исследуемого корпуса ИМС приведен на рис.1.

Измерение электрофизических параметров. Для измерения RLC-параметров можно использовать микрозондовую станцию либо оснастку для коммутации исследуемого прибора с BNC-разъемами измерительного прибора. Преимущество микрозондовой станции состоит в следующем: можно измерить электрические параметры между любыми точками. Однако снижается качество калибровки и, как следствие, воспроизводимость результатов. Для подобных измерений возникает необходимость снимать крышку, что также приводит к искажению результатов измерений. Поэтому принято решение для измерений использовать специальную оснастку, влияние которой исключается за счет калибровки стенда.

На рис.2 приведена схема измерительного стенда, в котором задействованы LCR-метр Agilent E4980A, матричный коммутатор производства АО «ПКК Миландр» (г. Москва), ПК с управляющей программой, плата с коммутирующим устройством и исследуемый прибор.

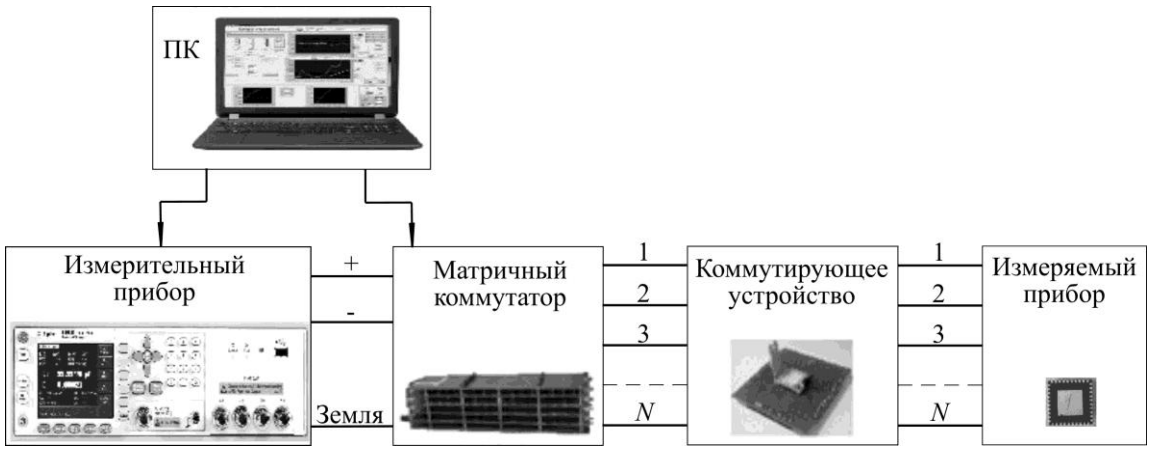


Рис.2. Схема измерительного стенда
Fig.2. Diagram of the measuring stand

Анализ полученных результатов. Для оценки влияния топологии токопроводящей дорожки и ее местоположения в корпусе на электрические параметры представлены результаты моделирования: *S*-параметры (рис.3), результаты промежуточного преобразования импедансов (рис.4,*а*) и полученные на их основе собственная емкость выводов (рис.4,*б*) и индуктивность токопроводящих дорожек одной из сторон корпуса (рис.4,*в*).

Зависимость собственной емкости выводов от частоты тем больше, чем дальше данные выводы находятся от центра стороны, что объясняется увеличением длины дорожки. Однако все выводы имеют похожую частотную зависимость: до частоты примерно 50 МГц зависимость емкости от частоты минимальна, с 50 до 120 МГц емкость линейно уменьшается с ростом частоты, а затем зависимость снова минимальна (ровная прямая на рис.4,*б* до 1 ГГц и выше). Подобная зависимость может объясняться эффектами, происходящими в материалах: с увеличением частоты из-за эффекта поляризации

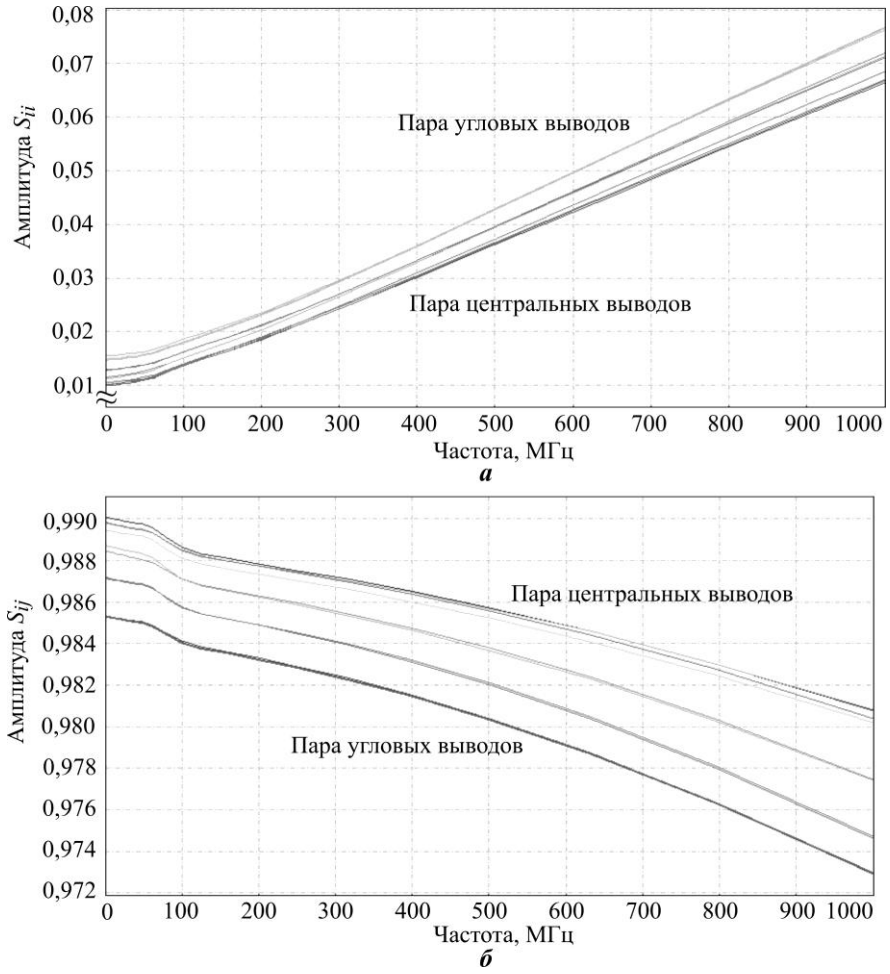


Рис.3. Зависимости амплитуды элементов матрицы *S*-параметров от частоты:
а – обратные потери; *б* – вносимые потери
Fig.3. Dependences of the amplitude of *S*-parameters matrix elements on the frequency:
a – return loss; *b* – insertion loss

уменьшается емкость, растет влияние скин-эффекта, т.е. эффективная площадь проводника экспоненциально снижается с ростом частоты, а значит уменьшается и количество носителей заряда при той же плотности тока, что также приводит к снижению емкости. Отметим, что вклад данных эффектов зависит и от используемых материалов (их параметров), и от топологии (геометрических размеров элементов), поэтому в рамках одного корпуса разные выводы могут иметь различающиеся зависимости.

Индуктивность токопроводящей дорожки вывода (см. рис.4,*в*) с ростом частоты уменьшается, что объясняется частотной зависимостью магнитной восприимчивости материала диэлектрика, а также скин-эффектом, уменьшающим эффективную площадь проводника. Также при электромагнитном моделировании автоматически учитываются неоднородности. Например, из-за того что части проводящей дорожки накапливают заряд, в разных частях дорожки будет протекать разный ток, что сказывается на окончательных результатах.

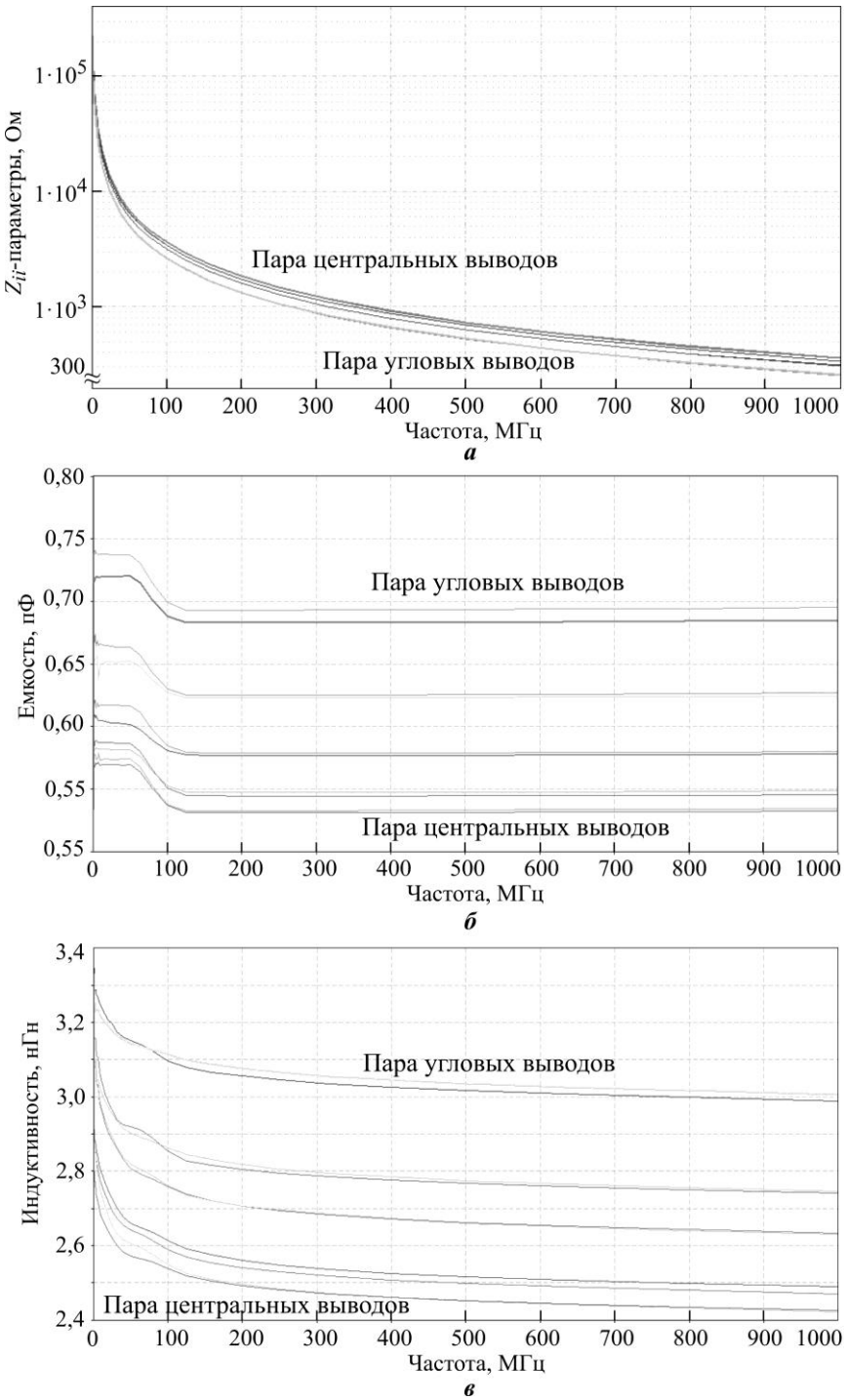


Рис.4. Зависимости промежуточных *Z*-параметров (*а*), собственной емкости выводов (*б*) и индуктивности проводников выводов (*в*) одной из сторон симметричного LGA-корпуса от частоты

Fig.4. Dependences of intermediate *Z*-parameters (*a*), self-capacitance of the symmetrical LGA package's terminals from one of the sides (*b*), self-inductance of the symmetrical LGA package's terminals from one of the sides (*c*) on the frequency

Индуктивность около 3 нГн – достоверный результат, так как длина проводников выводов составляет примерно 4–4,5 мм (эмпирическое правило следующее: 1 нГн на 1 мм дает близкий результат). Более высокое значение как емкости, так и индуктивности у угловых выводов по сравнению с центральными объясняется различием топологии (рис.5).



Рис.5. Фрагмент топологии корпуса с отличающимися полигонами выводов (вертикальные проводники идентичны)
Fig.5. Fragment of the package's topology with different lead polygons (vertical conductors are identical)

Так, у углового вывода большая длина дорожки относительно центрального, а по углам находятся вертикальные проводники (вписанные в квадраты окружности), соединяющие дно и крышку корпуса. Поэтому наличие у угловых выводов большей емкости и индуктивности, чем у выводов, расположенных на середине стороны, ожидаемо.

Сравнительные результаты моделирования и измерения емкости и индуктивности выводов представлены на рис.6. Так как корпус симметричен, показаны результаты для одной из его сторон. Более низкая по сравнению с остальными парами емкость связи выводов 10-11, а также 40-1 объясняется угловым положением данных выводов и, как следствие, большим расстоянием, разделяющим их. Результаты моделирования и измерения собственной емкости и емкости связи хорошо коррелируют между собой, расхождение составляет менее 3 %, что является положительным результатом. Частота 1 МГц выбрана ввиду относительно низких требований к измерительному стенду и широкому использованию в справочной литературе.

Моделирование и измерение собственной индуктивности выводов различаются на 30 %. Судя по графику, имеет место постоянное смещение, вызванное, вероятно, не совсем корректными параметрами материала проводящего слоя и погрешностью измерения. Как уже отмечалось, точное измерение индуктивности выводов корпуса проблематично. Однако зависимость индуктивности вывода от его положения получилась одинаковой при использовании обоих методов: чем дальше от центра корпуса, тем выше индуктивность, что также соответствует топологии (см. рис.5).

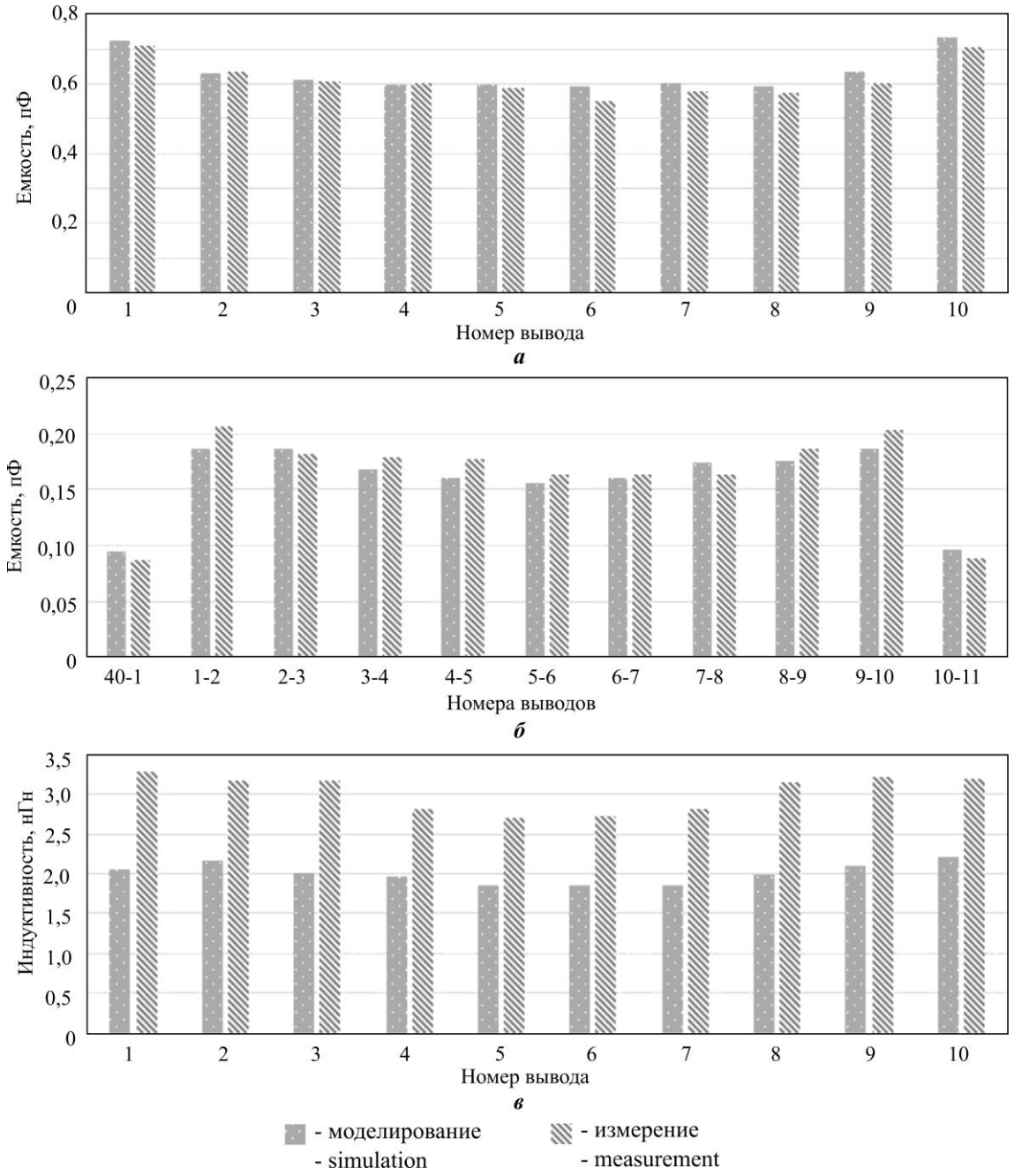


Рис.6. Сравнение результатов моделирования и измерения собственной емкости выводов (*а*), емкости связи соседних выводов (*б*) и собственной индуктивности выводов (*в*) на частоте 1 МГц
Fig.6. Comparison of the simulation results of calculation and measurement of pin's self-capacitance (*a*), pin's mutual capacitance of adjacent terminals (*b*), pin's self-inductance (*c*) at 1 MHz frequency

Заключение. Полученные результаты моделирования на частоте 1 МГц хорошо согласуются с результатами измерения: расхождение по емкостям выводов составляет менее 5 %. Расхождение по индуктивностям трасс может оказывать влияние только на высоких частотах, когда индуктивность начинает вносить свой вклад в импеданс тракта. Однако результаты моделирования и измерения индуктивности коррелируют между собой. Из чего следует достоверность расчетной модели и применимость данного метода для характеризации корпусов на диапазонах частот, где измерения затруднены.

Литература

1. ***Johnson H., Graham M.*** High speed digital design. Jersey City, NJ: Prentice Hall, 1993. 446 p.

2. ***Kim H., Cho J., Achkir B., Fa J.*** Modeling and measurement of ground bounce induced by high-speed output buffer with on-chip low-dropout (LDO) regulator // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018. Vol. 60. No. 4. P. 1022–1025. DOI: https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2759123

3. A high-order accurate scheme for the dispersive Maxwell's equations and material interfaces on overset grids / ***J.W. Banks, B.B. Buckner, W.D. Henshaw et al.*** // 2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). Monterey, CA: IEEE, 2020. P. 1–2. DOI: https://doi.org/10.23919/ACES49320.2020.9196202

4. ***Orlov P.E., Buichkin E.N.*** Quasistatic and electromagnetic simulation of interconnects of printed circuit boards with modal reservation // 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Erlagol: IEEE, 2017. P. 54–58. DOI: https://doi.org/10.1109/EDM.2017.7981707

5. Mixed finite element method for full-wave simulation of bioelectromagnetism from DC to microwave frequencies / ***R. Hong, K. Chen, X. Hou et al.*** // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2020. Vol. 67. No. 10. P. 2765–2772. DOI: https://doi.org/10.1109/TBME.2020.2970607

6. A well-scaling parallel FEM-DDM algorithm for electromagnetic simulation on SW26010 many-core processor / ***J.-Z. Lai, R.-Q. Liu, W.-J. He et al.*** // 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Hangzhou: IEEE, 2020. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/NEMO49486.2020.9343550

7. ***Logan D.L.*** A first course in the finite element method. 4th ed. Florence, KY: Cengage Learning, 2006. 836 p.

8. ***Golub G., Van Loan Ch.*** Matrix computations. 3rd ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1996. 728 p.

9. ***Yan S.*** Time domain electromagnetic (EM) simulations for IC packages modeling: Master's thesis. Lund: Lund University, 2014. 87 p.

10. ***Naik B.H., Misbahuddin M., Paidimarry C.S.*** S-parameter modeling and analysis of RGLC interconnect for signal integrity // 2017 International Conference on Recent Trends in Electrical, Electronics and Computing Technologies (ICRTEECT). Warangal: IEEE, 2017. P. 11–16. DOI: https://doi.org/10.1109/ICRTEECT.2017.41

Поступила в редакцию 30.03.2021 г.; после доработки 30.04.2021 г.; принята к публикации 08.07.2021 г.

Белов Егор Николаевич – инженер-программист АО «ПКК Миландр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5), аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Belov.e@milandr.ru

Савостин Юрий Александрович – начальник исследовательской лаборатории АО «ПКК Миландр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5), savostin.u@ic-design.ru

References

1. Johnson H., Graham M. *High speed digital design*. Jersey City, NJ, Prentice Hall, 1993. 446 p.

2. Kim H., Cho J., Achkir B., Fa J. Modeling and measurement of ground bounce induced by high-speed output buffer with on-chip low-dropout (LDO) regulator. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, vol. 60, no. 4, pp. 1022–1025. DOI: https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2759123

3. Banks J.W., Buckner B.B., Henshaw W.D., Kildishev A.V., Kovačič G., Prokopeva L.J., Schwenderman D.W. A high-order accurate scheme for the dispersive Maxwell's equations and material interfaces on overset grids. *2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*. Monterey, CA, IEEE, 2020, pp. 1–2. DOI: https://doi.org/10.23919/ACES49320.2020.9196202

4. Orlov P.E., Buichkin E.N. Quasistatic and electromagnetic simulation of interconnects of printed circuit boards with modal reservation. *2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Erlagol, IEEE, 2017, pp. 54–58. DOI: https://doi.org/10.1109/EDM.2017.7981707

5. Hong R., Chen K., Hou X., Sun Q., Liu N., Liu Q.H. Mixed finite element method for full-wave simulation of bioelectromagnetism from DC to microwave frequencies. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2020, vol. 67, no. 10, pp. 2765–2772. DOI: https://doi.org/10.1109/TBME.2020.2970607

6. Lai J.-Z., Liu R.-Q., He W.-J., Wang W., Yang M.-L., Sheng X.-Q. A well-scaling parallel FEM-DDM algorithm for electromagnetic simulation on SW26010 many-core processor. *2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*. Hangzhou, IEEE, 2020, pp. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/NEMO49486.2020.9343550

7. Logan D.L. *A first course in the finite element method.* 4th ed. Florence, KY, Cengage Learning, 2006. 836 p.

8. Golub G., Van Loan Ch. *Matrix computations.* 3rd ed. Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1996. 728 p.

9. Yan S. *Time domain electromagnetic (EM) simulations for IC packages modeling.* Master's thesis. Lund, Lund University, 2014. 87 p.

10. Naik B.H., Misbahuddin M., Paidimarry C.S. S-parameter modeling and analysis of RGLC interconnect for signal integrity. *2017 International Conference on Recent Trends in Electrical, Electronics and Computing Technologies (ICRTEECT).* Warangal, IEEE, 2017, pp. 11–16. DOI: https://doi.org/10.1109/ICRTEECT.2017.41

Received 30.03.2021; Revised 30.04.2021; Accepted 08.07.2021.

Information about the authors:

Egor N. Belov – Software Engineer, JSC «ICC Milandr» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5), PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Belov.e@milandr.ru

Yury A. Savostin – Head of Research Laboratory, JSC «ICC Milandr» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5), savostin.u@ic-design.ru

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

С тематическими указателями статей за 1996 - 2020 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

http://ivuz-e.ru

УДК 621.382.323:539.23:001.891.57TCAD DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-374-386

TCAD-моделирование нанометровых структур FinFET на объемном кремнии с учетом воздействия радиации

К.О. Петросянц[1,2], Д.С. Силкин[1], Д.А. Попов[1], Бо Ли[3], Сюй Чжан[3]

[1]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия
[2]Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия
[3]Институт микроэлектроники Китайской академии наук, г. Пекин, Китай

kpetrosyants@hse.ru

При переходе от планарных структур MOSFET к трехмерным структурам FinFET обеспечивается стойкость к разным видам облучения. Однако характеристики облученных приборов, созданных на разных предприятиях-изготовителях, существенно различаются, и объяснить зависимость радиационной стойкости структур FinFET от вариаций их физико-топологических параметров и электрических режимов достаточно сложно. В работе разработана радиационная версия TCAD-модели МОП-транзистора со структурой FinFET на объемном кремнии. В базовую модель нанометрового МОП-транзистора введены дополнительные специфические для структур FinFET полуэмпирические радиационные зависимости для эффективной подвижности носителей заряда, концентрации ловушек в объемах оксидов SiO_2 и HfO_2 и на поверхностях раздела оксид – кремний. Модель реализована в среде Sentaurus Synopsys TCAD. Валидация модели проведена на тестовом наборе структур FinFET с длиной канала от 60 до 7 нм без облучения и в диапазоне доз гамма-облучения до 1 Мрад. Сравнение статических ВАХ, полученных путем моделирования, с результатами эксперимента показало погрешность, не превышающую 15 %.

Ключевые слова: структура FinFET; ионизирующее излучение; TCAD-моделирование

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Фонда научных исследований Китая (проект № 20-57-53004).

Для цитирования: TCAD-моделирование нанометровых структур FinFET на объемном кремнии с учетом воздействия радиации / К.О. Петросянц, Д.С. Силкин, Д.А. Попов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 374–386. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-374-386

© К.О. Петросянц, Д.С. Силкин, Д.А. Попов, Бо Ли, Сюй Чжан, 2021

TCAD Modeling of Nanoscale Bulk FinFET Structures with Account of Radiation Exposure

K.O. Petrosyants[1,2], D.S. Silkin[1], D.A. Popov[1], Bo Li[3], Xu Zhang[3]

[1]National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
[2]Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[3]Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

kpetrosyants@hse.ru

Abstract: Transition from planar MOSFET structures to FinFET 3D structures ensures various radiation type resistance. However, the characteristics of radiation-exposed devices made at different factories vary considerably and it is hard to explain FinFET structures' radiation resistance dependence on variations of their physical and topological parameters and electrical modes. In this work, a RAD-TCAD model of FinFET on bulk silicon was developed. Additional semi-empirical radiation dependences specific to FinFET structures were introduced into the basic model of a nanometer MOSFET: the charge carrier effective mobility, the traps concentration in the SiO_2 and HfO_2 oxides and at the Si / SiO_2 interface. The model was implemented in the Sentaurus Synopsys TCAD environment. The model was validated on a test set of FinFET structures with a channel length from 60 nm to 7 nm before and after exposure to gamma irradiation in the dose range up to 1 Mrad. Comparison of the modeled and experimental *I-V* characteristics has shown an error of no more than 15 %.

Keywords: FinFET structure; ionizing radiation; TCAD modeling

Funding: the study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research and National Natural Science Foundation of China (project No. 20-57-53004).

For citation: Petrosyants K.O., Silkin D.S., Popov D.A., Li Bo, Zhang Xu. TCAD modeling of nanoscale bulk FinFET structures with account of radiation exposure. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 374–386. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-5-374-386

Введение. Основным направлением совершенствования КМОП-технологии производства высокопроизводительных микропроцессоров, СБИС-памяти и цифровых систем по-прежнему является уменьшение размеров элементов (масштабирование). Практика показывает, что при достижении проектных норм 30 нм эффективное решение проблемы состоит в переходе от планарных структур MOSFET к трехмерным структурам FinFET [1–3]. При этом достигается ряд преимуществ: эффективное управление током канала с помощью 3D-конструкции затвора, слабое влияние короткоканальных эффектов, лучшая переключательная способность, а также обеспечивается стойкость к воздействию различных видов облучения [4–6]. В настоящее время промышленно освоены FinFET-технологии уровня 14 [7] и 7 нм [8, 9].

Существует достаточно много экспериментальных подтверждений высокой стойкости структур FinFET к ионизирующему излучению [5–10]. Вместе с тем авторы часто

указывают на то, что из-за нестабильности технологии геометрические и физические параметры некоторых структур FinFET, изготовленных в едином технологическом цикле, могут существенно различаться, что влияет на разброс их электрических характеристик. На практике эту проблему решают при выпуске структур FinFET в виде модулей с параллельным включением нескольких (или даже нескольких десятков) таких структур. Если отклонения параметров отдельных структур FinFET от заданной конструктором нормы имеют место внутри одного модуля, то для модуля в целом отклонения этих параметров в значительной степени нивелируются.

Анализ имеющихся экспериментальных результатов показывает, что характеристики облученных приборов, созданных на разных предприятиях-изготовителях, существенно различаются и четкую картину, объясняющую зависимость радиационной стойкости структур FinFET от вариаций их физико-топологических параметров и электрических режимов работы, составить сложно: необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования. В связи с этим важным инструментом в решении данной проблемы является TCAD-моделирование. Моделированию структур FinFET без учета и с учетом радиационных эффектов посвящен ряд работ [11–15], в них используются коммерческие версии TCAD-симуляторов, в которых не учитывается специфика структур FinFET. Модели электрофизических параметров, применяемые для структур FinFET, описаны недостаточно либо вообще не описаны. Так, в работах [11–14] отсутствует список подключенных моделей подвижности носителей заряда. Кроме того, подбор значений концентраций ловушечных уровней в объеме оксида и на границах оксид – кремний для каждой дозы радиации осуществляется вручную методом подбора.

В настоящей работе предлагается версия радиационной TCAD-модели, учитывающая особенности конструкции и электрофизических характеристик прибора, в значительной степени свободная от отмеченных недостатков. Модель реализована в среде Sentaurus Synopsys, в которую дополнительно введены аналитические аппроксимации для радиационно зависимых электрофизических параметров ($\mu_{эфф}$, τ, N_{ot}, N_{it} и др.). Результаты расчетов ВАХ структур FinFET с длиной канала 30, 40 и 60 нм, изготовленных на объемном кремнии, подтверждают адекватность радиационной TCAD-модели в диапазоне доз до 1 Мрад.

Исследуемые структуры FinFET. Типичная структура FinFET на объемном кремнии приведена на рис.1. Полупроводниковая пластина вытравливается так, чтобы на поверхности образовались кремниевые «плавники» (Si-fin), которые изолируются друг от друга оксидом кремния (Shallow Trench Isolation, STI): на каждом «плавнике» с трех сторон формируется затворная структура (Gate & GOX), длина которой задает длину канала. Области сток-исток формируются эпитаксией кремния (Epi-S/D), предварительно эти области отделяются от затворной структуры маской (Spacer) [16].

Исследовали структуры FinFET на объемном кремнии с длиной канала 30, 40 и 60 нм. Приборы изготовлены Институтом микроэлектроники Китайской академии наук (г. Пекин), там же проведены эксперименты по облучению приборов в диапазоне доз до 1 Мрад и по измерению их электрических характеристик до и после облучения.

Для нивелирования разброса ВАХ от прибора к прибору на тестовой пластине изготовлены три модуля структуры FinFET с длиной канала 30, 40 и 60 нм. Каждый модуль состоит из восьми одинаковых приборов с одной и той же длиной канала. Уровень легирования «плавников» $2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, областей сток-исток $2 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$. Конструкция затвора выполнена в виде стека: SiO_2–HfO_2–TiN–TiAl–TiN. Толщина слоев диэлектриков равна: 0,6 нм для SiO_2; 2,3 нм для HfO_2.

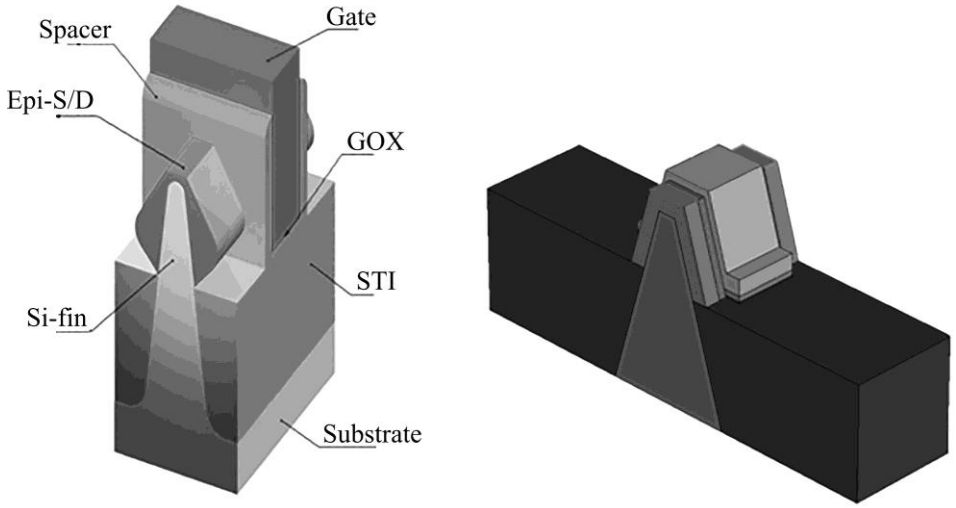


Рис.1. Структура FinFET на объемном кремнии [16] (*а*); 3D-модель в системе TCAD (*б*)
Fig.1. Bulk FinFET structure [16] (*a*); 3D model in TCAD (*b*)

Описание TCAD-модели. Ключевую роль при моделировании структуры FinFET играет правильное задание подвижности неосновных носителей заряда. В работе [1] показано, что подвижность в канале структуры FinFET может быть в разы меньше типовых значений, принимаемых обычно для MOSFET, и может значительно изменяться с повышением концентрации в инверсном слое. Для учета деградации подвижности в инверсном слое использованы следующие модели:

- Enormal (IALMob Coulomb2D) – модель деградации подвижности у поверхности с двухмерным распределением дефектов на границе раздела [17]. Деградация подвижности у поверхности учитывается для всех моделей полевых транзисторов, но, так как структура трехмерная, для моделирования структуры FinFET необходимо также учитывать двухмерное распределение дефектов (модель Coulomb2D) и использовать адаптированный под него набор параметров модели деградации (IALMob);

- CarrierCarrierScattering (BrooksHerring) – модель деградации подвижности из-за рассеяния носителей на других носителях заряда. Из-за малых размеров плотность тока в канале может быть значительна, поэтому пренебрегать этим эффектом нельзя. Применяемая модель Брукса – Херринга описана в работе [18];

- DopingDependence (PhuMob BalMob) – модель зависимости подвижности от уровня легирования, часто применяемая для моделирования полевых транзисторов с высоким уровнем легирования в области канала. Для структуры FinFET использование в расчетах модели баллистического переноса носителей заряда (BalMob) обязательно [19].

Для учета квантовых эффектов применялась модель Density Gradient Quantization, одним из преимуществ которой является возможность отслеживать 3D-эффекты квантования.

Сужение запрещенной зоны контролировали с помощью модели Slotboom, а генерацию-рекомбинацию носителей – с помощью модели Шокли – Холла – Рида с учетом зависимости скорости рекомбинации от концентрации носителей.

Металлическая часть затвора тестовых приборов структур FinFET представляет собой стек TiN–TiAl–TiN [20, 21]. В коммерческой версии Sentaurus TCAD отсутствует возможность задавать параметры TiAl, поэтому вместо структуры TiN–TiAl–TiN при моделировании использовали единый слой TiN, у которого изменен параметр «работа выхода электрона». Зависимость порогового напряжения V_{th} от эффективной работы выхода металла W_F в TiN следующая:

W_F, эВ	4,65	4,60	4,55	4,50	4,45	4,40	4,35
V_{th}, В	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20

Изменение работы выхода в модели на 0,01 эВ приводит к сдвигу порогового напряжения на 0,01 В. Это простое линейное соотношение использовано в TCAD-модели.

При радиационном облучении индуцированные заряды, захваченные ловушками в диэлектриках затвора SiO_2 и HfO_2, а также на границе раздела диэлектрик – полупроводник, существенно зависят от поглощенной дозы. Такие зависимости для концентраций ловушек в объеме SiO_2 и HfO_2 и на границе раздела диэлектрик – полупроводник для наноразмерных МОПТ-структур, полученные в физических экспериментальных работах последних лет, включены в пакет TCAD Sentaurus [22, 23] и использованы при моделировании облученных структур FinFET.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента. Валидацию TCAD-модели и последующие расчеты ВАХ структур FinFET выполняли в два этапа: настройка TCAD-модели по ВАХ необлученных приборов; окончательная валидация по ВАХ для облученных транзисторов. Подгонку под эксперимент проводили только для радиационно зависимых электрофизических параметров.

На рис.2 приведены сток-затворные ВАХ необлученных тестовых структур FinFET с длиной канала 30, 40 и 60 нм. Напряжение на стоке постоянно и равно V_d = 50 мВ, напряжение на затворе меняется от –0,2 до +1,0 В.

Из анализа ВАХ на рис.2 следует: во-первых, TCAD-модель обеспечивает высокую точность моделирования отдельных ВАХ для 8 FinFET-модулей с одинаковой длиной канала (погрешность не более 5–10 %); во-вторых, для приборов с различной длиной канала наблюдаются заметные различия в пороговом напряжении (ΔV_{th} = 0,05...0,1 В) и предпороговом наклоне ($SS = I_d/V_{gs}$), а при одном и том же значении напряжения на затворе V_g значения тока утечки I_{off} могут различаться на порядок. Изменение максимальной проводимости канала $g_{m\,\max}$ при низком напряжении на стоке незначительно. Эти данные находятся в полном соответствии с экспериментальными результатами компаний-изготовителей [2, 3, 10].

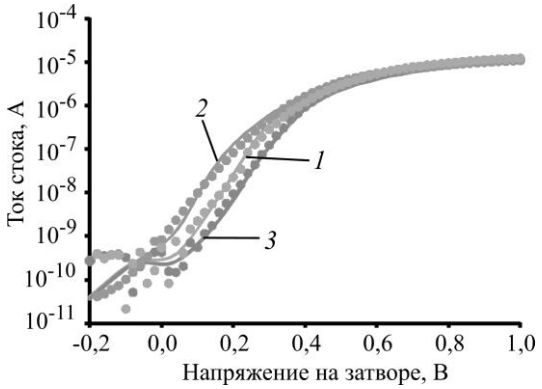


Рис.2. Сток-затворные характеристики тестовых структур (V_{ds} = 50 мВ) с длиной канала 30, 40, 60 нм (кривые *1, 2, 3* соответственно)
Fig.2. Experimental I_dV_g characteristics at V_{ds} = 50 mV with a channel length from 30, 40, 60 nm (curves *1, 2, 3* respectively)

Сравнение основных электрических параметров для трех FinFET-модулей приведено в табл.1.

Таблица 1

Параметры структур FinFET с различной длиной канала

Table 1

Parameters of FinFET structures with different channel lengths

Длина канала, нм	I_{off}, нА	*SS*, мВ/декада	V_{th}, мВ	$g_{m\,max}$, мкСм
30	0,53	82	249	238
40	0,8	108	210	221
60	0,41	89	292	210

Во многих работах по моделированию с целью упрощения трапецеидальную форму «плавника» заменяют прямоугольным аналогом. Сравнительное моделирование такой упрощенной структуры (при постоянной средней ширине канала) с реальной, изображенной на рис.1,*б*, показывает, что упрощение приводит к возникновению дополнительной погрешности по параметрам V_{th} и *SS* в размере до 10 %. При этом время моделирования уменьшается более чем на 50 %, что следует учитывать при большом объеме расчетов. Затраты времени на 3D-расчет 20 точек ВАХ на трех ядрах процессора типа Ryzen 7 составляют 8 мин для трапецеидальной структуры и 3,5 мин для прямоугольной.

Для моделирования воздействия радиации применен следующий прием, сокращающий суммарные затраты времени на расчет. Выбран наиболее проблемный модуль с минимальной длиной канала структуры FinFET, равной 30 нм, и для него исследовано воздействие облучения на электрические характеристики. После чего с помощью моделирования получена зависимость величины захваченного заряда на границе раздела диэлектрик – полупроводник от дозы радиации. Зависимость, приведенная на рис.3, аппроксимирована аналитическим выражением, используемым в дальнейшем без подгонки и уточнения для моделирования других приборов с большей длиной канала. В связи с тем что в настоящей работе рассматривается структура FinFET, выполненная по технологии на объемном кремнии, воздействие этого заряда на электрические характеристики нивелируется наличием «стоп-области» с повышенной концентрацией легирования, расположенной под «плавником» на одном уровне с STI (см. рис.1,*а*). Благодаря этой области положительный заряд, захваченный ловушками в STI, не вызывает дополнительного обеднения носителей в «плавнике».

В эксперименте наблюдаются два основных эффекта: небольшое, в пределах 0,02 В, уменьшение порогового напряжения и увеличение максимальной проводимости «плавника» не более чем на 10 %. Слабое воздействие излучения на пороговое напряжение объясняется тем, что при облучении в оксиде кремния накапливается положительный заряд, а в оксиде гафния – отрицательный. В результате они частично компенсируют друг друга и суммарно незначительно влияют на работу структуры FinFET [10].

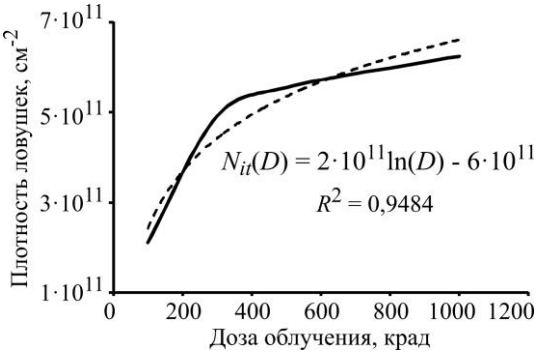


Рис.3. Зависимость плотности ловушек на границе раздела диэлектрик – полупроводник от дозы облучения (сплошная кривая) и ее аппроксимация (пунктирная кривая)

Fig.3. Dependence of the trap densities at the dielectric – semiconductor interface on the radiation dose (solid curve) and its approximation (dotted curve)

Увеличение максимальной проводимости связано с накоплением положительного заряда в диэлектрическом слое, разделяющем затворную структуру и области стока-истока. Этот заряд, притягивая электроны, уменьшает последовательное сопротивление транзистора и увеличивает его максимальную проводимость [25].

Параметры структуры FinFET, полученные с помощью моделирования и эксперимента для трех длин канала и разных доз облучения, приведены в табл.2.

Таблица 2

Параметры FinFET-модуля с длиной канала 30, 40, 60 нм

Table 2

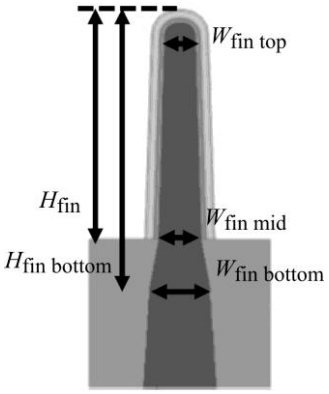
Parameters of FinFET module with a channel length of 30, 40, 60 nm

Доза облучения, крад	I_{off}, нА		SS, мВ/декада		V_{th}, мВ		ΔV_{th}, мВ		$g_{m\,max}$, мкСм	
	Опыт	Модель	Опыт	Модель	Опыт	Модель	Опыт	Модель	Опыт	Модель
Длина канала 30 нм										
0	0,22	0,33	82	80	249	250	–	–	238	238
100	0,23	0,36	82	82	238	242	11	8	244	244
300	0,22	0,35	81	81	240	244	9	6	247	244
500	0,25	0,37	82	82	236	240	13	10	248	245
1000	0,20	0,37	83	82	233	239	16	11	248	246
Длина канала 40 нм										
0	0,80	0,90	108	107	210	184	–	–	221	226
100	1,11	1,20	111	107	201	174	9	10	238	242
300	1,04	1,28	111	107	202	168	8	16	248	245
500	1,03	1,40	107	106	199	165	11	19	250	248
1000	1,62	1,40	106	105	187	164	23	20	251	250
Длина канала 60 нм										
0	0,41	0,25	89	87	292	297	–	–	210	215
100	0,43	0,25	89	88	285	286	7	11	225	227
300	0,35	0,27	88	88	277	278	15	19	229	230
500	0,43	0,27	87	89	272	276	20	21	231	231
1000	0,45	0,27	89	89	264	274	27	23	232	233

Полученные результаты полностью согласуются с результатами других работ [10, 24, 26] для суб-100-нм структур FinFET на объемном кремнии.

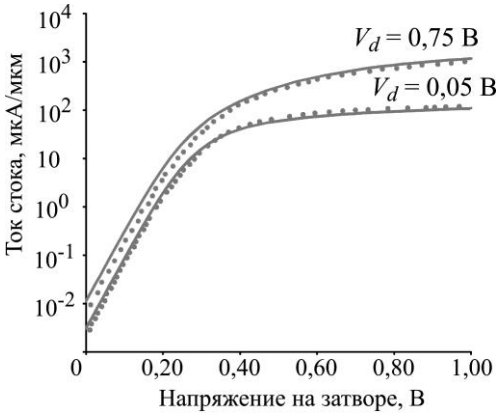
Относительно недавно появились работы, в которых экспериментально исследованы характеристики необлученных и облученных структур FinFET, изготовленных по суперсовременной технологии с проектными нормами 7 нм, однако TCAD-модели для расчета этих структур не разработаны.

Предлагаемая радиационная TCAD-модель адаптирована к расчету 7-нм структур FinFET. На рис.4 приведены параметры и статические ВАХ структуры FinFET с длиной канала 16,5 нм, изготовленной по 7-нм технологии [27]. Погрешность расчета по сравнению с экспериментом не превышает 15 %. На рис.5 показаны результаты воздействия ионизирующего излучения на 14-нм структуру FinFET, изготовленную по 7-нм технологии [4]. Расчетные результаты удовлетворительно совпадают с экспериментальными в диапазоне доз до 1 Мрад.



Parameters	Value
Gate Pitch	56 nm
FinPitch	30 nm
Channel Length	16.5 nm
$W_{\text{fin top}}$	5.6 nm
$W_{\text{fin mid}}$	7.1 nm
$W_{\text{fin bottom}}$	10.1 nm
H_{fin}	35.6 nm
$H_{\text{fin bottom}}$	40 nm
EOT	0.7 nm
Orientation	<110>/(001)
VGG	0.75 V

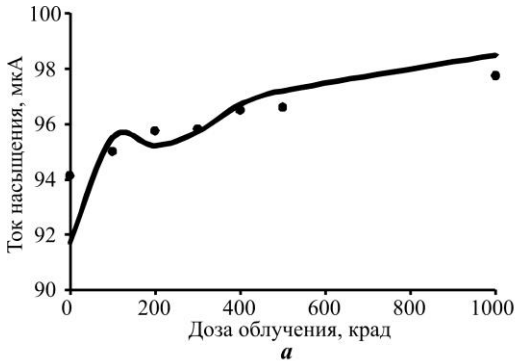
а



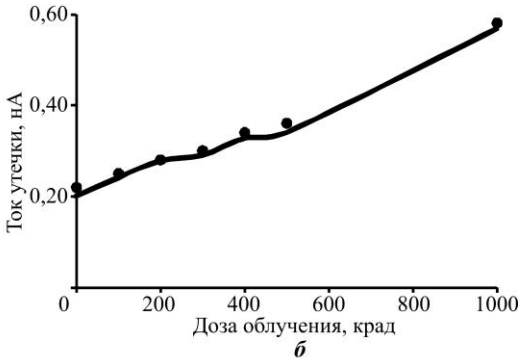
б

Рис.4. Параметры (*а*) и статические ВАХ (*б*) 7-нм структуры FinFET [27]: —— эксперимент; • – TCAD-моделирование

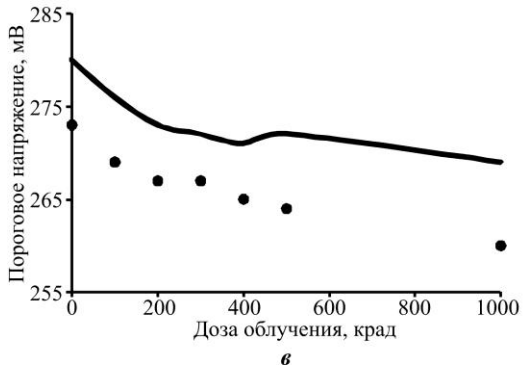
Fig.4. 7-nm FinFET structure parameters (*a*) and static I_dV_g characteristics (*b*): —— experiment; • – TCAD-modeling



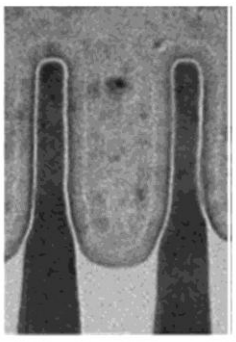
а



б



в



г

Рис.5. Радиационные зависимости основных параметров (*а–в*) структуры FinFET, изготовленной по 7-нм технологии [4] (*г*): • – эксперимент; —— TCAD-моделирование

Fig.5. Radiation dependences of the main FinFET parameters (*a–c*) fabricated using 7-nm technology [4] (*d*): • – experiment; —— TCAD-simulation

Заключение. Разработанная радиационная версия TCAD-модели структуры FinFET на объемном кремнии учитывает воздействие ионизирующего излучения на электрические характеристики прибора. В базовую коммерческую TCAD-модель введены новые радиационные зависимости для эффективной подвижности носителей заряда в канале, объемной концентрации ловушек в подзатворных слоях оксидов SiO_2 и HfO_2 и боковой SiO_2 щелевой изоляции, поверхностной концентрации ловушек на границах кремний – диоксид.

Проведены расчеты ВАХ и основных параметров FinFET-транзисторов на объемном кремнии с размерами канала суб-100 нм, изготовленных по традиционным технологиям, а также с размерами 14–7 нм для суперсовременных структур. Сравнение результатов моделирования и эксперимента для ВАХ в диапазоне доз облучения до 1,0 Мрад показало, что погрешность расчетов не превышает 15 %.

Литература

1. ***Hook T.B.*** Fully depleted devices for designers: FDSOI and FinFETs // Proceedings of the IEEE 2012 Custom Integrated Circuits Conference. San Jose: IEEE, 2012. P. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1109/CICC.2012.6330653

2. Intel 22nm FinFET (22FFL) process technology for RF and mm wave applications and circuit design optimization for FinFET technology / ***H.-J. Lee, S. Rami, S. Ravikumar et al.*** // 2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco: IEEE, 2018. P. 14.1.1–14.1.4. DOI: https://doi.org/10.1109/IEDM.2018.8614490

3. Experimental study of gate-first FinFET threshold-voltage mismatch / ***Q. Zhang, C. Wang, H. Wang et al.*** // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61. Iss. 2. P. 643–646. DOI: https://doi.org/10.1109/TED.2013.2295715

4. ***King M.P.*** FinFET technologies for digital systems with radiation requirements: TID SEE basic mechanisms and lessons learns // Office of Scientific and Technical Information: [Web] / United States. Sept. 2017. URL: https://www.osti.gov/servlets/purl/1474226 (accessed: 31.05.2021).

5. Analysis of TID process, geometry, and bias condition dependence in 14-nm FinFETs and implications for RF and SRAM performance / ***M.P. King, X. Wu, M. Eller et al.*** // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2017. Vol. 64. Iss. 1. P. 285–292. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2634538

6. Total ionizing dose radiation effects on 14 nm FinFET and SOI UTBB technologies / ***H. Hughes, P. McMarr, M. Alles et al.*** // 2015 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW). Boston: IEEE, 2015. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/REDW.2015.7336740

7. ***Sicard E.*** Introducing 14-nm FinFET technology in Microwind. Jun. 2017 // Open archive HAL: [Web] / CCSD. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01541171/document (accessed: 31.05.2021).

8. ***Sicard E.*** Introducing 7-nm FinFET technology in Microwind. Jul. 2017 // Open archive HAL: [Web] / CCSD. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01558775/document (accessed: 15.04.2021).

9. ***Mohammed M.U., Nizam A., Chowdhury M.H.*** Performance stability analysis of SRAM cells based on different FinFET devices in 7nm technology // 2018 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (S3S). Burlingame: IEEE, 2018. P. 1–3. DOI: https://doi.org/10.1109/S3S.2018.8640161

10. Process variation dependence of total ionizing dose effects in bulk nFinFETs / ***B. Li, Y.-B. Huang, L. Yang et al.*** // Microelectronics Reliability. 2018. Vol. 88–90. P. 946–951. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.07.020

11. ***Artola L., Hubert G., Schrimpf R.D.*** Modeling of radiation-induced single event transients in SOI FinFETS // 2013 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). Monterey: IEEE, 2013. P. SE.1.1–SE.1.6. DOI: https://doi.org/10.1109/IRPS.2013.6532108

12. ***Lakshmi B., Srinivasan R.*** 3D-TCAD simulation study of process variations on ft in 30 nm gate length FinFET // 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology. Nagercoil: IEEE, 2011. P. 589–593. DOI: https://doi.org/10.1109/ICETECT.2011.5760186

13. ***Donati Guerrieri S., Bonani F., Ghione G.*** A novel TCAD approach to temperature dependent DC FinFET variability analysis // 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). Madrid: IEEE, 2018. P. 230–233. DOI: https://doi.org/10.23919/EuMIC.2018.853988

14. ***Bhoj A.N., Joshi R.V., Jha N.K.*** 3-D-TCAD-based parasitic capacitance extraction for emerging multigate devices and circuits // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2013. Vol. 21. No. 11. P. 2094–2105. DOI: https://doi.org/10.1109/TVLSI.2012.2227848

15. Semiconductor science and technology validation of 30 nm process simulation using 3D TCAD for FinFET devices / ***M. Nawaz, W. Molzer, P. Haibach et al.*** // Semiconductor Science and Technology. 2006. Vol. 21. No. 8. P. 1111–1120. DOI: https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/8/023

16. ***Wang G.*** Investigation on SiGe selective epitaxy for source and drain engineering in 22 nm CMOS technology node and beyond. Gateway East: Springer Singapore, 2019. XVI, 115 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0046-6

17. ***Mujtaba S.A.*** Advanced mobility models for design and simulation of deep submicrometer MOSFETs: a dissertation. Stanford, CA: Stanford University, 1995. XVII, 153 p.

18. ***Schenk A.*** Advanced physical models for silicon device simulation. Vienna: Springer, 1998. XVIII, 354 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6494-5

19. ***Shur M.S.*** Low ballistic mobility in submicron HEMTs // IEEE Electron Device Letters. 2002. Vol. 23. No. 9. P. 511–513. DOI: https://doi.org/10.1109/LED.2002.802679

20. Metal gate work function tuning by Al incorporation in TiN / ***L.P.B. Lima, H.F.W. Dekkers, J.G. Lisoni, J.A. Diniz et al.*** // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 115. Iss. 7. P. 074504-1–074504-5. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4866323

21. Annealing effect on the metal gate effective work function modulation for the Al/TiN/SiO_2/*p*-Si structure / ***X.-R. Wang, Y.-L. Jiang, Q. Xie et al.*** // Microelectronic Engineering. 2011. Vol. 88. Iss. 5. P. 573–577. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.06.029

22. ***Петросянц К.О., Попов Д.А., Быков Д.В.*** TCAD-моделирование дозовых радиационных эффектов в суб-100-нм high-k МОП-транзисторных структурах // Изв. вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 6. С. 569–581. DOI: https://doi.org/10.214151/1561-5405-2017-22-6-569-581

23. ***Petrosyants K.O., Kozhukhov M.V., Popov D.A.*** Effective radiation damage models for TCAD simulation of silicon bipolar and MOS transistor and sensor structures // Sensors and Transducers. 2018. Vol. 227. No. 11. P. 42–50.

24. Fin-width dependence of ionizing radiation-induced subthreshold-swing degradation in 100-nm-gate-length FinFETs / ***F. El Mamouni, E.X. Zhang, R.D. Schrimpf et al.*** // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. Vol. 56. No. 6. P. 3250–3255. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2034155

25. Total dose response of transconductance in MOSFETs at low temperature / ***R.L. Pease, S.D. Clark, P.L. Cole et al.*** // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1994. Vol. 41. No. 3. P. 549–554. DOI: https://doi.org/10.1109/23.299797

26. Geometry dependence of total-dose effects in bulk FinFETs / ***I. Chatterjee, E.X. Zhang, B.L. Bhuva et al.*** // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2014. Vol. 61. No. 6. P. 2951–2958. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2367157

27. ***Huo Q., Wu Z., Zhang F., Li L.*** A modeling approach for 7nm technology node area-consuming circuit optimization and beyond // 2019 16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD). Lausanne: IEEE, 2019. P. 93–96. DOI: https://doi.org/10.1109/SMACD.2019.8795254

Поступила в редакцию 11.05.2021 г.; после доработки 11.05.2021 г.; принята к публикации 08.07.2021 г.

Петросянц Константин Орестович – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123592, г. Москва, ул. Таллинская, 34), главный научный сотрудник Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), kpetrosyants@hse.ru

Силкин Денис Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123592, г. Москва, ул. Таллинская, 34), dsilkin@hse.ru

Попов Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, старший преподаватель департамента компьютерной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123592, г. Москва, ул. Таллинская, 34), da.popov@hse.ru

Бо Ли – PhD, профессор, руководитель лаборатории Института микроэлектроники Китайской академии наук (Китай, 100029, г. Пекин, Бэйтучэн Вест Роуд, 3), libo3@ime.ac.cn

Сюй Чжан – PhD, профессор, руководитель лаборатории Института микроэлектроники Китайской академии наук (Китай, 100029, г. Пекин, Бэйтучэн Вест Роуд, 3), zhangxu1@ime.ac.cn

References

1. Hook T.B. Fully depleted devices for designers: FDSOI and FinFETs. *Proceedings of the IEEE 2012 Custom Integrated Circuits Conference.* San Jose, IEEE, 2012, pp. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1109/CICC.2012.6330653

2. Lee H.-J., Rami S., Ravikumar S., Neeli V., Phoa K., Sell B., Zhang Y. Intel 22nm FinFET (22FFL) process technology for RF and mm wave applications and circuit design optimization for FinFET Technology. *2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM).* San Francisco, IEEE, 2018, pp. 14.1.1–14.1.4. DOI: https://doi.org/10.1109/IEDM.2018.8614490

3. Zhang Q., Wang C., Wang H., Schnabel C., Park D.-G., Springer S.K., Leobandung E. Experimental study of gate-first FinFET threshold-voltage mismatch. *IEEE Transactions on Electron Devices,* 2014, vol. 61, iss. 2, pp. 643–646. DOI: https://doi.org/10.1109/TED.2013.2295715

4. King M.P. FinFET technologies for digital systems with radiation requirements: TID SEE Basic Mechanisms and Lessons Learns. *Office of Scientific and Technical Information,* United States. Available at: https://www.osti.gov/servlets/purl/1474226 (accessed: 31.05.2021).

5. King M.P., Wu X., Eller M., Samavedam S., Shaneyfelt M.R., Silva A.I., Draper B.L., Rice W.C., Meisenheimer T.L., Felix J.A., Zhang E.X., Haeffner T.D., Ball D.R., Shetler K.J., Allse M.L., Kauppila J.S., Massengill L.W. Analysis of TID process, geometry, and bias condition dependence in 14-nm FinFETs and implications for RF and SRAM performance. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2017, vol. 64, iss. 1, pp. 285–292. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2634538

6. Hughes H., McMarr P., Alles M., Zhang E., Arutt C., Doris B., Liu D., Southwick R., Oldiges P. Total ionizing dose radiation effects on 14 nm FinFET and SOI UTBB technologies. *2015 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW).* Boston, IEEE, 2015, pp. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/REDW.2015.7336740

7. Sicard E. Introducing 14-nm FinFET technology in Microwind. Jun. 2017. *Open Archive HAL.* CCSD. Available at: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01541171/document (accessed: 31.05.2021).

8. Sicard E. Introducing 7-nm FinFET technology in Microwind. Jul. 2017. *Open Archive HAL.* CCSD. Available at: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01558775/document (accessed: 15.04.2021).

9. Mohammed M.U., Nizam A., Chowdhury M.H. Performance stability analysis of SRAM cells based on different FinFET devices in 7nm technology. *2018 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (S3S).* Burlingame, IEEE, 2018, pp. 1–3. DOI: https://doi.org/10.1109/S3S.2018.8640161

10. Li B., Huang Y.-B. Yang L., Zhang Q.-Z., Zheng Z.-S., Li B.-H., Zhu H.-P., Bu J.-H., Yin H.-X., Luo J.-J., Han Z.-S., Wang H.-B. Process variation dependence of total ionizing dose effects in bulk nFinFETs. *Microelectronics Reliability,* 2018, vol. 88–90, pp. 946–951. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.07.020

11. Artola L., Hubert G., Schrimpf R.D. Modeling of radiation-induced single event transients in SOI FinFETS, *2013 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS).* Monterey, IEEE, 2013, pp. SE.1.1–SE.1.6. DOI: https://doi.org/10.1109/IRPS.2013.6532108

12. Lakshmi B., Srinivasan R. 3D-TCAD simulation study of process variations on ft in 30 nm gate length FinFET. *2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology*. Nagercoil, IEEE, 2011, pp. 589–593, DOI: https://doi.org/10.1109/ICETECT.2011.5760186

13. Donati Guerrieri S., Bonani F., Ghione G. A novel TCAD approach to temperature dependent DC FinFET variability analysis. *2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC).* Madrid, IEEE, 2018, pp. 230–233. DOI: https://doi.org/10.23919/EuMIC.2018.853988

14. Bhoj A.N., Joshi R.V., Jha N.K. 3-D-TCAD-based parasitic capacitance extraction for emerging multigate devices and circuits. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2013, vol. 21,
no. 11, pp. 2094–2105. DOI: https://doi.org/10.1109/TVLSI.2012.2227848

15. Nawaz M., Molzer W., Haibach P., Landgraf E., Roesner W., Staedele M., Luyken H., Gencer A. Semiconductor science and technology validation of 30 nm process simulation using 3D TCAD for FinFET devices. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, vol. 21, no. 8, pp. 1111–1120. DOI: https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/8/023

16. Wang G. *Investigation on SiGe selective epitaxy for source and drain engineering in 22 nm CMOS technology node and beyond*. Gateway East, Springer Singapore, 2019, xvi, 115 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0046-6

17. Mujtaba S.A. *Advanced mobility models for design and simulation of deep submicrometer MOSFETs*, a dissertation. Stanford, CA, Stanford University, 1995, xvii, 153 p.

18. Schenk A. *Advanced physical models for silicon device simulation.* Vienna, Springer, 1998, xviii, 354 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6494-5

19. Shur M.S. Low ballistic mobility in submicron HEMTs. *IEEE Electron Device Letters*, 2002, vol. 23, no. 9, pp. 511–513. DOI: https://doi.org/10.1109/LED.2002.802679

20. Lima L.P.B., Dekkers H.F.W., Lisoni J.G., Diniz J.A., Van Elshocht S., De Gendt S. Metal gate work function tuning by Al incorporation in TiN. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 115, iss. 7, pp. 074504-1–074504-5. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4866323

21. Wang X.-R., Jiang Y.-L., Xie Q., Detavernier C., Ru G.-P., Qu X.-P., Li B.-Z. Annealing effect on the metal gate effective work function modulation for the Al/TiN/SiO_2/*p*-Si structure. *Microelectronic Engineering*, 2011, vol. 88, iss. 5, pp. 573–577. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.06.029

22. Petrosyants K.O., Popov D.A., Bykov D.V. TCAD simulation of dose radiation effects in sub-100 nm high-k MOSFET structures. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 6, pp. 569–581. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.214151/1561-5405-2017-22-6-569-581

23. Petrosyants K.O., Kozhukhov M.V., Popov D.A. Effective radiation damage models for TCAD simulation of silicon bipolar and MOS transistor and sensor structures. *Sensors & Transducers*, 2018, vol. 227, no. 11, pp. 42–50.

24. El Mamouni F., Zhang E.X., Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Reed R.A., Cristoloveanu S., Xiong W. Fin-width dependence of ionizing radiation-induced subthreshold-swing degradation in 100-nm-gate-length FinFETs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 3250–3255. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2034155

25. Pease R.L., Clark S.D., Cole P.L., Krieg J.F., Pickel J.C. Total dose response of transconductance in MOSFETs at low temperature. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, vol. 41, no. 3, pp. 549–554. DOI: https://doi.org/10.1109/23.299797

26. Chatterjee I., Zhang E.X., Bhuva B.L., Reed R.A., Alles M.L., Mahatme N.N., Ball D.R., Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Linten D., Simôen E. Geometry dependence of total-dose effects in bulk FinFETs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 2951–2958. DOI: https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2367157

27. Huo Q., Wu Z., Zhang F., Li L. A modeling approach for 7nm technology node area-consuming circuit optimization and beyond. *2019 16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*. Lausanne, IEEE, 2019, pp. 93–96. DOI: https://doi.org/10.1109/SMACD.2019.8795254

Received 11.05.2021; Revised 11.05.2021; Accepted 08.07.2021.

Information about the authors:

Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof. 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), Chief Researcher of the Institute for Design Problems of Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), kpetrosyants@hse.ru

Denis S. Silkin – Cand. Sci. (Eng.), Scientific Researcher 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), dsilkin@hse.ru

Dmitry A. Popov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Computer Engineering Department of the Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinskaya st., 34), da.popov@hse.ru

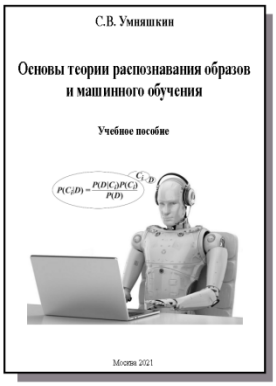
Bo Li – PhD, Prof., Chief of Laboratory, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences (China, 1000293, Beijing, Chaoyang District, Beitucheng West Road, 3), libo3@ime.ac.cn

Xu Zhang – PhD, Prof., Chief of Laboratory, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences (China,1000293, Beijing, Chaoyang District, Beitucheng West Road, 3), zhangxu1@ime.ac.cn

Издательско-полиграфический комплекс Национального исследовательского университета «МИЭТ» информирует

Вышло в свет учебное пособие

Умняшкин С.В. Основы теории распознавания образов и машинного обучения: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2021. 288 с.: ил.



В рамках статистического подхода излагаются основы машинного обучения и распознавания образов. Изучаются методы и модели, применяемые для решения задач регрессии и классификации, кластеризации и анализа данных. Рассматриваются аспекты применения искусственных нейронных сетей, машин опорных векторов, ансамблей распознавателей, а также сопутствующие методы предварительной обработки данных.

Для студентов магистратуры, обучающихся по направлению подготовки 01.04.04 «Прикладная математика».

ISBN 978-5-7256-0960-8

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 004.31:004.32: 621.3.049.771.14 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-387-398**

Формирование библиотек СФ-блоков в маршруте проектирования пользовательских схем на ПЛИС и РСнК

В.М. Хватов, С.В. Гаврилов

Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия
Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

khvatov_v@ippm.ru

Сложнофункциональные (СФ) блоки разрабатываются и применяются для ускорения прохождения маршрута проектирования пользовательских ИС и улучшения их итоговых характеристик. Существуют два типа СФ-блоков – гибкие и жесткие. Жесткий СФ-блок имеет фиксированное размещение на кристалле и заранее коммутированные межсоединения, тогда как гибкий СФ-блок состоит из логических элементов и требует выполнения размещения и трассировки. Для автоматизированного маршрута проектирования ИС на ПЛИС и реконфигурируемых системах на кристалле (РСнК) необходимо разработать библиотеки блоков, позволяющие идентифицировать их на каждом этапе маршрута. В работе показаны различные типы и форматы библиотек гибких и жестких СФ-блоков, использующихся в составе маршрута проектирования ИС на ПЛИС и РСнК российского производства. Описаны методы проектирования библиотек необходимых САПР на этапах логического синтеза, автоматического технологического отображения и топологического синтеза. Рассмотрены характерные особенности библиотек гибких и жестких СФ-блоков, а также способы их формирования с учетом архитектуры ПЛИС и РСнК. Предложенные методы проектирования позволяют разработать библиотеки, необходимые при автоматизированной имплементации всех типов СФ-блоков, с учетом преимуществ архитектуры базовых ПЛИС и РСнК.

Ключевые слова: СФ-блоки; маршрут проектирования; САПР; ПЛИС; РСнК; библиотека СФ-блоков

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-37-90047).

© В.М. Хватов, С.В. Гаврилов, 2021

***Для цитирования*:** Хватов В.М., Гаврилов С.В. Формирование библиотек СФ-блоков в маршруте проектирования пользовательских схем на ПЛИС и РСнК // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 387–398. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-387-398

Complex Functional Block Libraries Formation in the Design Flow of User Circuits on FPGA and RSoC

V.M. Khvatov, S.V. Gavrilov

Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

khvatov_v@ippm.ru

Abstract: Intellectual Property (IP) cores are developed and used to accelerate the custom integrated circuits design flow and improve their final characteristics. There are two types of FPGA IP-cores: hard IP-core and soft IP-core. Hard IP-cores have an exact location and pre-routed interconnects while soft IP-cores can be synthesized from logic elements and should be placed and routed. To use IP-cores in automated design flow of integrated circuits on FPGA and RSoC it is necessary to develop IP-core libraries that allow identifying blocks on every stage of flow. This work shows the various soft and hard IP-core libraries' types and formats used as a part of design flow for Russian FPGA and RSoC. It describes the methods of designing libraries needed by CAD systems at the stages of logic synthesis, automatic technological mapping and layout synthesis. Also, it considers soft and hard IP-core libraries' distinct features and the methods of their formation adjusted for the FPGA and RSoC architecture. The design methods have been proposed that allow designing of libraries necessary for automated implementation of hard as well as soft IP-cores using advantage of base FPGA and RSoC architecture.

Keywords: complex functional block; IP-cores; design flow; computer aided design; CAD; field-programmable gate array; FPGA; IP-core library; integrated circuit; IC

Funding: the study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 20-37-90047).

For citation: Khvatov V.M., Gavrilov S.V. Complex functional block libraries formation in the design flow of user circuits on FPGA and RSoC. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 387–398. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-387-398

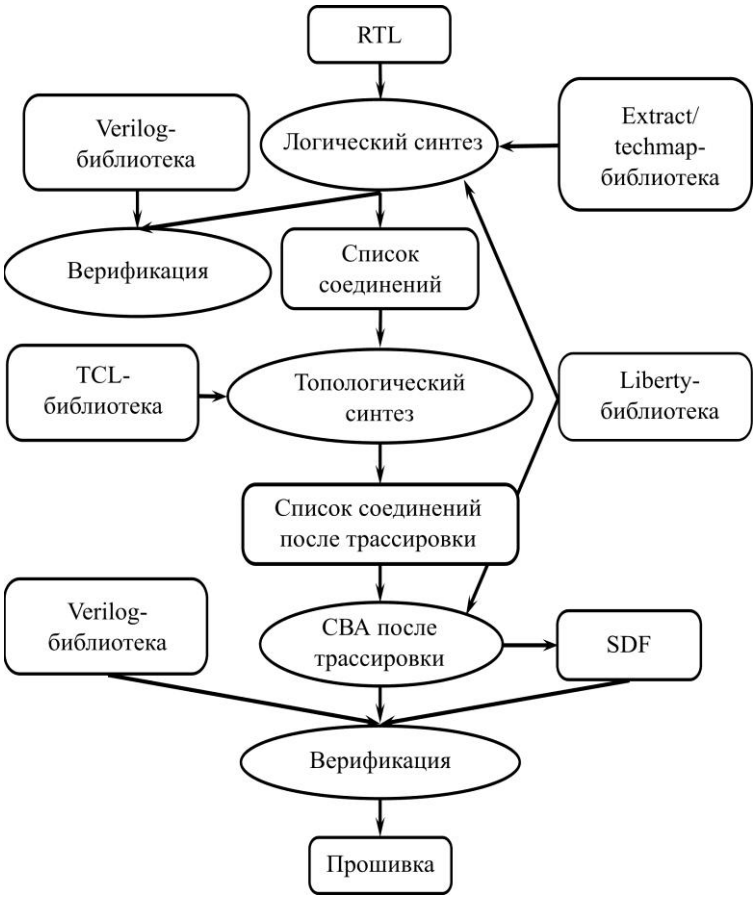
Введение. С ростом числа разрабатываемых ПЛИС их номенклатура пополняется как гетерогенными ПЛИС, так и реконфигурируемыми системами на кристалле (РСнК). Архитектура таких схем включает в себя, помимо матрицы программируемых логических элементов (ЛЭ) и групп логических блоков, различные жесткие сложнофункциональные (СФ) блоки и специализированные ресурсы для проектирования гибких СФ-блоков. Жесткие СФ-блоки – это реконфигурируемые полузаказные блоки, занимающие специализированную область на кристалле. Они разрабатываются одновременно с программируемой частью схемы и проходят все этапы маршрута проектирования СБИС – от разработки пове-

денческой модели до проектирования топологии. Гибкие СФ-блоки разрабатываются на языке описания аппаратуры и, соответственно, не зависят от архитектуры ПЛИС или программируемой части РСнК. Оба типа СФ-блоков должны учитываться в САПР для автоматизированного проектирования ИС на ПЛИС и РСнК [1].

В литературных источниках описаны методы разработки ИС на ПЛИС как с СФ-блоками в составе схем, так и без них. В работах представлены различные этапы маршрута проектирования: логический синтез и ресинтез, технологическое отображение [3, 4] и топологический синтез [5–10], однако отсутствует информация о связующем звене исходного описания блока с САПР – библиотеках СФ-блоков.

Цель настоящей работы – описание методов формирования библиотек СФ-блоков, позволяющих интегрировать блоки в САПР и корректно их имплементировать, учитывая различные архитектурные особенности кристалла, а также связывать между собой различные этапы маршрута проектирования.

Структурные особенности СФ-блоков в сквозном маршруте проектирования ИС на ПЛИС и РСнК. Сквозной маршрут проектирования ИС на ПЛИС и РСнК с использованием СФ-блоков состоит из следующих этапов (рисунок): разработка RTL-описания; верификация RTL-описания; логический синтез и технологическое отображение; физический синтез, состоящий из кластеризации, размещения и трассировки; статический временной анализ (СВА) и генерация файла с задержкой; функциональная и временная верификации списка соединений, полученного после трассировки.



Маршрут проектирования ИС на ПЛИС с использованием СФ-блоков
The ICs design flow using IP cores for FPGAs

Для выполнения каждого этапа необходимо разработать соответствующий тип библиотеки. Для идентификации СФ-блоков на этапе логического синтеза должны быть разработаны библиотеки технологического отображения; для верификации результатов логического синтеза необходима библиотека на языке Verilog с RTL-описанием существующих блоков; для интеграции блоков в САПР и выполнения физического синтеза – библиотека на языке Tcl; для выполнения логического синтеза и СВА [11] – библиотека СФ-блоков в формате liberty.

Методы и способы, использующиеся при разработке библиотек на языке Tcl и extract/techmap, позволяют максимально обобщить процесс описания СФ-блоков и их идентификацию на RTL. Отличительные особенности в описании имеют только две большие группы блоков – жесткие и гибкие. Описание блоков из одной группы различий не имеет. Такой подход позволяет учесть структурные особенности интегрируемого блока и ускорить процесс разработки библиотек СФ-блоков, несмотря на разнообразие блоков в каждой из этих групп. Библиотека на языке Verilog для верификации и логического синтеза не рассматривается, так как каждый СФ-блок имеет уникальную функцию и собственные методы проектирования. Не рассматриваются и библиотеки стандартных логических элементов и ячеек ввода-вывода [12], так как считаются разработанными по умолчанию.

Типы библиотек СФ-блоков. В качестве примеров разработанных библиотечных элементов используются следующие СФ-блоки:

- mul_16×16_buf – жесткий СФ-блок – умножитель двух 16-битных чисел;
- ramblock – жесткий СФ-блок – блок памяти объемом 256 слов по 9 бит с различными конфигурационными режимами;
- adder_2b – гибкий СФ-блок – сумматор двух 2-битных чисел.

Библиотека для логического синтеза и СВА. Для логического синтеза и СВА необходима библиотека, включающая в себя временные характеристики требуемых блоков. Они содержатся в библиотеке формата liberty, разработанного компанией Synopsys. Несмотря на разнообразие схемотехнических решений и методов характеризации, использующихся при проектировании жестких СФ-блоков, структура описания их характеристик в формате liberty всегда одинакова и идентична структуре описания стандартных ЛЭ. Описание жесткого СФ-блока включает в себя характеристики его выходных пинов: направление переключения, время задержки, время выходного фронта и мощность относительно времени входного фронта и выходной емкости, направление пина и максимальную нагрузочную емкость, а также характеристики входных пинов – их направление и емкость.

Для гибких СФ-блоков вследствие их структурной особенности допускается отсутствие библиотеки liberty. Блоки этой группы в результате технологического отображения состоят из ЛЭ, что исключает необходимость проведения характеризации. С учетом этой особенности для выполнения логического синтеза схем с использованием гибких СФ-блоков достаточно разработать библиотеку techmap, а для выполнения СВА иметь библиотеку стандартных элементов в формате liberty.

Библиотеки для технологического отображения. В разработанном маршруте проектирования ИС логический синтез выполняется программой Yosys [13]. Кроме стандартных функций преобразования RTL-описания в список соединений на языке Verilog, в Yosys доступны команды, позволяющие использовать в синтезе собственные СФ-блоки – extract и techmap. Команда extract выполняет в RTL-описании поиск блока, изоморфного переданному из extract-библиотеки, и позволяет автоматически заменить его. Также в процессе синтеза Yosys ищет модули, выполняющие конкретные логиче-

ские функции, которые определены в его собственной библиотеке. Найденные модули не зависят от архитектуры базового кристалла. Команда techmap позволяет выполнять технологическое отображение этих модулей в архитектурно зависимые СФ-блоки из techmap-библиотеки.

Синтаксис extract- и techmap-библиотек не зависит от типа блока. В extract-библиотеке могут быть описаны как жесткий, так и гибкий СФ-блоки, функции, которые не отслеживаются в Yosys по умолчанию при использовании команды techmap. Описание блока в extract-библиотеке совпадает с его RTL-описанием.

В качестве примера элемента из extract-библиотеки приведем блок mul_16×16_buf, имеющий нестандартную функцию:

```
module mul_2_8x8 (A, B, Z);
input   [15:0]  A, B;
output [31:0]  Z;
   assign Z[15:0] = A[7:0]*B[7:0];
   assign Z[31:16] = A[15:8]*B[15:8];
endmodule
```

Данный блок сочетает в себе два умножителя 8-разрядных чисел. Блок mul_16×16_buf, запрограммированный как одиночный умножитель 8- или 16-разрядных чисел, выполняет простую функцию и заменяется с помощью Yosys на элементы из techmap-библиотеки.

Чтобы выполнить архитектурно зависимое отображение элемента из extract-библиотеки, элемент добавляется в techmap-библиотеку:

```
module mul_2_8x8 (A, B, Z);
   input   [15:0]  A, B;
   output [31:0]  Z;
   mul_2_8x8 _TECHMAP_REPLACE_ (
                        .A_0(A[0]), ..., .A_15(A[15]),
                        .B_0(B[0]), ..., .B_15(B[15]),
                        .Z_0(Z[0]), ..., .Z_31(Z[31])
                        );
endmodule
```

При этом имя, входы и выходы модуля совпадают с модулем, который должен быть заменен. Имя и названия пинов вызываемого модуля далее будут использованы в блоке Tcl-библиотеки для интеграции блока в САПР.

В techmap-библиотеку могут быть добавлены как жесткие, так и гибкие блоки. Приведем описание гибкого СФ-блока из этой библиотеки. В качестве примера гибкого СФ-блока применяется сумматор двухразрядных чисел. Несмотря на используемые сумматоры с большей разрядностью, для компактного представления библиотечного элемента выбран этот размер. Для учета размера блоков и их рабочих параметров в techmap-библиотеку добавляются проверки для выполнения отображения. Если найденный модуль не проходит этих проверок, технологическое отображение не выполняется. В представленном сумматоре для корректного технологического отображения используются проверки ширины входных слов. Приведем пример библиотечного элемента:

```
module  \$add (A, B, Y);
   input  [A_WIDTH-1:0] A;
   input  [B_WIDTH-1:0] B;
```

```
output [Y_WIDTH-1:0] Y;
parameter A_SIGNED=32'd0;
parameter A_WIDTH=32'd2;
parameter B_SIGNED=32'd0;
parameter B_WIDTH=32'd2;
parameter Y_WIDTH=32'd3;
  if (A_WIDTH == 2 && B_WIDTH == 2) begin
    xci_adder_2b _TECHMAP_REPLACE_ (
                  .a0(A[0]), .a1(A[1]),
                  .b0(B[0]), .b1(B[1]),
                   .y0(Y[0]), .y1(Y[1]),  .y2(Y[2]));
  end else
    wire _TECHMAP_FAIL_ = 1;
endmodule
```

Для технологического отображения блоков памяти к ним должен быть применен специальный подход. Кроме techmap-библиотеки следует разработать файл с описанием параметров с правилами отображения. Он необходим для исключения из поиска блоков памяти, которые не подходят для имеющейся архитектуры.

В представленном примере выполняется поиск двухпортовой RAM с синхронными записью и чтением по фронту тактового сигнала:

```
bram $__RAM
  init   0
  abits  8
  dbits  8
  groups 2
  ports  1 1
  wrmode 1 0
  enable 1 1
  transp 0 0
  clocks 1 2
  clkpol 1 1
endbram
match $__RAM
  min efficiency 1
  make_transp
endmatch
```

Двухпортовая RAM имеет дополнительные сигналы разрешения записи и чтения, 8-битную шину адреса. Однако у такой RAM отсутствует прозрачный режим передачи данных и недоступна инициализация. В секции match определено минимальное число блоков, которое необходимо найти для выполнения отображения.

Приведем пример блока памяти из techmap-библиотеки:

```
module \$__RAM (CLK1, CLK2, A1ADDR, A1DATA, A1EN, B1ADDR, B1DATA, B1EN);
  parameter CFG_ABITS = 8;
  parameter CFG_DBITS = 8;
  input CLK1, CLK2;
  //Write data
  input [CFG_DBITS-1:0] A1DATA;
  input [CFG_ABITS-1:0] A1ADDR;
  input   A1EN;
```

```
  //Read data
  output [CFG_DBITS-1:0] B1DATA;
  input [CFG_ABITS-1:0] B1ADDR;
  input  B1EN;
  ramblock _TECHMAP_REPLACE_ (
    //wr control
    .WADDR_0(A1ADDR[0]), ..., .WADDR_7(A1ADDR[7]),
    .WCLKS(CLK1), .WBLKB(A1EN),  .WRB (1'b0),
    //rd control
    .RADDR_0(B1ADDR[0]), ..., .RADDR_7(B1ADDR[7]),
    .RCLKS (CLK2), .RBLKB(B1EN), .RDB(1'b0),
    .DI_0(A1DATA[0]), ..., .DI_8(A1DATA[8]),
    .DO_0(B1DATA[0]), ..., .DO_8(B1DATA[8]),
    .PARODD(1'b1), .RSTB(1'b1),
    //cfg
    .fifo(1'b0), .wsinc(1'b1), .rsinc(1'b1), .pipln(1'b0), .pargen(1'b0)
  );
endmodule
```

Данный пример показывает наличие конфигурационных пинов блока и их динамическое программирование. Эту особенность необходимо выделить для САПР и учитывать ее при разработке Tcl-библиотеки.

Библиотека для интеграции блоков в САПР. Библиотека на языке Tcl разработана на основе специальных функций САПР, позволяющих добавить в программу информацию об архитектурно зависимых элементах ПЛИС. Данные из этой библиотеки используются для выполнения физического синтеза, программирования элементов и генерации списков соединений. Команда для добавления жесткого СФ-блока в программу совпадает с командой для добавления стандартного ЛЭ. Она имеет следующий синтаксис:

xc_lib_cell <cell_name> <subckt name> {<input nodes>} {<set nodes>}, где
<cell_name> – имя СФ-блока;
<subckt name> – имя подсхемы на базовом кристалле;
<input nodes> – входные узлы;
<set nodes> – значения программирования внутренних узлов.

Под входными узлами подразумеваются входные пины, которые будут доступны пользователю при использовании блока в проекте. Под внутренними узлами – пины, программируемые сигналами из конфигурационной памяти ПЛИС, доступные только разработчику при разработке библиотеки. Внутренние узлы библиотечных элементов соединены с конфигурационной памятью, а их значения задаются при программировании ПЛИС или РСнК. В следующем примере представлен архитектурно зависимый блок mul_16×16_buf, сконфигурированный в качестве двух умножителей 8-разрядных чисел (его конфигурация выполняется с помощью двух конфигурационных пинов c_m):

```
xc_lib_cell mul_2_8x8 mul_16x16_buf {
  A_0=A<0> ...
  A_15=A<15>
  B_0=B<0> ...
  B_15=B<15>
  Z_0=Z_buf<0>....
  Z_31=Z_buf<31>
} {
```

```
    c_m<0>=1
    c_m<1>=1
}
```

Значения конфигурационных сигналов могут формироваться не только в специализированной памяти, но и от цепей земли / питания, находящихся рядом с блоком или в программируемой части кристалла. Такие сигналы необходимо трассировать наряду с другими сигналами данных. На примере из techmap-библиотеки показано, что они программируются не статически, как конфигурационные сигналы умножителя, а динамически при использовании СФ-блока в RTL-описании.

На примере блока пользовательской памяти покажем, что пины для динамического программирования передаются в САПР вместе с другими внешними входными пинами:

```
xc_lib_cell ramblock ramblock {
    WADDR_0=WADDR<0>...
    WADDR_7=WADDR<7>
    WCLKS=WCLKS
    WBLKB=WBLKB
    WRB=WRB
    WPE=WPE
    RADDR_0=RADDR<0>...
    RADDR_7=RADDR<7>
    RCLKS=RCLKS
    RBLKB=RBLKB
    RDB=RDB
    RPE=RPE
    DI_0=DI<0> ...
    DI_8=DI<8>
    DO_0=DO<0> ...
    DO_8=DO<8>
    PARODD=PARODD
    RSTB=RSTB
    fifo=fifo
    wsinc=wsinc
    rsinc=rsinc
    pipln=pipln
    pargen=pargen
} {
}
```

Данный подход дает возможность выполнять трассировку цепей, соединенных с этими пинами. Здесь конфигурационными пинами являются fifo, wsinc, rsinc, pipln, pargen. При статическом программировании число библиотечных элементов равно количеству возможных режимов 2^5, где 5 – количество конфигурационных сигналов, 2 – количество значений, которое могут принимать сигналы.

Гибкие СФ-блоки после этапа логического синтеза и технологического отображения состоят из ЛЭ ПЛИС. Некоторые ПЛИС имеют в структуре ЛЭ специализированные ресурсы и архитектурные особенности, позволяющие уменьшить площадь СФ-блока, количество занимаемых трассировочных ресурсов и повысить производительность. Метод интеграции гибкого СФ-блока в САПР позволяет учитывать специфику ПЛИС с помощью специально разработанной команды, отличающейся от добав-

ления твердых СФ-блоков. Синтаксис команды для добавления в программу гибких СФ-блоков следующий:

xc_lib_ip <cell name> {<input pins>} {<LE list>} {<relative placement>}, где
<cell name> – название библиотечного СФ-блока;
<input pins> – входные пины;
<LE list> – список соединений и логических элементов блока;
<relative placement> – размещение с использованием относительных координат.

В отличие от жестких СФ-блоков при добавлении гибких СФ-блоков в библиотеке не указываются конфигурационные пины. Они учитываются при программировании ЛЭ, на основе которого разрабатывается гибкий СФ-блок. Это видно из примера описания 2-битного сумматора:

```
xc_lib_ip xci_adder_2b {
   a0=A0
   a1=A1
   b0=B0
   b1=B1
   y0=Y0
   y1=Y1
   y2=Y2
} {
   xc_inst add0 LE_add { a=A0 b=B0 lc=1 ci0=0 ci1=1 y=Y0 co0=co00 co1=co10 }
   xc_inst add1 LE_add { a=A1 b=B1 lc=1 ci0=co00 ci1=co10  y=Y1 co0=co01 co1=co11 }
   xc_inst cin2 LE_buf_ci1 { c=co11 y=Y2 }
} {
   xc_map_inst_ip add0 9 0
   xc_map_inst_ip add1 8 0
   xc_map_inst_ip cin2 7 0
}
```

Использование в описании блока списка соединений позволяет учитывать специальные входы и выходы ЛЭ, дающие возможность объединять ЛЭ в цепочки без трассировочных ресурсов. В данном примере это пины для быстрого переноса – lc, ci0, ci1, co0, co1. Здесь LE_add – ЛЭ, запрограммированный в режим сумматора однобитных чисел; LE_buf_ci1 – ЛЭ, формирующий старший бит суммы, бит переноса с предыдущего ЛЭ.

Инициализация относительных координат выполняется следующим образом:

xc_map_ip <inst name> {x} {y}, где
<inst name> – имя ЛЭ из списка соединений;
<x>, <y> – относительные координаты матрицы ПЛИС или программируемой части РСнК.

Относительное размещение библиотечного СФ-блока позволяет зафиксировать полученную цепочку ЛЭ и не разделять ее на разные группы логических блоков. Такой подход дает возможность осуществить корректную кластеризацию СФ-блока еще при разработке библиотеки и выполнить глобальное размещение на базе алгоритмов моделирования отжига с использованием гибкого СФ-блока.

Заключение. Предложенный маршрут проектирования ИС включает в себя использование набора библиотек СФ-блоков на ПЛИС и РСнК. Разработанные методы формирования библиотек, применяющихся при имплементации СФ-блоков, учитывают особенности архитектуры базовых ПЛИС и РСнК. Это библиотека для технологическо-

го отображения блоков на этапе логического синтеза и библиотека для интегрирования СФ-блоков в САПР для выполнения этапа физического синтеза.

В дальнейшем планируется упростить описание относительного размещения для блоков большего объема, добавить процедуру поддержки шин входных и выходных сигналов и исследовать возможность добавления в Yosys новых видов идентифицируемых блоков.

Литература

1. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip / ***S.V. Gavrilov, D.A. Zheleznikov, M.A. Zapletina et al.*** // Russian Microelectronics. 2019. Vol. 48. Iss. 3. P. 176–186. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739719030053

2. ***Vasilyev N.O., Tiunov I.V., Ryzhova D.I.*** The simulated annealing based logical resynthesis method for LUT-based FPGAs // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow: IEEE, 2020. P. 1892–1894. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038959

3. ***Ziener D., Assmus S., Teich J.*** Identifying FPGA IP-cores based on lookup table content analysis // 2006 International Conference on Field Programmable Logic and Applications. Madrid: IEEE, 2006. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/FPL.2006.311255

4. ***Shubnaya A., Shupletsov M.*** Algorithms for IP block identification based on structural approach // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Saint Petersburg; Moscow: IEEE, 2019. P. 1672–1677. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656919

5. ***Фролова П.И., Чочаев Р.Ж., Иванова Г.А., Гаврилов С.В.*** Алгоритм размещения с оптимизацией быстродействия на основе матриц задержек для реконфигурируемых систем на кристалле // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 1. С. 2–7. DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-2-7

6. ***Zapletina M.A., Zheleznikov D.A., Gavrilov S.V.*** The global interconnect routing approach for reconfigurable system-on-a-chip // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow: IEEE, 2020. P. 1901–1904. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039182

7. ***Заплетина М.А., Железников Д.А., Гаврилов С.В.*** Иерархический подход к трассировке реконфигурируемой системы на кристалле островного типа // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 3. С. 16–21. DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-3-16-21

8. ***Adya S.N., Markov I.L.*** Consistent placement of macro-blocks using floorplanning and standard-cell placement // ISPD'02: Proceedings of the 2002 International Symposium on Physical Design. New York: ACM, 2002. P. 12–17. DOI: https://doi.org/10.1145/505388.505392

9. ***Emmert J.M., Bhatia D.*** A methodology for fast FPGA floorplanning // FPGA'99: Proceedings of the 1999 ACM/SIGDA seventh international symposium on Field programmable gate arrays. New York: ACM, 1999. P. 47–56. DOI: https://doi.org/10.1145/296399.296427

10. ***Farooq U., Parvez H., Mehrez H., Marrakchi Z.*** Exploration of heterogeneous FPGA architectures // International Journal of Reconfigurable Computing. 2011. Vol. 2011. Art. ID 121404. 18 p. DOI: https://doi.org/10.1155/2011/121404

11. Yosys Open SYnthesis Suite: [Web]. URL: http://www.clifford.at/yosys/about.html (дата обращения: 10.02.2020).

12. ***Garbulina T.V., Khvatov V.M., Zheleznikov D.A.*** Development and verification of various formats of functional blocks libraries as a part of the design flow for FPGAs // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow: IEEE, 2019. P. 1687–1691. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657285

13. ***Стемпковский А.Л., Гаврилов С.В., Глебов А.Л.*** Методы логического и логико-временного анализа цифровых КМОП СБИС. М.: Наука, 2007. 220 с.

Поступила в редакцию 30.03.2021 г.; после доработки 30.03.2021 г.; принята к публикации 08.07.2021 г.

Хватов Василий Михайлович – младший научный сотрудник отдела САПР Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), аспирант кафедры про-

ектирования и конструирования интегральных схем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), khvatov_v@ippm.ru

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), заведующий кафедрой проектирования и конструирования интегральных схем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), s.g@ippm.ru

References

1. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chochaev R.Z., Enns V.I. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip. *Russian Microelectronics*, 2019, vol. 48, iss. 3, pp. 176–186. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739719030053

2. Vasilyev N.O., Tiunov I.V., Ryzhova D.I. The simulated annealing based logical resynthesis method for LUT-based FPGAs. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow, IEEE, 2020, pp. 1892–1894. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038959

3. Ziener D., Assmus S., Teich J. Identifying FPGA IP-cores based on lookup table content analysis. *2006 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. Madrid, IEEE, 2006, pp. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/FPL.2006.311255

4. Shubnaya A., Shupletsov M. Algorithms for IP block identification based on structural approach. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Saint Petersburg, Moscow, IEEE, 2019, pp. 1672–1677. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656919

5. Frolova P.I., Chochaev R.Zh., Ivanova G.A., Gavrilov S.V. Timing-driven placement algorithm based on delay matrix model for reconfigurable system-on-chip. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2020, no. 1, pp. 2–7. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-2-7

6. Zapletina M.A., Zheleznikov D.A., Gavrilov S.V. The global interconnect routing approach for reconfigurable system-on-a-chip. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow, IEEE, 2020, pp. 1901–1904. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039182

7. Zapletina M.A., Zheleznikov D.A., Gavrilov S.V. The hierarchical approach to island style reconfigurable system-on-chip routing. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2020, no. 3, pp. 16–21. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-3-16-21

8. Adya S.N., Markov I.L. Consistent placement of macro-blocks using floorplanning and standard-cell placement. *ISPD'02: Proceedings of the 2002 International Symposium on Physical Design*. New York, ACM, 2002, pp. 12–17. DOI: https://doi.org/10.1145/505388.505392

9. Emmert J.M., Bhatia D. A methodology for fast FPGA floorplanning. *FPGA'99: Proceedings of the 1999 ACM/SIGDA seventh international symposium on Field programmable gate arrays*. New York, Association for Computing Machinery, 1999, pp. 47–56. DOI: https://doi.org/10.1145/296399.296427

10. Farooq U., Parvez H., Mehrez H., Marrakchi Z. Exploration of heterogeneous FPGA architectures. *International Journal of Reconfigurable Computing*, 2011, vol. 2011, art. ID 121404, 18 p. DOI: https://doi.org/10.1155/2011/121404

11. *Yosys Open SYnthesis Suite*. Available at: http://www.clifford.at/yosys/about.html (accessed: 10.02.2020).

12. Garbulina T.V., Khvatov V.M., Zheleznikov D.A. Development and verification of various formats of functional blocks libraries as a part of the design flow for FPGAs. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow, IEEE, 2019, pp. 1687–1691. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657285

13. Stempkovskiy A.L., Gavrilov S.V., Glebov A.L. *Digital CMOS VLSI logic and logic-time analysis methods*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 220 p. (In Russian).

Received 30.03.2021; Revised 30.03.2021; Accepted 08.07.2021.

Information about the authors:

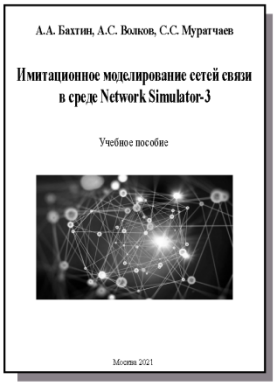
Vasiliy M. Khvatov – Junior Scientific Researcher of the CAD Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), PhD student of the Design and Construction of Integrated Circuits Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), khvatov_v@ippm.ru

Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), Head of the Design and Construction of Integrated Circuits
Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), s.g@ippm.ru

Издательско-полиграфический комплекс Национального исследовательского университета «МИЭТ» информирует

Вышло в свет учебное пособие

Бахтин А.А., Волков А.С., Муратчаев С.С. Имитационное моделирование сетей связи в среде Network Simulator-3. 2-е изд., доп.: учебное пособие. М.: МИЭТ, 2021. 100 с.: ил.



Рассмотрен процесс имитационного моделирования основных сетевых технологий в телекоммуникационных системах. Представлено руководство по использованию имитационной среды Network Simulator-3. Описаны основные модули для запуска процесса моделирования на языке программирования C++.

Для студентов НИУ МИЭТ, обучающихся по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (11.03.02, 11.04.02).

ISBN 978-5-7256-0976-9

УДК 621.3.049.771.14:621.3.062:[658.512:004] DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-399-409

Модификация алгоритма Pathfinder для этапа трассировки межсоединений ПЛИС

М.А. Заплетина, С.В. Гаврилов

Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия
Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

zapletina_m@ippm.ru

Одно из главных преимуществ проектирования пользовательских схем на ПЛИС – высокая скорость разработки, поэтому создание эффективных средств автоматизированного проектирования для современных микросхем этого класса имеет важное значение. Наиболее времязатратными этапами маршрута проектирования на ПЛИС являются размещение и трассировка. От качества результатов этих этапов зависят итоговые характеристики пользовательских цифровых схем, реализованных на ПЛИС. В работе рассмотрен подход к ускорению этапа трассировки в рамках маршрута топологического проектирования на ПЛИС за счет улучшения алгоритма трассировки. Исследован базовый алгоритм трассировки, представляющий собой модифицированный Pathfinder для смешанного графа трассировочных ресурсов. Этот алгоритм построен на основе согласования маршрутов цепей проектной схемы и работает по принципу итерационного устранения перегрузок трассировочных ресурсов базового кристалла ПЛИС. Для проведения экспериментальных запусков использованы наборы тестовых цифровых схем ISCAS’85, ISCAS’89, LGSynth’89 и несколько пользовательских промышленных проектов. Работа улучшенного алгоритма трассировки проанализирована на примере четырех архитектур ПЛИС. Вследствие усовершенствования алгоритма среднее уменьшение времени трассировки составило от 1,3 до 2,6 раза в зависимости от архитектуры ПЛИС без значительного отрицательного влияния на временные характеристики проектируемых схем.

Ключевые слова: ПЛИС; САПР; топологическое проектирование; трассировка; Pathfinder; поиск кратчайшего пути

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-37- 90046).

***Для цитирования*:** Заплетина М.А., Гаврилов С.В. Модификация алгоритма Pathfinder для этапа трассировки межсоединений ПЛИС // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 399–409. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-399-409

© М.А. Заплетина, С.В. Гаврилов, 2021

Pathfinder Algorithm Modification for CPLD and FPGA Routing Stage

M.A. Zapletina, S.V. Gavrilov

Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

zapletina_m@ippm.ru

Abstract: One of the main advantages of FPGA and CPLD is the high development speed; therefore, the importance of effective computer-aided design tools for modern microcircuits of these classes cannot be overestimated. Placement and routing are the most time-consuming stages of FPGA/CPLD design flow. The quality of results of these stages is crucial to the final performance of custom digital circuits implemented on FPGA/CPLD. The paper discusses an approach to accelerating the routing stage within the layout synthesis flow for FPGA/CPLD by introducing a few algorithmic improvements to a routing procedure. The basic routing algorithm under study is a modified Pathfinder for a mixed routing resource graph. Pathfinder is a well-known negotiation-based routing algorithm that works on the principle of iteratively eliminating congestions of chip routing resources. For experiments, the sets of test digital circuits ISCAS'85, ISCAS'89, LGSynth'89 and several custom industrial projects were used. The impact of the proposed algorithmic improvements was analyzed using four FPGA/CPLD architectures. It has been established that due to the improvements of the algorithm proposed in the paper, the average reduction in routing time was from 1.3 to 2.6 times, depending on the FPGA/CPLD architecture, with no significant negative effect on the timing characteristics of the designed circuits.

Keywords: FPGA; CPLD; CAD; layout synthesis; FPGA design flow; routing; Pathfinder; shortest path search

Funding: the study has been supported by the RFBR (project No. 20-37- 90046).

For citation: Zapletina M.A., Gavrilov S.V. Pathfinder algorithm modification for CPLD and FPGA routing stage. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 399–409. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-399-409

Введение. Трассировка – один из важнейших этапов маршрута проектирования цифровых схем на ПЛИС. От качества решения задач этого этапа зависят временные характеристики конечной реализации пользовательской схемы. С повышением степени интеграции в микроэлектронике растет размер пользовательских схем и ужесточаются стандартные требования к алгоритмам трассировки, поскольку сроки разработки как самого базового кристалла ПЛИС, так и проектов на его основе не должны увеличиваться. Основной недостаток классических алгоритмов трассировки заключается в длительном и нередко трудно прогнозируемом [1] времени поиска решения, чем и обусловлена важность разработки новых высокоэффективных алгоритмов для этой стадии проектирования на ПЛИС.

Существуют два подхода к решению задачи ускорения прохождения этапа трассировки межсоединений. Первый подход – введение алгоритмических улучшений в классические алгоритмы трассировки и поиск кратчайшего пути [2–8], включая создание параллельных версий классических алгоритмов [2, 5, 8]. Данный подход позволяет ускорить поиск решения задачи трассировки практически неограниченно, но, как правило, постепенно, без многократного повышения производительности. Он относительно прост для понимания и применения и имеет высокую скорость программной реализации. Второй подход – разработка методов, моделей и приемов, опирающихся на новые математические основы, такие как задача выполнимости булевых формул [9], машинное обучение [10], идея совместного выполнения размещения и трассировки [11, 12] и пр. Кроме того, известны алгоритмы для предварительной «грубой» трассировки межсоединений, которая позволяет получить оценку разводимости рассматриваемого размещения [13, 14]. Их применение позволяет уменьшить количество перегрузок, возникающих на этапе точной детальной трассировки. Второй подход обычно требует длительного времени на разработку, проведения фундаментальных исследований и переосмысления теоретических основ проблемы. Однако его преимущество в том, что именно он может привести к качественному прорыву в решении рассматриваемой задачи.

Pathfinder [1] в настоящее время – один из широко используемых алгоритмов трассировки на ПЛИС. Известно о его применении в качестве основы для академических и коммерческих САПР: VTR [3], FastRoute [4], SPRoute [5], CRoute [6], AIR [7] и др. Параллельные версии Pathfinder [2, 7, 8] демонстрируют высокую скорость поиска решения, однако для них характерны плохая масштабируемость и недетерминированность [15] результата трассировки. Свойство масштабируемости позволяет алгоритму трассировки работать быстрее, если он обрабатывается бóльшим количеством потоков или вычислительных ядер. Свойство детерминированности результата означает его повторяемость для одних и тех же входных данных, что крайне важно для проектирования и тестирования схем. Большинство параллельных алгоритмов на основе Pathfinder пренебрегает одним из этих свойств в пользу второго. В связи с этим создание параллельной версии алгоритма Pathfinder часто является предметом современных исследований.

Цель настоящей работы – оценка влияния алгоритмических улучшений на повышение скорости прохождения этапа трассировки с помощью модифицированного алгоритма Pathfinder для смешанного графа трассировочных ресурсов. Усовершенствованный алгоритм протестирован на наборах цифровых схем ISCAS’85 [16], ISCAS’89 [17] и LGSynth’89 [18] на примере четырех различных архитектур ПЛИС.

Модель трассировочных ресурсов базового кристалла ПЛИС. Классическая модель представления трассировочных ресурсов ПЛИС – направленный граф $G=\{\mathbf{V},\mathbf{A}\}$, в котором каждая вершина $v_i \in \mathbf{V}$ представляет собой электрический узел базового кристалла, а каждая дуга $a_j=(v_k,v_l)$, $a_j \in \mathbf{A}$, $\mathbf{A}=\mathbf{V}\times\mathbf{V}$, $v_k, v_l \in \mathbf{V}$ – направленное программируемое соединение (коммутационный элемент) между двумя узлами. После процедуры размещения проектная цепь описывается как $n_m=\{s_m,\{t_{m,1},...,t_{m,l}\}\}$ с источником $s_m \in \mathbf{V}$ и множеством приемников $\mathbf{T}=\{t_{m,k}\}$, $\mathbf{T}\subset\mathbf{V}$, $k=1,...,l$, где $l=|\mathbf{T}|$ – число приемников сигнала в цепи n_m. Цепь $n_m \in \mathbf{N}$ из множества проектных цепей $\mathbf{N}$ является трассируемой, если в ходе процедуры трассировки в графе G для нее может быть найдено дерево трассировки $\mathbf{RT}(n_m)$ с корневым элементом в вершине s_m

и листьями в вершинах $t_{m,1},...,t_{m,l}$, не пересекающееся с деревьями других проектных цепей.

Существуют архитектуры ПЛИС, предполагающие наличие не только направленных, но и ненаправленных программируемых коммутационных элементов. Модель описания трассировочных ресурсов в этом случае претерпевает изменение [19]: формируется смешанный граф $G=\{\mathbf{V},\mathbf{E}\}, \mathbf{E}=\mathbf{U}\cup\mathbf{A},$ где $u_j \in \mathbf{U}$ – множество ненаправленных ребер в графе трассировочных ресурсов. Для удобства восприятия элементы $e_j \in \mathbf{E}$, соответствующие программируемым коммутационным элементам базового кристалла, будем именовать ребрами независимо от направления распространения сигнала. Для каждой вершины v_i и каждого ребра e_j графа коммутационных ресурсов задаются фиксированные начальные веса $w(v_i)$ и $w(e_j)$. Кроме того, каждому ребру e_j ставится в соответствие функция прохождения сигнала F_{e_j}, позволяющая описать возможное направление его распространения, инверсии входов и выходов соответствующего ребру схемотехнического элемента, а также учесть различные способы управления (коммутацию по нагрузке, общий управляющий сигнал для группы коммутационных элементов и пр.).

Модификация классического алгоритма Pathfinder. Изменения, введенные в классическую модель описания трассировочных ресурсов, обусловили необходимость модификации используемого алгоритма трассировки Pathfinder. Идея алгоритма состоит в постепенном устранении перегруженности коммутационных ресурсов до тех пор, пока трассировочное решение для каждой проектной цепи не будет найдено или не будет достигнуто ограничение времени поиска решения. Перегруженной считается вершина v_i, входящая в состав нескольких деревьев трассировки одновременно. Обязательным условием полной трассируемости проектной схемы является нахождение непересекающихся деревьев трассировки для каждой проектной цепи:

$$Routability = \begin{cases} 1, \forall n_i \in \mathbf{N}, \forall n_j \in \mathbf{N} : \mathbf{RT}(n_i) \cap \mathbf{RT}(n_j) = \varnothing \\ 0 \end{cases}.$$

Помимо базовых весов $w(v_i)$, $w(e_j)$ и функции F_{e_j} описания прохождения сигнала, вводится ряд дополнительных параметров. Параметр $h(v_i)$, пропорциональный числу цепей, прошедших через вершину v_i на предыдущей итерации трассировки, обновляет свое значение для всех перегруженных вершин в конце каждой итерации. Коэффициент $p(v_i)$ зависит от числа цепей, проходящих через вершину v_i, и числа завершенных итераций алгоритма, увеличивая вес сильно перегруженных вершин графа и таким образом уменьшая вероятность их включения в дерево трассировки текущей цепи. Обновляемый вес вершины графа $c(v_i)$ зависит от накопленного веса cost^i_{hist} вершин, предшествующих v_i в строящемся дереве трассировки $\mathbf{RT}(n_m)$.

Стоимость включения вершины v_i в дерево трассировки $\mathbf{RT}(n_m)$ рассчитывается следующим образом:

$$\text{cost}(v_i) = \text{cost}^i_{hist} + c(v_i) + w(e_i),$$

где $w(e_i)$ – вес ребра, ведущего к вершине v_i.

Обновляемый вес вершины $c(v_i)$ рассчитывается как

$$c(v_i) = p(v_i)(w(v_i) + h(v_i)),$$

где коэффициент $p(v_i) = 1 + (p-1)VP \cdot n(v_i)$; p – номер текущей итерации алгоритма Pathfinder; VP – один из настроечных параметров алгоритма; $n(v_i)$ – число проектных цепей, трассировочным деревьям которых принадлежит вершина v_i.

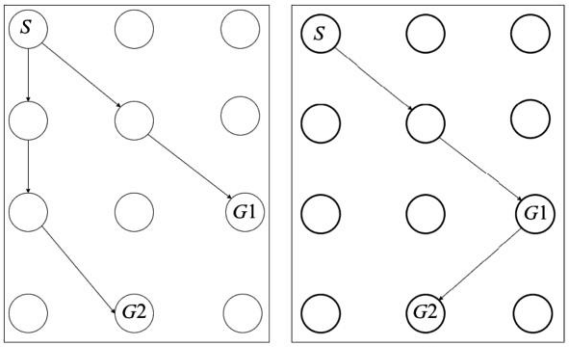
Модифицированный алгоритм Pathfinder поддерживает поиск трассировочного решения для проектной схемы, представленной в виде набора многотерминальных цепей с заранее определенным размещением на базовом кристалле ПЛИС. Сохранение естественной структуры цепи без разделения на двухтерминальные межсоединения способствует повторному использованию вершин и ребер графа коммутационных ресурсов, ранее вошедших в ее дерево трассировки, минимизирует избыточную работу по перебору вершин и дает возможность применять предлагаемые улучшения алгоритма.

Проектные схемы наборов ISCAS'85, ISCAS'89, LGSynth'89, реализуемые на ПЛИС объемом до 25 тыс. логических элементов и использованные для тестирования улучшений алгоритма, содержат низкий процент сильноразветвленных цепей с $\left|\mathbf{T}_{n_m}\right| > 20$, причем значительную их часть составляют цепи синхросигналов. Используемый маршрут топологического проектирования [20] предусматривает отдельную процедуру трассировки цепей синхронизации. И хотя в работе [7] отмечается, что наличие сильноразветвленных цепей замедляет работу алгоритма трассировки, не поддерживающего их разбиение на двухтерминальные соединения $n_m = \bigcup_{i=1,\ldots,|\mathbf{T}|} \left(s_m, t_{m,i}\right)$, в рассматриваемых условиях это влияние пренебрежимо мало.

Способы улучшения модифицированного алгоритма Pathfinder. Классический алгоритм Pathfinder очищает и строит повторно деревья трассировки для всех цепей из списка межсоединений на каждой итерации своей работы, если на графе коммутационных ресурсов осталась хотя бы одна перегруженная вершина $\exists v_i : v_i \in \mathbf{RT}(n_j), v_i \in \mathbf{RT}(n_k), n_j \neq n_k$. В ходе процедуры трассировки количество перегруженных вершин и, соответственно, пересекающихся деревьев трассировки уменьшается. Следствие этого – отсутствие острой необходимости в очистке и повторной трассировке всего списка межсоединений, что позволяет избежать излишней работы.

Первый способ улучшения алгоритма трассировки – сохранение деревьев трассировки с предыдущей итерации для цепей, не содержащих перегруженных вершин. Это решение «наследует» идею «ленивой» трассировки алгоритмом AIR [7], работающим на основе разбиения проектных цепей на набор двухтерминальных соединений.

Представленный алгоритм сортирует список проектных цепей перед началом процедуры трассировки таким образом, чтобы на каждой итерации разводились первыми цепи с бóльшим разветвлением (или занимающие бóльшую площадь на кристалле, исходя из оценки с помощью построения охватывающего прямоугольника для терминалов цепи на основе данных размещения). В ходе итерации межсоединения трассируются последовательно друг за другом. Перегруженность конкретной цепи проверяется во время ее трассировки: цепь автоматически маркируется как перегруженная в случае, если ее дерево трассировки включает в себя хотя бы одну вершину, входящую в дерево трассировки любой из ранее разведенных проектных цепей. С одной стороны, это может привести к задействованию меньшего объема коммутационных ресурсов и по-



а *б*

Варианты трассировки цепи $n = \{S,\{G1,G2\}\}$ на коммутационном графе: *а* – по умолчанию с наличием параллельных путей для приемников; *б* – с принудительным повторным использованием коммутационных ресурсов. Веса всех ребер и вершин единичные

Different paths for a net $n = \{S,\{G1,G2\}\}$: *a* – the default parallel paths; *b* – a path with enforced routing resources re-use. All the edges and vertices weights equal 1

строению оптимальных путей. С другой стороны, цепи с меньшими разветвлением и площадью становятся перегруженными, когда они разделяют вершины коммутационного графа с предыдущими цепями, в то время как цепи с бóльшими разветвлением и площадью остаются искусственно не перегруженными. Это ведет к тому, что улучшенный алгоритм стремится как можно реже переразводить цепи с высокой степенью разветвления (или занимающие бóльшую площадь на кристалле).

Второй способ улучшения направлен на сокращение числа перегрузок, возникающих вследствие построения неоптимальных, в том числе параллельных (рисунок), путей от источника до приемников в составе цепи. Минимизация параллельных путей для приемников одной цепи за счет принудительного повторного использования коммутационных ресурсов способствует сокращению объема ресурсов, необходимых для трассировки, и ведет к уменьшению общего числа перегруженных элементов.

В модифицированном алгоритме Pathfinder пути от источника до всех приемников отдельно взятой цепи трассируются одновременно. Во время поиска пути алгоритм добавляет вершины смешанного графа трассировки в приоритетную очередь (Priority Queue, PQ) в зависимости от стоимости их включения в текущее дерево цепи. Pathfinder использует «жадную» стратегию поиска кратчайшего пути к каждому приемнику, присваивая наиболее высокий приоритет вершинам с наименьшей стоимостью. Механизм второго способа следующий. При нахождении очередного приемника алгоритм искусственно уменьшает (балансирует) стоимости вершин, находящихся в дереве трассировки от этого приемника до источника. Таким образом увеличивается вероятность повторного использования вершин при поиске оставшихся приемников этой цепи, поскольку их приоритет в очереди повышается.

Базовой структурой данных рассматриваемого алгоритма выбрана минимальная двоичная куча, элементы которой – вершины трассировочного графа. Вершина с минимальной стоимостью вхождения в дерево трассировки всегда является первым элементом этой структуры и может быть извлечена с временной сложностью $O(1)$. Операции вставки нового и удаления выбранного элемента имеют временную сложность $O(\log n)$, где n – суммарное число элементов кучи. Алгоритм избегает излишних затратных процедур удаления и вставки при балансировке весов вершин трассировочного графа. Это достигается использованием сортировки имеющейся двоичной кучи после обновления весов вершин, входящих в дерево трассировки, вместо ее очистки и создания новой.

Эксперимент. Предлагаемые улучшения модифицированного алгоритма Pathfinder [19] протестированы на примере четырех архитектур ПЛИС. Тестовая ПЛИС №1 является программируемой цифровой частью ПАЦИС 5400ТР094 [21] и имеет классиче-

скую островную архитектуру. Тестовая ПЛИС №2 наследует значительный объем структурных решений семейства микросхем Microsemi ProASIC3 [22]. Архитектура тестовой ПЛИС №3 в значительной степени повторяет структуру микросхем семейства Altera MAX II CPLD [23]. Тестовая ПЛИС №4 – продолжение ПЛИС №3, она имеет экспериментальную архитектуру с долей оригинальных схемотехнических решений. (В связи с незавершенностью маршрута проектирования ПЛИС №4 результаты статического временного анализа для нее в настоящей статье не представлены.) Тестовые ПЛИС содержат 1794, 3200, 25 600 и 25 600 логических ячеек соответственно.

В табл.1 представлены результаты внедрения первого способа ускорения процедуры трассировки, основанного на сохранении деревьев трассировки с предыдущей итерации для цепей, не имеющих перегруженных вершин. В зависимости от рассматриваемой архитектуры ПЛИС среднее уменьшение времени трассировки варьируется от 1,3 до 2,6 раза. Худший результат по увеличению задержки критического пути на 7,9 % наблюдается для ПЛИС островной архитектуры, в то время как для ПЛИС №2 задержки критического пути уменьшились, а для ПЛИС №3 выросли менее чем на 1 %. Следует также отметить, что, хотя число итераций работы алгоритма до нахождения полного трассировочного решения в среднем увеличилось, продолжительность каждой итерации и, соответственно, суммарное время работы сократились.

Таблица 1

Влияние сохранения деревьев трассировки для цепей, не содержащих перегруженных вершин

Table 1

The effect of routing trees saving for the nets with no congested vertices

Номер ПЛИС	Увеличение числа итераций, %	Уменьшение времени трассировки, %	Увеличение задержки критического пути, %	Уменьшение размера дерева трассировки, %
	Среднее/ Медианное	Среднее/ Медианное	Среднее/ Медианное	Среднее/ Медианное
1	149,7 / 70,0	22,8 / 35,8	7,9 / 0,0	–9,2 / 0,4
2	–3,1 / 0,0	50,1 / 48,7	–0,7 / –0,9	0,3 / 0,5
3	32,9 / 25,0	61,9 / 74,8	0,5 / 0,0	–0,8 / –1,2
4	14,9 / 13,4	57,1 / 58,1	–	–0,7 / –0,6

Цепи с бóльшим числом приемников, как уже отмечалось, представляют сложность для эффективной работы алгоритма трассировки, не поддерживающего разбиение таких цепей на набор двухтерминальных соединений $n_m = \bigcup_{i=1,\ldots,|\mathbf{T}|} \left(s_m, t_{m,i}\right)$. Поскольку нередко лишь малая часть ветвей трассировочного дерева таких цепей содержит перегруженные вершины, то полное перестроение всего дерева оказывается излишним и сохранение дерева трассировки только для перегруженных цепей работает недостаточно эффективно. В связи с этим предлагается использовать второй способ улучшения алгоритма, связанный с балансировкой стоимости вершин после нахождения пути до очередного приемника. В табл.2 приведены результаты внедрения обоих способов улучшений алгоритма по сравнению с модифицированным алгоритмом Pathfinder с неизмененной эвристикой для поиска пути.

Таблица 2

Результат внедрения улучшений алгоритма

Table 2

The summary effect of the proposed algorithm improvements

Номер ПЛИС	Увеличение числа итераций, %	Уменьшение времени трасси-ровки, %	Увеличение задержки крити-ческого пути, %	Уменьшение размера дерева трассировки, %
	Среднее/ Медианное	Среднее/ Медианное	Среднее/ Медианное	Среднее/ Медианное
1	50,7 / –3,2	41,4 / 38,1	22,0 / 17,7	12,3 / 13,5
2	2,6 / 0,0	51,8 / 57,3	5,9 / 3,9	13,3 / 13,5
3	22,3 / 0,0	48,3 / 54,9	7,0 / 1,7	14,1 / 6,15
4	14,9 / 9,5	56,7 / 56,8	–	–0,4 / 0,2

Как видно из табл.2, балансировка весов вершин трассировочного дерева позволяет уменьшить количество итераций и число вошедших в дерево трассировки элементов. Лучший результат по всем показателям достигнут на ПЛИС № 2 с архитектурой, схожей с серией Microsemi ProASIC3 [22]. Худший результат введенных улучшений алгоритма отмечен на ПЛИС островной архитектуры, что свидетельствует о необходимости разработки техники улучшения временных характеристик проектируемых пользовательских схем для данного типа архитектур.

Заключение. Применение предлагаемых улучшений модифицированного алгоритма Pathfinder для смешанного графа трассировочных ресурсов, влияние которых оценено на примере четырех архитектур ПЛИС, позволило получить следующие результаты. Пропуск этапа разрыва и перетрассировки цепей, не содержащих перегруженных коммутационных ресурсов, позволяет в среднем в 2 раза ускорить прохождение этапа трассировки без значительного ухудшения временных характеристик проектируемых пользовательских схем. Балансировка трассировочного дерева по мере нахождения приемников сигнала повышает частоту повторного использования трассировочных ресурсов в рамках трассировки одной цепи, о чем свидетельствует уменьшение размера итогового дерева трассировки.

В целом предлагаемые улучшения оказали положительный эффект на трассировку в базисе каждой из рассмотренных тестовых архитектур ПЛИС, однако для островной архитектуры отмечена необходимость внедрения техники улучшения временных характеристик проектируемых схем в рамках этапа трассировки.

Литература

1. ***McMurchie L., Ebeling C.*** PathFinder: a negotiation-based performance-driven router for FPGAs // FPGA’95: Proceedings of the 1995 ACM Third International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. New York: ACM, 1995. P. 111–117. DOI: https://doi.org/10.1145/201310.201328

2. ***Zhou Y., Vercruyce D., Stroobandt D.*** Accelerating FPGA routing through algorithmic enhancements and connection-aware parallelization // ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems. 2020. Vol. 13. Iss. 4. Art. No. 18. P. 1–26. DOI: https://doi.org/10.1145/3406959

3. VTR 8: High-performance CAD and customizable FPGA architecture modelling / ***K.E. Murray, O. Petelin, Sh. Zhong et al.*** // ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems. 2020. Vol. 13. Iss. 2. Art. No. 9. P. 1–55. DOI: https://doi.org/10.1145/3388617

4. ***Pan M., Xu Y., Zhang Y., Chu Ch.*** Fastroute: An efficient and high-quality global router // VLSI Design. 2012. Art. ID 608362. 18 p. DOI: https://doi.org/10.1155/2012/608362

5. ***He J., Burtscher M., Manohar R., Pingali K.*** SPRoute: A scalable parallel negotiation-based global router // 2019 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD-2019). Westminster, CO: IEEE, 2019. P. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCAD45719.2019.8942105

6. ***Vercruyce D., Vansteenkiste E., Stroobandt D.*** CRoute: A fast high-quality timing-driven connection-based FPGA router // 2019 IEEE 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). San Diego, CA: IEEE, 2019. P. 53–60. DOI: https://doi.org/10.1109/FCCM.2019.00017

7. ***Murray K.E., Zhong S., Betz V.*** AIR: A fast but lazy timing-driven FPGA router // 2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). Beijing: IEEE, 2020. P. 338–344. DOI: https://doi.org/10.1109/ASP-DAC47756.2020.9045175

8. ***Hoo C.H., Kumar A.*** ParaDRo: A parallel deterministic router based on spatial partitioning and scheduling // FPGA'18: Proceedings of the 2018 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. New York: ACM, 2018. P. 67–76. DOI: https://doi.org/10.1145/3174243.3174246

9. ***Fraisse H.*** Incremental routing for circuit designs using a SAT router. U.S. Patent No. 10445456. Filed: 14.06.2017. Publ.: 15.10.2019.

10. High-definition routing congestion prediction for large-scale FPGAs / ***M.B. Alawieh, W. Li, Y. Lin et al.*** // 2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). Beijing: IEEE, 2020. P. 26–31. DOI: https://doi.org/10.1109/ASP-DAC47756.2020.9045178

11. ***Li W., Dehkordi M.E., Yang S., Pan D.Z.*** Simultaneous placement and clock tree construction for modern FPGAs // FPGA'19: Proceedings of the 2019 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. New York: ACM, 2019. P. 132–141. DOI: https://doi.org/10.1145/3289602.3293897

12. ***Kannan P., Bhatia D.*** Tightly integrated placement and routing for FPGAs // FPL 2001: Field-Programmable Logic and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001. P. 233–242. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-44687-7_25

13. ***Liu W.-H., Kao W.-C., Li Y.-L., Chao K.-Y.*** Multi-threaded collision-aware global routing with bounded-length maze routing // Design Automation Conference. Anaheim, CA: IEEE, 2010. P. 200–205.

14. ***Pan M., Chu C.*** IPR: An integrated placement and routing algorithm // 2007 44th ACM/IEEE Design Automation Conference. San Diego, CA: IEEE, 2007. P. 59–62.

15. ***Змеев Д.Н., Левченко Н.Н., Окунев А.С., Стемпковский А.Л.*** Влияние особенностей модели вычислений и архитектуры на надежность параллельной потоковой вычислительной системы // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 1. С. 64–69. DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-64-69

16. ***Brglez F., Fujiwara H.*** A neutral netlist of 10 combinational circuits and a targeted translator in FORTRAN // Special Session on Recent Algorithms for Gate-Level ATPG with Fault Simulation and Their Performance Assessment, 1985 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems. Kyoto: IEEE, 1985. P. 663–698.

17. ***Brglez F., Bryan D., Kozminski K.*** Combinational profiles of sequential benchmark circuits // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Portland, OR: IEEE, 1989. Vol. 3. P. 1929–1934. DOI: https://doi.org/10.1109/ISCAS.1989.100747

18. ***Yang S.*** Logic synthesis and optimization benchmarks: Technical report, MCNC, Dec. 1988 // 1989 MCNC International Workshop on Logic Synthesis. S. l.: MCNC, 1989. P. 14.

19. ***Железников Д.А., Заплетина М.А., Хватов В.М.*** Исследование механизма разрыва и перетрассировки на этапе топологического синтеза в базисе реконфигурируемых систем на кристалле // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 1. С. 188–192. DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-1-188-192

20. Маршрут топологического синтеза для реконфигурируемых систем на кристалле специального назначения / ***С.В. Гаврилов, Д.А. Железников, М.А. Заплетина и др.*** // Микроэлектроника, 2019. Т. 48. № 3. С. 211–223. DOI: https://doi.org/10.1134/S0544126919030050

21. ПАЦИС 5400ТР094 // Дизайн центр «Союз»: [Электронный ресурс]. URL: https://dcsoyuz.ru/search/art/1605 (дата обращения: 06.04.2021).

22. ProASIC3 series // Microsemi: [Web] / Microchip Technology Inc. URL: https://www.microsemi.com/product-directory/fpgas/1690-proasic3 (дата обращения: 06.04.2021).

23. Intel MAX II Device Handbook / Altera Corp. 2009. 297 p. // Intel: [Web] / Intel Corp. URL: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/max2/max2_mii5v1.pdf (дата обращения: 06.04.2021).

Поступила в редакцию 07.04.2021 г.; после доработки 07.04.2021 г.; принята к публикации 08.07.2021 г.

Заплетина Мария Андреевна – младший научный сотрудник отдела САПР Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), аспирант кафедры проектирования и конструирования интегральных схем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), zapletina_m@ippm.ru

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), заведующий кафедрой проектирования и конструирования интегральных схем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), s.g@ippm.ru

References

1. McMurchie L., Ebeling C. PathFinder: a negotiation-based performance-driven router for FPGAs. *FPGA'95: Proceedings of the 1995 ACM Third International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*. New York, ACM, 1995, pp. 111–117. DOI: https://doi.org/10.1145/201310.201328

2. Zhou Y., Vercruyce D., Stroobandt D. Accelerating FPGA routing through algorithmic enhancements and connection-aware parallelization. *ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems*, 2020, vol. 13, iss. 4, art. no. 18, pp. 1–26. DOI: https://doi.org/10.1145/3406959

3. Murray K.E., Petelin O., Zhong Sh., Wang J.M., Eldafrawy M., Legault J.-Ph., Sha E., Graham A.G., Wu J., Walker M.J.P., Zeng H., Patros P., Luu J., Kent K.B., Betz V. VTR 8: High-performance CAD and customizable FPGA architecture modelling. *ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems*, 2020, vol. 13, iss. 2, art. no. 9, pp. 1–55. DOI: https://doi.org/10.1145/3388617

4. Pan M., Xu Y., Zhang Y., Chu Ch. Fastroute: An efficient and high-quality global router. *VLSI Design*, 2012, art. ID 608362, 18 p. DOI: https://doi.org/10.1155/2012/608362

5. He J., Burtscher M., Manohar R., Pingali K. SPRoute: A scalable parallel negotiation-based global router. *2019 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD-2019)*. Westminster, CO, IEEE, 2019, pp. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCAD45719.2019.8942105

6. Vercruyce D., Vansteenkiste E., Stroobandt D. CRoute: A fast high-quality timing-driven connection-based FPGA router. *2019 IEEE 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)*. San Diego, CA, IEEE, 2019, pp. 53–60. DOI: https://doi.org/10.1109/FCCM.2019.00017

7. Murray K.E., Zhong S., Betz V. AIR: A fast but lazy timing-driven FPGA router. *2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*. Beijing, IEEE, 2020, pp. 338–344. DOI: https://doi.org/10.1109/ASP-DAC47756.2020.9045175

8. Hoo C.H., Kumar A. ParaDRo: A parallel deterministic router based on spatial partitioning and scheduling. *FPGA'18: Proceedings of the 2018 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*. New York, ACM, 2018, pp. 67–76. DOI: https://doi.org/10.1145/3174243.3174246

9. Fraisse H. *Incremental routing for circuit designs using a SAT router*. U.S. patent No. 10445456, 2019.

10. Alawieh M.B., Li W., Lin Y., Singhal L., Iyer M.A., Pan D.Z. High-definition routing congestion prediction for large-scale FPGAs. *2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*. Beijing, IEEE, 2020, pp. 26–31. DOI: https://doi.org/10.1109/ASP-DAC47756.2020.9045178

11. Li W., Dehkordi M.E., Yang S., Pan D.Z. Simultaneous placement and clock tree construction for modern FPGAs. *FPGA'19: Proceedings of the 2019 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*. New York, ACM, 2019, pp. 132–141. DOI: https://doi.org/10.1145/3289602.3293897

12. Kannan P., Bhatia D. Tightly integrated placement and routing for FPGAs. *FPL 2001: Field-Programmable Logic and Applications*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2001, pp. 233–242. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-44687-7_25

13. Liu W.-H., Kao W.-C., Li Y.-L., Chao K.-Y. Multi-threaded collision-aware global routing with bounded-length maze routing. *Design Automation Conference*. Anaheim, CA, IEEE, 2010, pp. 200–205.

14. Pan M., Chu C. IPR: An integrated placement and routing algorithm. *2007 44th ACM/IEEE Design Automation Conference*. San Diego, CA, IEEE, 2007, pp. 59–62.

15. Zmejev D.N., Levchenko N.N., Okunev A.S., Stempkovsky A.L. Impact of features of the computing model and architecture on the parallel dataflow computing system reliability. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2020, no. 1, pp. 64–69. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-64-69

16. Brglez F., Fujiwara H. A neutral netlist of 10 combinational circuits and a targeted translator in FORTRAN. *Special Session on Recent Algorithms for Gate-Level ATPG with Fault Simulation and Their Performance Assessment, 1985 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems.* Kyoto, IEEE, 1985, pp. 663–698.

17. Brglez F., Bryan D., Kozminski K. Combinational profiles of sequential benchmark circuits. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Portland, OR, IEEE, 1989, vol. 3, pp. 1929–1934. DOI: https://doi.org/10.1109/ISCAS.1989.100747

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

19. Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M. The rip-up and reroute technique research for physical synthesis in the basis of reconfigurable SoCs. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2018, no. 1, pp. 188–192. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-1-188-192

20. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Khvatov V.M., Chochaev R.Z., Enns V.I. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip. *Russian Microelectronics*, 2019, vol. 48, iss. 3, pp. 176–186. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063739719030053

21. The programmable analog and digital integrated circuit 5400TP094. *Design Center Soyuz.* Available at: https://dcsoyuz.ru/search/art/1605 (accessed: 06.04.2021). (In Russian).

22. ProASIC 3 series. *Microsemi.* Available at: https://www.microsemi.com/product-directory/fpgas/1690-proasic3 (accessed: 06.04.2021).

23. *MAX II Device Handbook.* Intel Corp. (previously Altera), 2009. 297 p. Available at: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/max2/max2_mii5v1.pdf (accessed: 06.04.2021).

Received 07.04.2021; Revised 07.04.2021; Accepted 08.07.2021.

Information about the authors:

Mariya A. Zapletina – Junior Scientific Researcher of the CAD Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), PhD student of the Design and Construction of Integrated Circuits Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), zapletina_m@ippm.ru

Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), Head of the Design and Construction of Integrated Circuits
Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), s.g@ippm.ru

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА
INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

УДК 621.391.272:[534:535]:[53.072:51] **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-410-425**

Математические модели характеристик акустооптической линии задержки и оценка их адекватности

А.Р. Гасанов, Р.А. Гасанов, Р.А. Ахмедов, М.В. Садыхов

Национальная академия авиации Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

sadiqovm.1999@gmail.com

Для обработки сигналов в радиотехнических системах применяются различные методы и технические средства, критерии выбора которых оптимизируются по лучшему результату решения поставленной задачи. Исследование сдвига аналогового сигнала на временной оси – важное направление в радиотехнике. В работе перечислены функциональные возможности акустооптической линии задержки (АОЛЗ) в контексте обработки аналоговых сигналов во временной области. Обоснована актуальность создания математических моделей основных характеристик АОЛЗ и их исследования. Обсуждены схема АОЛЗ, принцип ее работы и получено выражение для тока на ее выходе. На основе конструктивно-электрических параметров АОЛЗ построены математические модели ее переходной, импульсной и амплитудно-частотной характеристик. Отмечено, что наибольшее влияние на характеристики конкретного образца АОЛЗ оказывает диаметр светового пучка, взаимодействующий с упругой волной. Проведен численный анализ характеристик АОЛЗ, результаты которого апробированы экспериментально на макете АОЛЗ. Во избежание случайных совпадений численный анализ и экспериментальная апробация проведены для двух значений диаметра лазерного пучка. Адекватность переходной, импульсной и амплитудно-частотной характеристик оценена по полученным результатам в статике и динамике. Показано, что для определения частотных и временных параметров АОЛЗ может быть использована переходная, импульсная или амплитудно-частотная характеристики. Статическое и динамическое сопоставления результатов численного анализа и экспериментальных исследований свидетельствуют об их однозначной адекватности.

Ключевые слова: акустооптика; линия задержки; характеристики АОЛЗ; упругая волна; лазер

© А.Р. Гасанов, Р.А. Гасанов, Р.А. Ахмедов, М.В. Садыхов, 2021

Для цитирования: Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Ахмедов Р.А., Садыхов М.В. Математические модели характеристик акустооптической линии задержки и оценка их адекватности // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 410–425. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-410-425

Mathematical Models of the Acousto-Optic Delay Line Characteristics and Their Adequacy Assessment

A.R. Gasanov, R.A. Gasanov, R.A. Ahmadov, M.V. Sadikhov

National Academy of Aviation of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

sadiqovm.1999@gmail.com

Abstract: In radioengineering systems, various methods and technical means are used for signal processing, the selection criteria of which are optimized for the best result of assigned task solution. The study of an analog signal shift on the time axis is one of the widely used radio engineering problems. In this work, the functional capabilities of an acousto-optic delay line (AODL) in the context of processing analog signals in the time domain are listed. The urgency of creating mathematical models of the AODL main characteristics and their study was substantiated. The AODL circuit and its operation principle were discussed, and an expression for the current at its output was obtained. Based on the structural and electrical parameters of the AODL, mathematical models of its transient, impulse and amplitude-frequency characteristics have been constructed. It was shown that the diameter of the light beam interacting with the elastic wave has the greatest effect on the characteristics of a particular AODL sample. A numerical analysis of the above characteristics was carried out. The results of the numerical analysis were tested experimentally on the AODL model. To avoid accidental coincidences, numerical analysis and experimental approbation were carried out for two values of the laser beam diameter. The adequacy of the transient, impulse and amplitude-frequency characteristics was assessed by the results obtained in statics and dynamics. It was shown that the transient, impulse or amplitude-frequency response can be used to determine the AODL frequency and time parameters. Static and dynamic comparison of the results of numerical analysis and experimental studies have shown their unambiguous adequacy.

Keywords: acousto-optics; delay line; AODL characteristics; elastic wave; laser

For citation: Gasanov A.R., Gasanov R.A., Ahmadov R.A., Sadikhov M.V. Mathematical models of the acousto-optic delay line characteristics and their adequacy assessment. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 410–425. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-410-425

Введение. В различных радиотехнических системах обработка сигналов во временной области является одной из приоритетных задач, которая решается, например, при реализации радиолокационных симуляторов и согласованных фильтров [1–3]. В контексте решения этой задачи фотоупругий эффект имеет высокий потенциал [4–7]. Построенное на основе фотоупругого эффекта и предназначенное для плавно управляемой задержки электрических сигналов устройство называют акустооптической линией задержки (АОЛЗ). Различают АОЛЗ с прямым детектированием и АОЛЗ гетеро-

динного типа. При этом первые используются для обработки видеосигналов, а вторые – для обработки радиосигналов. По сути АОЛЗ с прямым детектированием является низкочастотным эквивалентом АОЛЗ гетеродинного типа [8]. Поэтому результаты исследований АОЛЗ с прямым детектированием в большинстве случаев можно экстраполировать на АОЛЗ гетеродинного типа.

Схема АОЛЗ. В схеме, приведенной на рис.1, обрабатываемый сигнал $u_{in}(t)$ модулирует колебание генератора высокой частоты (ГВЧ) по амплитуде. Отметим, что в зависимости от характера решаемой задачи могут быть применены также балансная амплитудная модуляция и амплитудная манипуляция. Амплитудно-модулированный сигнал с несущей частотой Ω подводится к клеммам прикрепленного к торцу фотоупругой среды (ФУС) электроакустического преобразователя (ЭАП) длиной L и шириной H.

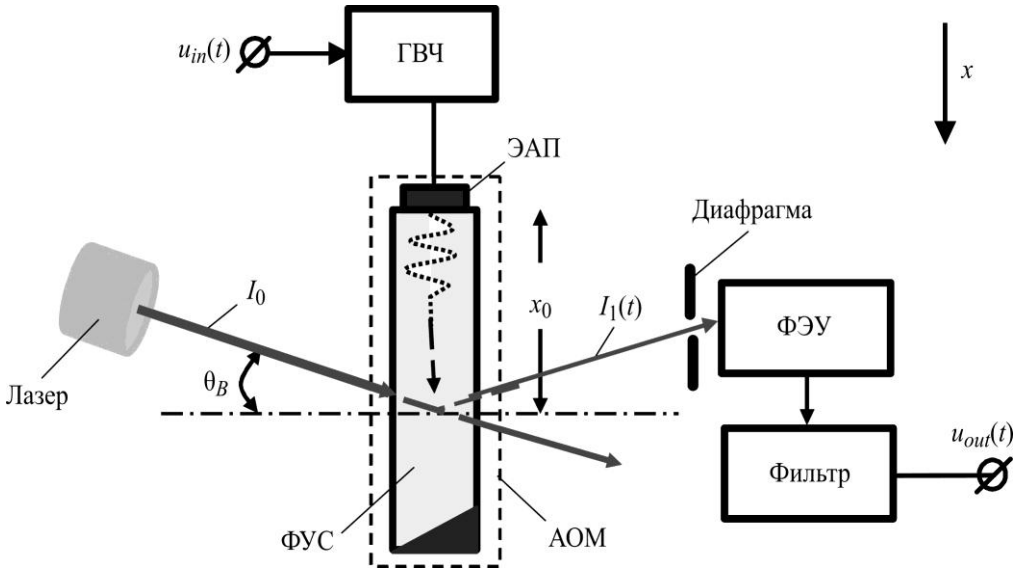


Рис.1. Схема АОЛЗ с прямым детектированием
Fig.1. The scheme of AODL with direct detection

Ячейку, состоящую из ФУС и прикрепленного к ее торцу ЭАП, называют акустооптическим модулятором (АОМ). ЭАП возбуждает в ФУС акустическую волну длиной $\Lambda = 2\pi\upsilon/\Omega$ и мощностью $P_a(t)$, которая распространяется со скоростью υ, примерно в 10^5 раз меньшей скорости распространения электромагнитной волны. Временная зависимость акустической мощности $P_a(t)$ обусловлена входным сигналом $u_{in}(t)$.

Дифракция Брэгга. При прямом детектировании (см. рис.1) лазерное излучение интенсивностью I_0, с длиной волны λ и частотой $\nu = \omega/(2\pi)$ падает в апертуру ФУС под углом Брэгга $\theta_B = \arcsin(0{,}5\lambda/\Lambda)$. В результате взаимодействия акустической и оптической волн в ФУС часть светового пучка с интенсивностью $I_1(t)$ отклоняется в первый дифракционный порядок и через отверстие в диафрагме падает на светочувствительную поверхность фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Напряженность электрического поля, падающего на фоточувствительную поверхность ФЭУ оптической волны, опишем выражением

$$e(t) = E\left[1 + ms(t)\right]\cos\left[(\omega - \Omega)t\right], \qquad (1)$$

где m – индекс амплитудной модуляции; $s(t) = u_{in}(t)/u_{in\max}$ – нормированный входной сигнал, т.е. модулирующий процесс, который может меняться в пределах ± 1; $u_{in\max}$ – максимальное значение входного сигнала.

Отметим, что в формуле (1) уменьшение частоты оптической волны на величину Ω по сравнению с частотой падающего света ω обусловлено эффектом Доплера, так как дифракция происходит на бегущей упругой волне.

Ввиду того что ФЭУ реагирует на интенсивность света, пропорциональную $|e(t)|^2$, для тока фотокатода $i_ф(t)$ запишем следующее выражение:

$$i_ф(t) \sim 0{,}5E^2\left[1 + 2ms(t) + m^2 s^2(t)\right]\left\{1 + \cos\left[2(\omega - \Omega)t\right]\right\}. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности в (2) определяется как среднее значение тока фотокатода:

$$\overline{i_ф} = \left[P_1/(h\nu)\right]e\eta', \quad (3)$$

где P_1 – мощность отклоненного в первый дифракционный порядок светового пучка при отсутствии входного сигнала; $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд протона; η' – квантовый выход фотокатода (среднее число электронов, испускаемых фотокатодом при падении на него одного фотона).

Отметим, что в соответствии с принятыми обозначениями число фотонов, которые падают на фоточувствительную поверхность ФЭУ за секунду, равно $P_1/(h\nu)$.

Подставив (3) в (2), получим

$$i_ф(t) = \left[P_1/(h\nu)\right]e\eta'\left[1 + 2ms(t) + m^2 s^2(t)\right]\left\{1 + \cos\left[2(\omega - \Omega)t\right]\right\}. \quad (4)$$

Модулирующий процесс в (4) выделяется фильтром, который на выходе формирует ток:

$$i_{out}(t) = [2Gme\eta' P_1/(h\nu)]s(t), \quad (5)$$

где G – коэффициент усиления ФЭУ.

Выражение в квадратных скобках в (5) является постоянной величиной, поэтому можно утверждать, что сигнал на выходе фильтра $u_{out}(t)$ – точная копия входного сигнала $u_{in}(t)$. Вместе с тем $u_{out}(t)$ отстает от $u_{in}(t)$ на время $\tau = x_0/\upsilon$, где x_0 – расстояние от ЭАП до области акустооптического взаимодействия. Время задержки τ может составить от нескольких микросекунд до десятков микросекунд, что обеспечивается низкой скоростью распространения акустической волны в ФУС, качество которой оценивают коэффициентом добротности $M = n^6 p^2/(\rho\upsilon^3)$, где n, p и ρ – соответственно коэффициент преломления, фотоупругая постоянная среды взаимодействия и плотность [9].

Постановка задачи. Как правило, в АОЛЗ используется слабое акустооптическое взаимодействие, что позволяет рассматривать ее как линейную стационарную систему и согласно [10] апеллировать следующим примерным равенством:

$$I_1(t) \approx I_0\eta(t), \quad (6)$$

где $\eta(t)$ – дифракционная эффективность, определяемая по формуле

$$\eta(t) = \left[\left(\pi^2 ML\right)/\left(2\lambda^2 H\right)\right] P_a(t). \quad (7)$$

В формуле (7) выражение в квадратных скобках является постоянной величиной для выбранной конструкции АОЛЗ. Соответственно, временная зависимость дифракционной эффективности обусловлена только функцией $P_a(t)$.

На основе формулы (6) запишем выражение для мощности отклоненного в первый дифракционный порядок светового пучка с равномерным распределением интенсивности в пределах площади его поперечного сечения S_1:

$$P_1(t) = S_1 I_1(t) = S_1 I_0 \eta(t) = \left(S_1 P_0 / S_0\right)\eta(t), \quad (8)$$

где S_0 и $P_0 = S_0 I_0$ – соответственно площадь поперечного сечения и мощность падающего в апертуру АОМ светового пучка.

По определению линейная стационарная система отвечает условиям принципа суперпозиции и может быть представлена переходной, импульсной или частотной характеристикой. Причем переходная и импульсная характеристики используются для анализа особенностей линейной стационарной системы во временной области, а частотная – в частотной области. Таким образом, на основе принятых начальных условий можно постулировать, что переходная, импульсная и частотная характеристики являются основными средствами для анализа особенностей АОЛЗ. Поэтому математическое моделирование переходной $g(t)$, импульсной $h(t)$ и частотной $K(j\omega)$ характеристик АОЛЗ и оценка степени их адекватности путем численного анализа и экспериментальных исследований – важная научно-техническая задача.

Переходная характеристика АОЛЗ. Процесс формирования выходного тока АОЛЗ с прямым детектированием $i_{out}(t)$ можно разделить на две области: стационарный режим и установление стационарного режима. В стационарном режиме мощность падающего в апертуру АОМ светового пучка P_0 и отношение поперечных сечений падающего и отклоненного световых пучков S_1/S_0 постоянны, т.е. $P_0 = \text{const}$, $S_1/S_0 = \text{const}$. Поэтому в этой области временная зависимость $i_{out}(t)$ обусловлена только входным сигналом $u_{in}(t)$, т.е. модулирующим процессом $s(t)$. При отсутствии модуляции $s(t) = 0$ и определяемый соотношением (5) ток на выходе фильтра равен нулю: $i_{out}(t) = 0$.

В процессе установления стационарного режима площадь поперечного сечения отклоненного светового пучка является переменной величиной, т.е. функцией времени $S_1(t)$. Из совместного анализа (5) и (8) можно констатировать, что в области установления стационарного режима временная зависимость $i_{out}(t)$ обусловлена как модулирующим процессом $s(t)$, так и функцией $S_1(t)$. В случае $s(t) = 0$ временная зависимость $i_{out}(t)$ вызвана только функцией $S_1(t)$. Функциональная зависимость $S_1(t)$ определяется временем и характером вхождения упругой волны в световой пучок. В этих условиях процесс установления стационарного режима описывается нормированной функцией

$$g(t) = S_1(t)/S_0. \quad (9)$$

Здесь S_0 – площадь поперечного сечения отклоненного светового пучка в стационарном режиме, т.е. наибольшее значение $S_1(t)$. На практике в области стационарного режима $S_1(t)\big|_{\max} \approx S_0$.

Учитывая, что АОМ является широкополосным устройством (полоса пропускания составляет 40–60 % от центральной частоты), функциональную зависимость (9) можно считать переходной характеристикой АОЛЗ с прямым детектированием.

Геометрия взаимодействия упругой волны с лазерным пучком круглого поперечного сечения проиллюстрирована на рис.2.

Площадь поперечного сечения отклоненного светового пучка $S_1(x)$ равна площади сечения акустооптического взаимодействия в плоскости xoz. В области установления стационарного режима

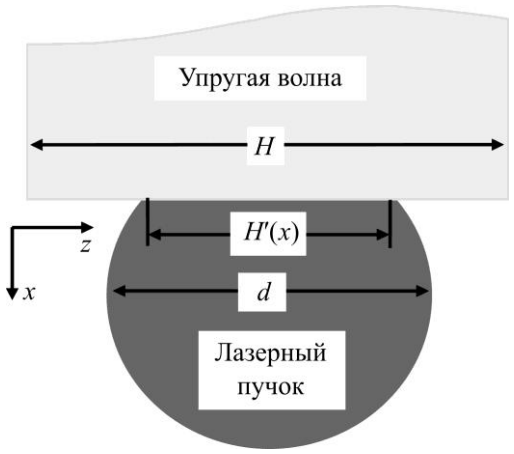


Рис.2. Геометрия фотоупругого взаимодействия в плоскости, перпендикулярной направлению распространения лазерного пучка круглого поперечного сечения

Fig.2. Geometry of photoelastic interaction in a plane perpendicular to the direction of propagation of a laser beam with a circular cross section

$$S_1(x) = \int_{x_0}^{x} H'(x)\,dx \quad \text{при} \quad x_0 \le x \le x_0 + d\,, \tag{10}$$

где длина линии пересечения переднего фронта упругой волны со световым пучком в плоскости xoz равна:

$$H'(x) = 2\sqrt{d(x-x_0) - (x-x_0)^2} \quad \text{при} \quad x_0 \le x \le x_0 + d\,, \tag{11}$$

здесь x – текущая координата; d – диаметр лазерного пучка.

В области стационарного режима, т.е. при выполнении условия $x \ge x_0 + d$, площадь акустооптического взаимодействия имеет максимальное значение и определяется как

$$S_1(x)\big|_{x=x_0+d} = S_0 = \int_{x_0}^{x_0+d} H'(x)\,dx = 0,25\pi d^2\,. \tag{12}$$

Учитывая, что в выбранной системе отсчета текущая координата x связана с текущим временем t равенством $x = \upsilon t$, соотношения (10) и (11) перенесем на временную плоскость в следующем виде:

$$H'(t) = 2\upsilon\sqrt{\frac{d}{\upsilon}t - t^2}\left[\sigma(t-\tau) - \sigma\left(t-\tau-\frac{d}{\upsilon}\right)\right] \quad \text{при} \quad \tau \le t \le \tau + d/\upsilon\,;$$

$$S_1(t) = \upsilon\int_{\tau}^{t} H'(t)\,dt \quad \text{при} \quad \tau \le t \le \tau + d/\upsilon\,,$$

где $\sigma(t)$ – единичная функция Хевисайда.

На основе последних выражений запишем конечное уравнение для площади поперечного сечения отклоненного светового пучка:

$$S_1(t) = 2\upsilon^2 \int_{\tau}^{t} \sqrt{\frac{d}{\upsilon}(t-\tau) - (t-\tau)^2}\, dt \quad \text{при } \tau \le t \le \tau + d/\upsilon. \tag{13}$$

Подставив (12) и (13) в (9), получим следующее уравнение для переходной характеристики АОЛЗ с прямым детектированием:

$$g(t) = \frac{4\upsilon}{\pi d^2} \int_{\tau}^{t} H'(\xi) d\xi \quad \text{при } \tau \le t \le \tau + \tau_0 \tag{14}$$

или

$$g(t) = \frac{8}{\pi \tau_0^2} \int_{\tau}^{t} \sqrt{\tau_0(\xi-\tau) - (\xi-\tau)^2}\, d\xi \quad \text{при } \tau \le t \le \tau + \tau_0, \tag{15}$$

где $\tau_0 = d/\upsilon$ – время установления стационарного режима.

По известной переходной характеристике (15) вычислим реакцию АОЛЗ с прямым детектированием $u_{out}(t)$ на произвольное входное воздействие $u_{in}(t)$, используя интеграл Дюамеля:

$$u_{\text{out}}(t) = u_{\text{in}}(0) g(t) + \int_0^{\infty} \frac{du_{\text{in}}(\gamma)}{d\gamma} g(t-\gamma) d\gamma, \tag{16}$$

где γ – переменное интегрирование.

Численный анализ 1. Моделирование переходной характеристики АОЛЗ с типичными для практики параметрами $\upsilon = 3630$ м/с, $\tau = 0,6$ мкс проведено в среде Mathcad по формуле (15) для двух значений диаметра светового пучка – $d = 1,6$ и $2,2$ мм. Расчетный график переходной характеристики АОЛЗ с заданными параметрами приведен на рис.3,*а*.

По формуле (15) вычислим время нарастания переходной характеристики $\tau_{\text{н}}$ как время, в течение которого функция $g(t)$ изменяется от 0,1 до 0,9 своего максимального значения, т.е. до 1. При $d = 1,6$ и $2,2$ мм время нарастания $\tau_{\text{н}} = 0,303$ и $0,419$ мкс соответственно (см. рис.3,*а*).

Импульсная характеристика АОЛЗ. Во избежание сложных математических преобразований импульсную характеристику $h(t)$ рассматриваемой АОЛЗ находим по ее известной переходной характеристике $g(t)$:

$$h(t) = \frac{dg(t)}{dt}. \tag{17}$$

Подставив (15) в (17), получим импульсную характеристику $h(t)$ АОЛЗ с прямым детектированием:

$$h(t) = \frac{8}{\pi \tau_0^2} \sqrt{\tau_0(t-\tau) - (t-\tau)^2} \quad \text{при } \tau \le t \le \tau + d/\upsilon. \tag{18}$$

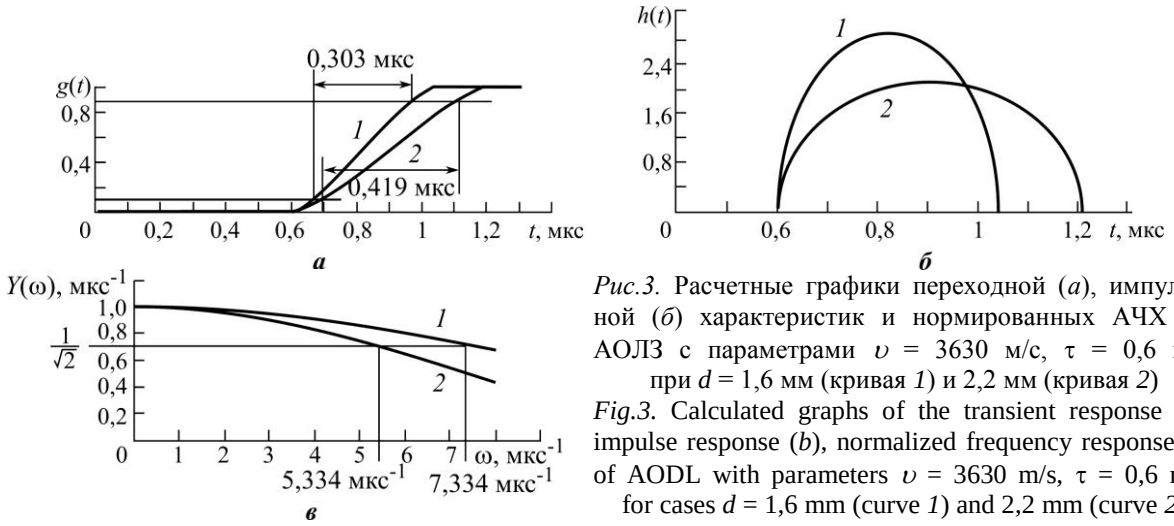


Рис.3. Расчетные графики переходной (*а*), импульсной (*б*) характеристик и нормированных АЧХ (*в*) АОЛЗ с параметрами υ = 3630 м/с, τ = 0,6 мкс при d = 1,6 мм (кривая *1*) и 2,2 мм (кривая *2*)

Fig.3. Calculated graphs of the transient response (*a*), impulse response (*b*), normalized frequency response (*c*) of AODL with parameters υ = 3630 m/s, τ = 0,6 mks for cases d = 1,6 mm (curve *1*) and 2,2 mm (curve *2*)

Реакцию АОЛЗ с прямым детектированием $u_{out}(t)$ на произвольное входное воздействие $u_{in}(t)$ вычислим по известной импульсной характеристике (18), используя другую форму интеграла Дюамеля:

$$u_{out}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{in}(\gamma)\, h(t-\gamma) d\gamma\,. \qquad (19)$$

Численный анализ 2. Моделирование импульсной характеристики АОЛЗ с типичными для практики параметрами $\upsilon = 3630$ м/с, $\tau = 0,6$ мкс проведено в среде Mathcad по формуле (18) для двух значений диаметра светового пучка – $d = 1,6$ и $2,2$ мм. Расчетный график импульсной характеристики АОЛЗ с заданными параметрами представлен на рис.3,*б*. Как и ожидалось, пиковые значения графиков соответствуют моменту времени $t = \tau + 0,5\,d/\upsilon$. В случае $d = 1,6$ мм оно составляет $0,6 + 0,5 \cdot 1,6 / 3,63 = 0,8205$ мкс, а в случае $d = 2,2$ мм равно $0,6 + 0,5 \cdot 2,2 / 3,63 = 0,903$ мкс. Именно в эти моменты установление стационарного режима протекает с наибольшей скоростью, что видно из графика переходной характеристики (см. рис.3,*а*). Длительность импульсной характеристики равна d/υ. При $d = 1,6$ мм она равна $0,441$ мкс, при $d = 2,2$ мм – $0,606$ мкс.

Амплитудно-частотная характеристика АОЛЗ. В соответствии с исходным определением частотный коэффициент передачи $K(j\omega)$ связан с импульсной характеристикой $h(t)$ прямым преобразованием Фурье:

$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt\,. \qquad (20)$$

Частотный коэффициент передачи может быть представлен в показательной форме:

$$K(j\omega) = K(\omega) \exp\left[j\varphi_k(\omega) \right],$$

где $K(\omega)$ и $\varphi_k(\omega)$ – модуль и аргумент частотного коэффициента передачи, которые называются соответственно амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками.

С учетом граничных условий определения импульсной характеристики и в соответствии с формулой (20) частотный коэффициент передачи АОЛЗ представим в следующем виде:

$$K(j\omega) = \int_{\tau}^{\tau+\tau_0} h(t)e^{-j\omega t}dt\,. \tag{21}$$

Поставив (18) в (21), получим

$$K(j\omega) = \frac{8}{\pi\tau_0^2}\int_{\tau}^{\tau+\tau_0} \sqrt{\tau_0(t-\tau)-(t-\tau)^2}\,e^{-j\omega t}dt\,. \tag{22}$$

Вводя новую переменную $\xi = t-\tau$, перепишем соотношение (22):

$$K(j\omega) = e^{-j\omega\tau}\frac{8}{\pi\tau_0^2}\int_{0}^{\tau_0} \sqrt{\tau_0\xi-\xi^2}\cdot e^{-j\omega\xi}d\xi\,. \tag{23}$$

Учитывая, что $\exp(-j\omega\xi) = \cos(\omega\xi) - j\sin(\omega\xi)$, перепишем формулу (23) следующим образом:

$$K(j\omega) = e^{-j\omega\tau}\frac{8}{\pi\tau_0^2}\left[\int_{0}^{\tau_0} \sqrt{\tau_0\xi-\xi^2}\cdot\cos(\omega\xi)d\xi - j\int_{0}^{\tau_0} \sqrt{\tau_0\xi-\xi^2}\cdot\sin(\omega\xi)d\xi\right]. \tag{24}$$

Отметим, что, используя выражение (24) для частотного коэффициента передачи $K(j\omega)$, можно вычислить спектр сигнала на выходе фильтра $U_{out}(j\omega)$ по известной спектральной характеристике входного воздействия $U_{in}(j\omega)$:

$$U_{out}(j\omega) = K(j\omega)U_{in}(j\omega)\,.$$

Фазовый множитель $\exp(-j\omega\tau)$ в формуле (24) определяет величину задержки выходного сигнала по отношению к входному на время τ, которое обусловлено временем пробега упругого волнового пакета от ЭАП до точки акустооптического взаимодействия. Этот множитель является постоянной величиной для выбранной конструкции АОЛЗ с прямым детектированием и не влияет на форму ее АЧХ. Поэтому модуль частотного коэффициента передачи $K(\omega)$ определим следующим образом:

$$K(\omega) = c\sqrt{\left[\int_{0}^{\tau_0} \sqrt{\tau_0\xi-\xi^2}\cdot\cos(\omega\xi)d\xi\right]^2 + \left[\int_{0}^{\tau_0} \sqrt{\tau_0\xi-\xi^2}\cdot\sin(\omega\xi)d\xi\right]^2}\,, \tag{25}$$

где $c = 8\Big/\left(\pi\tau_0^2\right)$ – постоянный множитель для выбранной конструкции АОЛЗ с прямым детектированием.

Максимальное значение модуля частотного коэффициента передачи АОЛЗ обеспечивается на нулевой частоте. Подставляя $\omega = 0$ в формулу (25), находим

$$K(0) = c\int_{0}^{\tau_0} \sqrt{\tau_0\xi-\xi^2}\,d\xi\,. \tag{26}$$

В контексте решаемой задачи наибольший интерес представляет относительное значение частотного коэффициента передачи. Поэтому на основе уравнений (25) и (26) запишем формулу для нормированной АЧХ АОЛЗ с прямым детектированием:

$$Y(\omega)=\frac{K(\omega)}{K(0)}=\frac{\sqrt{\left[\int\limits_0^{\tau_0}\sqrt{\tau_0\xi-\xi^2}\cdot\cos(\omega\xi)d\xi\right]^2+\left[\int\limits_0^{\tau_0}\sqrt{\tau_0\xi-\xi^2}\cdot\sin(\omega\xi)d\xi\right]^2}}{\int\limits_0^{\tau_0}\sqrt{\tau_0\xi-\xi^2}d\xi}. \qquad (27)$$

Численный анализ 3. Моделирование АЧХ АОЛЗ с типичными для практики параметрами $\upsilon=3630$ м/с, $\tau=0,6$ мкс при $d=1,6$ и $2,2$ мм проведено по формуле (27) в среде Mathcad. Расчетный график нормированных частотных характеристик АОЛЗ с заданными параметрами показан на рис.3,*в*.

Частоту среза АЧХ АОЛЗ вычислим по формуле (27). При $d=1,6$ и $2,2$ мм $\omega_{ср}=7,334$ и $5,334$ мкс$^{-1}$ соответственно (см. рис.3,*в*).

Эксперимент. Математические модели характеристик АОЛЗ апробированы экспериментально на макете АОЛЗ с прямым детектированием (рис.4). АОМ выполнен на стеклообразном фотоупругом материале ТФ-7, для которого $\upsilon=3630$ м/с. Сформированный в генераторе импульсов Г5-54 прямоугольный импульс с заданными параметрами модулирует колебание высокочастотного генератора Г4-107 (работает в режиме внешней импульсной модуляции) и синхронизирует осциллограф MSO 4052. Частоту колебания генератора Г4-107 выбирают равной центральной частоте АОМ, что в экспериментах составляет 80 МГц.

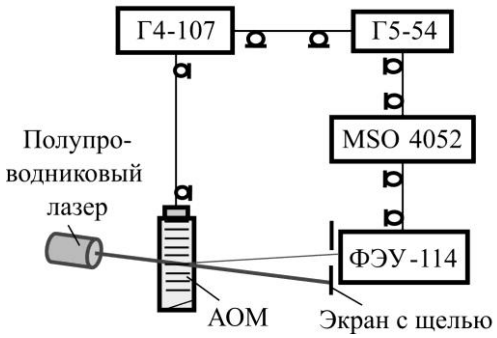
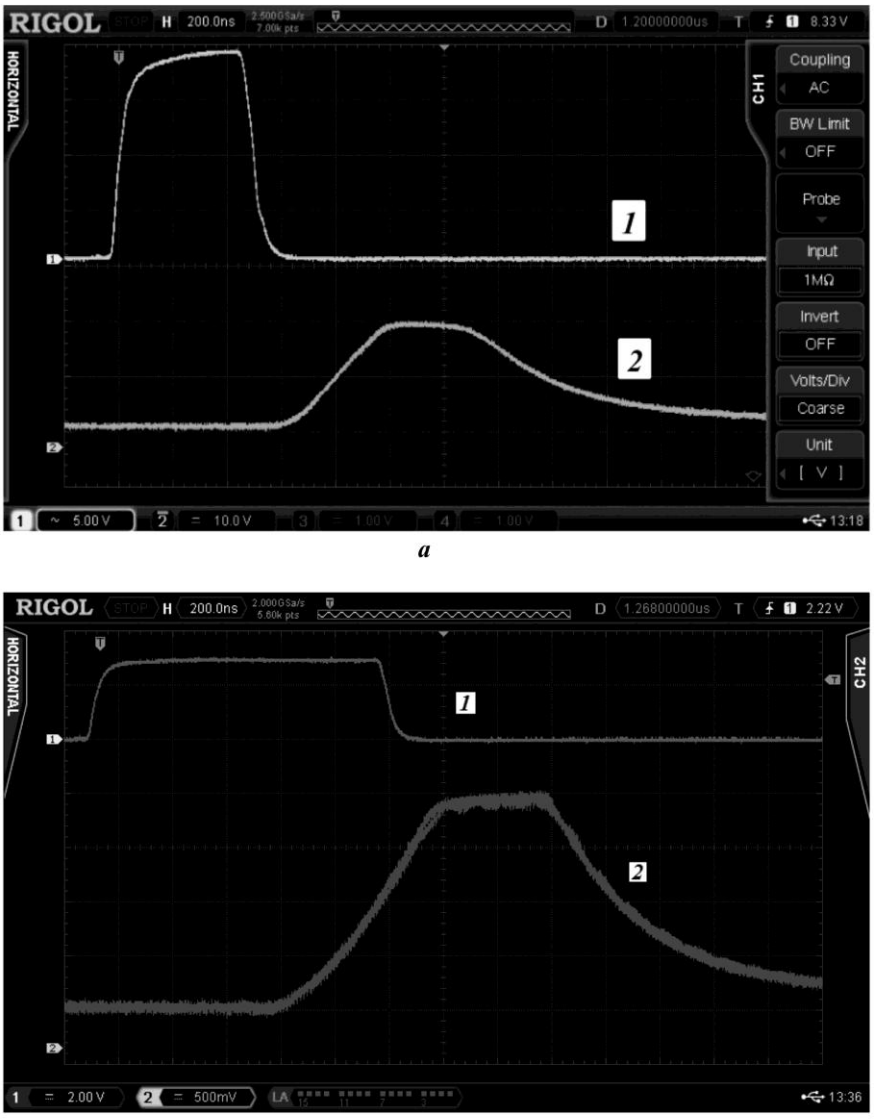


Рис.4. Схема экспериментальной установки
Fig.4. Layout scheme for experimental research

Осциллограммы напряжений на входе и на выходе АОЛЗ с прямым детектированием приведены на рис.5. На рис.5,*а* проиллюстрирован случай, когда на вход АОЛЗ с параметрами $\upsilon=3630$ м/с, $d=1,6$ мм, $\tau=0,6$ мкс подается импульс (кривая *1*) с длительностью $\tau_i=0,5$ мкс (определяется по осциллограмме на уровне 0,5 от максимального значения). В этом случае время нарастания, т.е. время, в течение которого отклик – напряжение на выходе (кривая *2*) – изменяется от 0,1 до 0,9 своего максимального значения, равно примерно $0,303$ мкс, что полностью совпадает с временем нарастания приведенной на рис.3,*а* переходной характеристики для случая *d* = 1,6 мм. На рис.5,*б* проиллюстрирован случай, когда на вход АОЛЗ с параметрами $\upsilon=3630$ м/с, $d=2,2$ мм, $\tau=0,7$ мкс подается импульс (кривая *1*) с длительностью $\tau_i=1,05$ мкс (определяется по осциллограмме на уровне 0,5 от максимального значения). В этом случае время нарастания, т.е. время, в течение которого отклик – напряжение на выходе (кривая *2*) – изменяется от 0,1 до 0,9 своего максимального значения, равно примерно $0,419$ мкс,



а

б

Рис.5. Осциллограммы импульсов на входе (кривая *1*) и на выходе (кривая *2*) АОЛЗ с прямым детектированием при υ = 3630 м/с: *а* – *d* = 1,6 мм, τ = 0,6 мкс; *б* – *d* = 2,2 мм, τ = 0,7 мкс

Fig.5. Oscillograms of pulses at the input (curve *1*) and output (curve *2*) of AODL with parameters υ = 3630 m/s: *a* – *d* = 1,6 mm, τ = 0,6 mks; *b* – *d* = 2,2 mm, τ = 0,7 mks

что полностью совпадает с временем нарастания приведенной на рис.3,*а* переходной характеристики для случая *d* = 2,2 мм.

Для исследования АЧХ АОЛЗ с прямым детектированием в макете, выполненном по схеме, представленной на рис.4, генератор импульсов Г5-54 заменяется на высокочастотный генератор сигналов Г4-102, а генератор Г4-107 переводится в режим внешней амплитудной модуляции. Выходное напряжение генератора Г4-102 модулирует по амплитуде высокочастотное колебание генератора Г4-107.

Осциллограммы напряжений на входе (рис.6, кривая *1*) и на выходе (кривая *2*) подтверждают неискаженную обработку гармонического колебания с частотой 700 кГц в АОЛЗ с прямым детектированием.

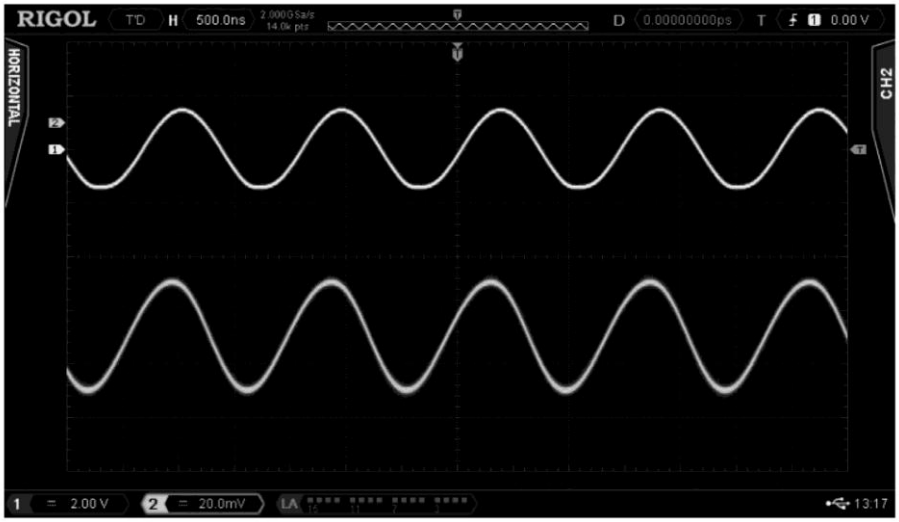


Рис.6. Осциллограммы гармонического колебания с частотой 700 кГц на входе (кривая *1*) и на выходе (кривая *2*) АОЛЗ с прямым детектированием
Fig.6. Oscillograms of harmonic oscillations with a frequency of 700 kHz at the input (curve *1*) and output (curve *2*) of AODL with direct detection

Экспериментально снятый нормированный график АЧХ АОЛЗ с прямым детектированием представлен на рис.7. Из графика частоту среза АЧХ находим как $F_{ср1} = 1160$ кГц для случая $d = 1{,}6$ мм и $F_{ср2} = 835$ кГц для случая $d = 2{,}2$ мм, что полностью соответствует расчетным значениям этого параметра (см. рис.3,*в*).

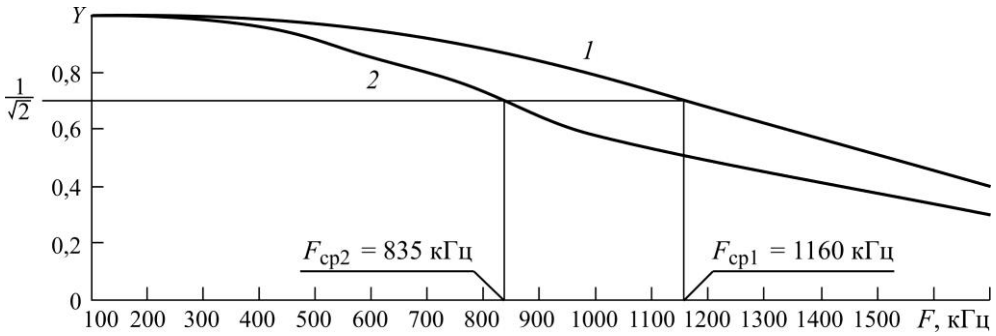


Рис.7. Экспериментально снятый нормированный график АЧХ АОЛЗ с прямым детектированием при υ = 3630 м/с, *d* = 1,6 мм (кривая *1*) и *d* = 2,2 мм (кривая *2*)
Fig.7. Experimentally taken normalized graphs of the AFC of the AODL with direct detection with parameters υ = 3630 m/s, *d* = 1,6 mm (curve *1*) and *d* = 2,2 mm (curve *2*)

Статическая оценка адекватности математических моделей характеристик АОЛЗ. Общие положения сформулируем на основе результатов анализа характеристик конкретного типа АОЛЗ с параметрами $\upsilon = 3630$ м/с, $\tau = 0{,}6$ мкс для двух значений диаметра лазерного пучка ($d = 1{,}6$ и $2{,}2$ мм).

При сравнении графиков переходной и импульсной характеристик (см. рис.3,*а*,*б*) установлено, что длительность переходного процесса равна длительности импульсной характеристики и составляет d/υ. Согласно графику переходных характеристик скорость переходного процесса максимальна в моменты времени $t = \tau + 0{,}5d/\upsilon$, что сов-

падает с моментами формирования пиковых значений графиков импульсной характеристики.

По известным значениям времени нарастания $\tau_н$ переходных характеристик АОЛЗ вычислим ее частоты среза:

$$\omega_{ср} = \ln(9)/\tau_н = \ln(9)/0,303 = 7,258 \text{ мкс}^{-1} \quad \text{для } d = 1,6 \text{ мм};$$

$$\omega_{ср} = \ln(9)/\tau_н = \ln(9)/0,419 = 5,244 \text{ мкс}^{-1} \quad \text{для } d = 2,2 \text{ мм}.$$

Полученные значения с точностью расчетов в среде Mathcad совпадают с результатами численного анализа 3 и экспериментальной апробации (см. рис.7).

Таким образом, сравнительная оценка параметров характеристик АОЛЗ доказала их полную статическую адекватность.

Динамическая оценка адекватности математических моделей характеристик АОЛЗ. Оценка проводится путем вычисления отклика АОЛЗ на конкретное входное воздействие с помощью переходной и импульсной характеристик. Для простоты принимаем, что на вход АОЛЗ подается единичный скачок, т.е. $u_{in}(t) = \sigma(t)$. Выходное напряжение $u_{out\,1}(t)$ вычислим на основе переходной характеристики с помощью интеграла Дюамеля (16). При этом верхний предел интеграла заменим на текущее время t и учтем, что $u_{in}(0) = 0$. Следовательно,

$$u_{out\,1}(t) = \int_0^t \frac{d\sigma(\gamma)}{d\gamma} g(t-\gamma)d\gamma \,.$$

Принимая во внимание, что $\frac{d\sigma(\gamma)}{d\gamma} = \delta(\gamma)$, и используя фильтрующее свойство дельта функции $\delta(\gamma)$, получаем $u_{out\,1}(t) = g(t)$. Другими словами, реакция линейной стационарной системы на единичный скачок есть ее переходная характеристика, что соответствует исходному определению. Соответственно, график выходного напряжения АОЛЗ $u_{out\,1}(t)$ при входном сигнале в виде единичного скачка не отличается от графика переходной характеристики (см. рис.3,*а*). Далее выходное напряжение $u_{out\,2}(t)$ вычислим на основе импульсной характеристики с помощью интеграла Дюамеля (19). При этом учтем, что в зависимости от соотношения текущего времени и длительности импульсной характеристики выходной сигнал имеет различные формы:

- в случае $\tau \le t \le d/\upsilon$

$$u_{out\,21}(t) = \int_\tau^t \sigma(\gamma)\, h(t-\gamma)d\gamma \,;$$

- в случае $\tau + d/\upsilon < t$

$$u_{out\,22}(t) = \int_\tau^{\tau+d/\upsilon} \sigma(\gamma)\, h(t-\gamma)d\gamma \,.$$

Таким образом,

$$u_{out\,2}(t) = u_{out\,21}(t)\left[\sigma(t-\tau) - \sigma(t-\tau-d/\upsilon)\right] + u_{out\,22}(t)\sigma(t-\tau-d/\upsilon) \,.$$

Вычисленный и построенный по последней формуле график выходного напряжения АОЛЗ при d = 1,6 и 2,2 мм приведен на рис.8.

Идентичность графиков на рис.3,*а* и 8 свидетельствует о динамической адекватности вычислений как по переходной, так и по импульсной характеристикам.

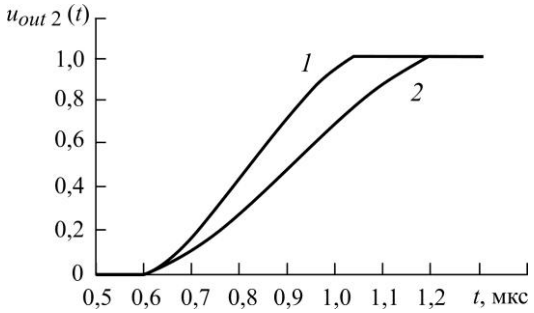


Рис.8. Вычисленный и построенный на основе импульсной характеристики график реакции АОЛЗ на входное воздействие в виде единичного скачка напряжения при d = 1,6 мм (кривая *1*) и d = 2,2 мм (кривая *2*)

Fig.8. The calculated and built on the basis of the impulse response graphs of the AODL response to the input action in the form of a single voltage surge for cases d = 1,6 mm (curve *1*) and d = 2,2 mm (curve *2*)

Заключение. При слабом фотоупругом взаимодействии АОЛЗ можно рассматривать как линейную стационарную систему. Один из основных параметров такой системы – ее полоса пропускания, которая ограничивается сверху частотой среза. По известной частоте среза вычислено время нарастания реакции АОЛЗ на импульсный сигнал. Таким же образом по известному времени нарастания отклика АОЛЗ на импульсный сигнал определена частота ее среза. Последний вариант представляет наибольший интерес при наладке АОЛЗ и выборе диаметра лазерного пучка.

Составленные математические модели переходной, импульсной и амплитудно-частотной характеристик позволяют исследовать взаимосвязь данных параметров АОЛЗ. Численный анализ и экспериментальные исследования доказали адекватность использования предлагаемых математических моделей характеристик АОЛЗ. Следует отметить, что математические модели работают только в полосе пропускания АОЛЗ. Следовательно, при обработке импульсного сигнала длительность импульса должна быть больше времени пересечения оптического пучка упругим волновым пакетом. Однако доказано, что АОЛЗ, помимо основного функционального назначения, также может быть использована для решения других радиотехнических задач на частотах, превышающих частоту среза [11, 12].

Литература

1. ***Okon-Fafara M., Kawalec A.M., Witczak A.*** Radar air picture simulator for military radars // Proceedings of SPIE. Vol. 11055: XII Conference on Reconnaissance and Electronic Warfare Systems. Oltarzew: SPIE, 2019. Art. No. 1105519. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2525032

2. ***Diewald A.R., Steins M., Müller S.*** Radar target simulator with complex-valued delay line modeling based on standard radar components // Advances in Radio Science. 2018. Vol. 16. P. 203–213. DOI: https://doi.org/10.5194/ars-16-203-2018

3. ***Pavan S., Klumperink E.*** Analysis of the effect of source capacitance and inductance on *N*-path mixers and filters // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2018. Vol. 65. No. 5. P. 1469–1480. DOI: https://doi.org/10.1109/TCSI.2017.2754342

4. ***Shakin O.V., Nefedov V.G., Churkin P.A.*** Application of acoustooptics in electronic devices // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg: IEEE, 2018. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604351

5. ***Yushkov K.B., Molchanov V.Ya., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V.*** Acousto-optic replication of ultrashort laser pulses // Physical Review A. 2017. Vol. 96. Iss. 4. Art. No. 043866. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.043866

6. Rapid-scan acousto-optical delay line with 34 kHz scan rate and 15 as precision / ***O. Schubert, M. Eisele, V. Crozatier et al.*** // Optics Letters. 2013. Vol. 38. Iss. 15. P. 2907–2910. DOI: https://doi.org/10.1364/OL.38.002907

7. In-line femtosecond common-path interferometer in reflection mode / ***J. Chandezon, J.-M. Rampnoux, S. Dilhaire et al.*** // Optics Express. 2015. Vol. 23. Iss. 21. P. 27011–27019. DOI: https://doi.org/10.1364/OE.23.027011

8. ***Гасанов А.Р., Гасанов Р.А.*** Акустооптические линии задержки низкочастотных и высокочастотных электрических сигналов // Специальная техника. 2013. № 1. С. 11–21.

9. ***Гасанов Р.А.*** Некоторые особенности расчета выходного отклика акустооптической линии задержки с прямым детектированием // Специальная техника. 2014. № 5. С. 28–39.

10. ***Lee J.N., Vanderugt A.*** Acoustooptic signal processing and computing // Proceedings of IEEE. 1989. Vol. 77. No. 10. P. 1528–1557. DOI: https://doi.org/10.1109/5.40667

11. ***Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Ахмедов Р.А., Агаев Э.А.*** Временные и частотные характеристики акустооптической линии задержки с прямым детектированием // Измерительная техника. 2019. № 9. С. 46–52. DOI: https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-9-46-52

12. ***Ахмедов Р.А., Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Гусейнов А.Г.*** Переходная характеристика акустооптической линии задержки и ее применения // Физические основы приборостроения. 2020. Т. 9. № 1 (35). С. 71–78. DOI: https://doi.org/10.25210/jfop-2001-071078

Поступила в редакцию 09.03.2021 г.; после доработки 12.05.2021 г.; принята к публикации 08.07.2021 г.

Гасанов Афиг Рашид оглы – доктор технических наук, профессор Национальной академии авиации Азербайджана (Азербайджан, AZ-1045, г. Баку, Бина, 25-й км), hasanov@naa.edu.az

Гасанов Руслан Афиг оглы – доктор технических наук, доцент Национальной академии авиации Азербайджана (Азербайджан, AZ-1045, г. Баку, Бина, 25-й км), ruslan-icq@mail.ru

Ахмедов Ровшан Аррахман оглы – докторант Национальной академии авиации Азербайджана (Азербайджан, AZ-1045, г. Баку, Бина, 25-й км), rovshan.ahmadov96@list.ru

Садыхов Масуд Вугар оглы – докторант Национальной академии авиации Азербайджана (Азербайджан, AZ-1045, г. Баку, Бина, 25-й км), sadiqovm.1999@gmail.com

References

1. Okon-Fafara M., Kawalec A.M., Witczak A. Radar air picture simulator for military radars. *Proc. SPIE 11055, XII Conference on Reconnaissance and Electronic Warfare Systems*. Oltarzew, SPIE, 2019, art. no. 1105519. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2525032

2. Diewald A.R., Steins M., Müller S. Radar target simulator with complex-valued delay line modeling based on standard radar components. *Advances in Radio Science*, 2018, vol. 16, pp. 203–213. DOI: https://doi.org/10.5194/ars-16-203-2018

3. Pavan S., Klumperink E. Analysis of the effect of source capacitance and inductance on *N*-path mixers and filters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2018, vol. 65, no. 5, pp. 1469–1480. DOI: https://doi.org/10.1109/TCSI.2017.2754342

4. Shakin O.V., Nefedov V.G., Churkin P.A. Application of acoustooptics in electronic devices. *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. St. Petersburg, IEEE, 2018, pp. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604351

5. Yushkov K.B., Molchanov V.Ya., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V. Acousto-optic replication of ultrashort laser pulses. *Physical Review A*, 2017, vol. 96, iss. 4, art. no. 043866. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.043866

6. Schubert O., Eisele M., Crozatier V., Forget N., Kaplan D., Huber R. Rapid-scan acousto-optical delay line with 34 kHz scan rate and 15 as precision. *Optics Letters*, 2013, vol. 38, iss. 15, pp. 2907–2910. DOI: https://doi.org/10.1364/OL.38.002907

7. Chandezon J., Rampnoux J.-M., Dilhaire S., Audoin B., Guillet Y. In-line femtosecond common-path interferometer in reflection mode. *Optics Express*, 2015, vol. 23, iss. 21, pp. 27011–27019. DOI: https://doi.org/10.1364/OE.23.027011

8. Gasanov A.R., Gasanov R.A. Optoacoustic delay lines of low frequency and high frequency electrical signals. *Spetsial'naya tekhnika*, 2013, no. 1, pp. 11–21. (In Russian).

9. Gasanov R.A. Several points about calculation of response of direct detection acousto-optic delay line. *Spetsial'naya tekhnika*, 2014, no. 5, pp. 28–39. (In Russian).

10. Lee J.N., Vanderugt A. Acoustooptic signal processing and computing. *Proceedings of IEEE*, 1989, vol. 77, no. 10, pp. 1528–1577. DOI: https://doi.org/10.1109/5.40667

11. Gasanov A.R., Gasanov R.A., Ahmadov R.A., Agayev E.A. Time- and frequency-domain characteristics of direct-detection acousto-optic delay lines. *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, iss. 9, pp. 817–824. DOI: https://doi.org/10.1007/s11018-019-01700-3

12. Ahmadov R.A., Gasanov A.R., Gasanov R.A., Guseynov A.Q. Transient response of an acoustooptic delay line and its applications. *Fizicheskiye osnovy priborostroyeniya = Physical Bases of Instrumentation*, 2020, vol. 9, no. 1 (35), pp. 71–78. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.25210/jfop-2001-071078

Received 09.03.2021; Revised 12.05.2021; Accepted 08.07.2021.

Information about the authors:

Afig R. Gasanov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Academy of Aviation of Azerbaijan (Azerbaijan, AZ-1045, Baku, Bina, 25th km), hasanov@naa.edu.az

Ruslan A. Gasanov – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., National Academy of Aviation of Azerbaijan (Azerbaijan, AZ-1045, Baku, Bina, 25th km), ruslan-icq@mail.ru

Rovshan A. Ahmadov – Postdoctoral student, National Academy of Aviation of Azerbaijan (Azerbaijan, AZ-1045, Baku, Bina, 25th km), rovshan.ahmadov96@list.ru

Masud V. Sadikhov – Postdoctoral student, National Academy of Aviation of Azerbaijan (Azerbaijan, AZ-1045, Baku, Bina, 25th km), sadiqovm.1999@gmail.com

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

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

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
BRIEF REPORTS

УДК 681.518.3 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-426-431**

Тепловая модель сквозного металлизированного отверстия печатной платы при одностороннем нагреве

В.А. Сергеев[1,2], А.М. Ходаков[1], М.Ю. Сальников[2,3]

[1]Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия
[2]Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия
[3]Федеральный научно-производственный центр АО «Научно-производственное объединение «Марс», г. Ульяновск, Россия

sva@ulstu.ru

Тепловые методы контроля качества сквозного металлизированного отверстия (СМО) печатных плат (ПП) основаны на тепловых моделях. Однако известные тепловые модели СМО не учитывают отвода тепла в материал ПП и не позволяют связать тепловые характеристики СМО с качеством адгезии. В работе рассмотрена осесимметричная тепловая модель СМО однослойной ПП при одностороннем нагреве. Показано, что отношение приращений температуры верхнего (нагреваемого) и нижнего торца СМО в рассматриваемом диапазоне мощности нагрева не зависит от уровня мощности. Предложена линейная тепловая эквивалентная схема СМО с продольным тепловым сопротивлением металлизации СМО, определяемым параметрами и качеством слоя металлизации, тепловым сопротивлением, определяющим конвекционный теплообмен между торцами СМО с прилегающей поверхностью ПП и окружающей средой, и тепловым сопротивлением прилегающей к СМО области материала ПП, зависящим от качества адгезии металлизации и диэлектрика ПП. Параметры тепловой эквивалентной схемы, оцениваемые по отношению приращения температуры верхнего и нижнего торцов СМО и их разности, могут служить основой для разработки метода неразрушающего контроля качества СМО ПП путем его одностороннего нагрева, например, лазерным лучом.

Ключевые слова: печатная плата; сквозное металлизированное отверстие; адгезия металлизации; тепловая модель; тепловая схема

Для цитирования: Сергеев В.А., Ходаков А.М., Сальников М.Ю. Тепловая модель сквозного металлизированного отверстия печатной платы при одностороннем нагреве // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 426–431. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-426-431

© В.А. Сергеев, А.М. Ходаков, М.Ю. Сальников, 2021

Thermal Model of Printed Circuit Board Plated-Through Hole under One-Sided Heating Conditions

V.A. Sergeev[1,2], A.M. Khodakov[1], M.Yu. Salnikov[2,3]

[1]Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia
[2]Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
[3]Federal Research and Production Center of JSC «Scientific and Production Association «Mars», Ulyanovsk, Russia

sva@ulstu.ru

Abstract: Thermal methods of quality control of the plated-through hole (PTH) of printed circuit board (PCB) are based on thermal models. However, known thermal models of PTH take no account of heat transfer to PCB material thus not allowing for PTH heat characteristic tying up with adhesion quality. In this work, an axisymmetric thermal model of a single-layer PCB PTH under one-sided heating conditions is considered. It was shown that the ratio of the temperature increments of the upper (heated) and lower end of the PTH in the considered range of heating power does not depend on the power level. A linear thermal equivalent scheme of the PTH has been proposed, which includes the longitudinal thermal resistance of the PTH metallization, determined by the parameters and quality of the metallization layer, the thermal resistance, which determines the convection heat exchange between the ends of the PTH with the adjacent PCB surface and the environment, and the thermal resistance of the area of the PCB material adjacent to the PTH, depending on the quality of the metallization adhesion and the PCB dielectric. Thermal equivalent circuit parameters determined by the ratio of the temperature increment of the upper and lower ends of the PTH and their difference can serve as the basis for the development of a nondestructive inspection procedure for PTH quality control by way of its unilateral heating, for example, by a laser beam.

Keywords: printed circuit board; plated-through hole; metallization adhesion; thermal model; thermal circuit

For citation: Sergeev V.A., Khodakov A.M., Salnikov M.Yu. Thermal model of printed circuit board plated-through hole under one-sided heating conditions. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 426–431. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-426-431

Одна из проблем при производстве печатных плат (ПП) – диагностика скрытых дефектов сквозных металлизированных отверстий (СМО). Разрывы металлизации, неравномерная ее толщина, плохая адгезия металлизации СМО с материалом ПП, инородные включения и другое становятся причинами отказов печатных узлов при испытаниях и эксплуатации [1–4] и плохо выявляются неразрушающими электрическими методами [5]. Для неразрушающего выявления скрытых дефектов применяют методы рентгеновской и ультразвуковой томографии [6] или методы, основанные на измерении магнитного потока [7]. Однако соответствующее контрольное оборудование дорогое и сложное в эксплуатации, трудоемкость операции контроля не позволяет обеспечить сплошной контроль. Для контроля качества СМО ПП используют различные тепловые методы [8, 9]. Однако известные тепловые модели СМО [10] не учитывают отвода тепла в материал ПП и не позволяют связать тепловые характеристики СМО с качеством адгезии.

В настоящей работе рассматривается осесимметричная тепловая модель СМО с учетом теплоотвода в материал ПП. Геометрия СМО схематично показана на рис.1. Медный полый цилиндр металлизации СМО внутренним r_{in} и внешним r_{ex} радиусами плотно прилегает к материалу ПП. Влияние внутренних слоев металлизации в многослойных ПП на теплоотвод от

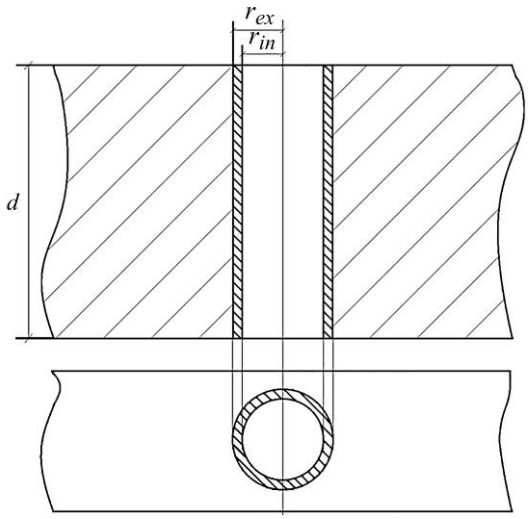


Рис.1. Геометрия СМО печатной платы
Fig.1. Printed circuit board plated-through hole geometry

СМО не рассматривается. Распределение температуры в СМО и ПП находится из решения уравнения теплопроводности:

$$\nabla_{r,z}\left(\lambda_i \nabla_{r,z} T_i(r,z)\right) = 0, \quad i = 1, 2,$$

где $\nabla_{r,z}$ – оператор набла в цилиндрической системе координат; λ_i – коэффициенты теплопроводности материалов структуры; $T_i = (T_{li} - T_0)$; T_{li}, T_0 – соответственно температура элементов структуры и окружающей среды.

В качестве граничного условия на верхнем торце СМО задается плотность теплового потока:

$$q = P_н / \pi\left(r_{ex}^2 - r_{in}^2\right),$$

где $P_н$ – мощность нагрева.

На всех остальных свободных поверхностях моделируемой структуры задается условие естественной конвекции с коэффициентом теплообмена α. На границе металлизации и материала ПП выполняются условия непрерывности температуры и теплового потока.

Задача решалась в среде COMSOL Multiphysics. Для расчетов выбрана ПП из текстолита толщиной d = 1,5 мм и СМО с r_{ex} = 0,2 мм и r_{in} = 0,19 мм, т.е. с толщиной медного слоя 10 мкм. Картина температурного поля (в разрезе плоскостью, проходящей через диаметр и ось СМО) при $P_н$ = 0,05 Вт приведена на рис.2.

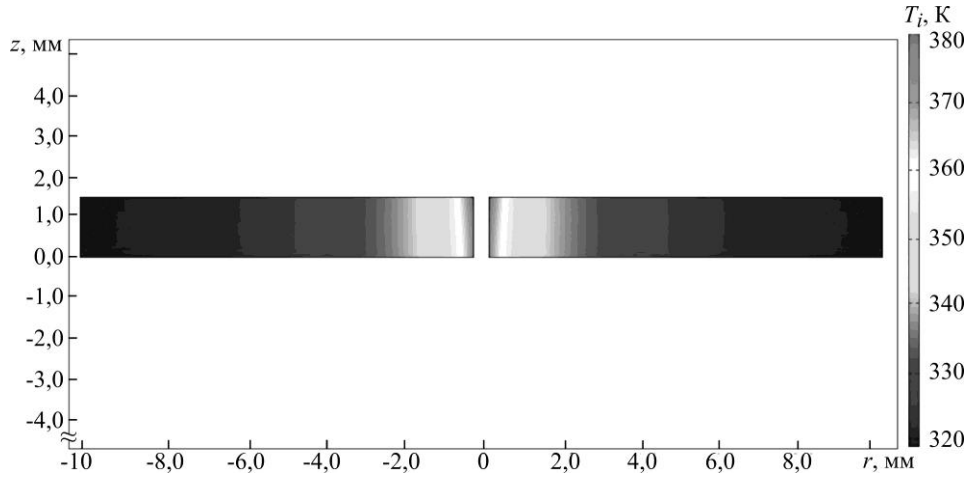


Рис.2. Температурное поле СМО и печатной платы в разрезе
Fig.2. Sectional view of the temperature field of the plated-through hole and the printed circuit board

Расчетные значения температуры верхнего $\Delta T_в$ и нижнего $\Delta T_н$ торцов СМО при трех значениях мощности нагрева и различных значениях коэффициента теплопроводности материала ПП (текстолита) $\lambda_т$ приведены в таблице. Видно, что приращения температур различаются незначительно, а отношение этих приращений практически не зависит от уровня мощности нагрева и определяется только теплопроводностью материала ПП. Это означает, что распределенную тепловую модель СМО можно заменить тепловой эквивалентной схемой [11] с тепловым сопротивлением между СМО и материалом платы, подключенным посередине СМО (рис.3).

Расчетные значения параметров распределенной тепловой модели и тепловой эквивалентной схемы СМО
Calculated values of the parameters of the distributed thermal model and the thermal equivalent circuit of the plated-through hole

$P_н$, Вт	$\lambda_т$, Вт/м·К	$\Delta T_в$, К	$\Delta T_н$, К	$\Delta T_в / \Delta T_н$	$R_{TP}^{мод}$, К/Вт	$R_{TP}^{расч}$, К/Вт
0,05	0,2	108,1	100,8	1,0724	4021	3997
	0,3	82,1	75,0	1,0947	2595	2663
	0,4	68,7	61,8	1,1117	2017	1998
0,075	0,2	162,8	151,9	1,0718	4084	3997
	0,3	123,1	112,5	1,0942	2613	2663
	0,4	103,6	93,1	1,1128	2012	1998
0,1	0,2	216,2	201,7	1,0719	4047	3997
	0,3	164,2	150,0	1,0947	2595	2663
	0,4	137,5	123,6	1,1125	2020	1998

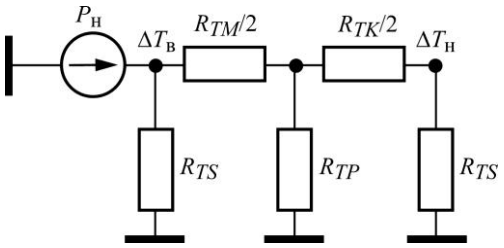


Рис.3. Тепловая эквивалентная схема СМО при его одностороннем нагреве
Fig.3. Equivalent thermal circuit of printed circuit board plated-through hole under one-sided heating conditions

В эквивалентной схеме на рис.3 тепловое сопротивление растекания торец СМО – окружающая среда (Thermal Spreading) R_{TS} обусловлено конвекционной теплоотдачей с торца СМО и с прилегающей к торцу нагретой поверхности ПП; продольное тепловое сопротивление медного цилиндра металлизации СМО (Thermal Metallization) R_{TM} рассчитывается по известной формуле [10] и для рассматриваемого СМО составляет 320 К/Вт; значение теплового сопротивления между металлизацией СМО и прилегающим материалом ПП (Thermal Plate) R_{TP} определяется отводом тепла через материал ПП и является диагностическим параметром, поскольку зависит от адгезии металлизации СМО к материалу ПП. Для оценки R_{TP} используется выражение для теплового сопротивления цилиндрической стенки из материала ПП [12] с эффективным радиусом $r_{эфф}$:

$$R_{TP}^{расч} = \frac{1}{2\lambda l}\ln\left(\frac{r_{эфф}}{r_{ex}}\right). \qquad (1)$$

Оценка путем экстраполяции зависимости $T(r)$ в материале ПП вблизи $r \approx r_{ex}$ показывает, что эффективный радиус прилегающей к СМО нагретой области материала ПП составляет примерно $11r_{ex}$ и при коэффициенте $\alpha_к$ конвекционной теплоотдачи в воздух, равном 6–7 Вт/(м^2·К), значение R_{TS}, определяемое по формуле $R_{TS} = 1/\alpha_к S_{эфф}$, составляет (2,0–2,4)·10^4 Вт/К, т.е. почти на два порядка превышает значение R_{TM}.

Из анализа тепловой эквивалентной схемы с учетом того, что $R_{TS} >> R_{TM}$, для R_{TP} можно получить следующее выражение:

$$R_{TP}^{мод} \approx \frac{R_{TM}(1+\xi)}{2(q-2\xi)}, \qquad (2)$$

где $q = (\Delta T_в/\Delta T_н) - 1$; $\xi = R_{TM}/R_{TS}$.

Значения R_{TP}, рассчитанные по формуле (1) при $r_{эфф}=11r_{ex}$ и по формуле (2), согласно результатам теплового моделирования СМО, приведены в таблице. Как видно из таблицы, различие не превышает 5 %.

Таким образом, по отношению приращения температуры верхнего и нижнего торцов СМО при его одностороннем нагреве можно оценить качество теплоотвода и адгезии металлизации

СМО с материалом ПП. Реальное значение теплового сопротивления R_{TM} СМО при известной мощности нагрева $P_{н}$ можно определить по приближенной формуле $R_{TM} \approx 2\left(\Delta T_{в} - \Delta T_{н}\right)/P_{н}$ либо путем сравнения разности температур верхнего и нижнего торцов СМО с разностью температур у образцового, заведомо качественного, СМО при нагреве одинаковой мощностью.

Предложенная модель может служить основой для разработки метода оценки качества СМО по результатам измерения температуры торцов СМО при его одностороннем нагреве, например, методом лазерной вспышки [13].

Литература

1. ***Bin Y., Hui C., Yudong L., Daojun L.*** Study of key failure modes of PTH in high density printed board and case study // 2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology. Chengdu: IEEE, 2014. P. 923–927. DOI: https://doi.org/10.1109/ICEPT.2014.6922798

2. ГОСТ Р 56251-2014. Платы печатные. Классификация дефектов. М.: Стандартинформ, 2014. 107 с.

3. ***Medvedev A.M.*** Printed-circuit board. Reliability of interconnections // Reliability: Theory & Applications. 2012. Vol. 7. No. 4 (27). P. 72–79.

4. A study on effects of copper wrap specifications on printed circuit board reliability / ***B. Sood, J. Shue, J. Leitner et al.*** // IEEE Transactions on Reliability. 2019. Vol. 68. No. 1. P. 248–266. DOI: https://doi.org/10.1109/TR.2018.2835140

5. ГОСТ Р 55744-2013. Платы печатные. Методы испытаний физических параметров. М.: Стандартинформ, 2014. II, 21 с.

6. ***Данилова Е.А.*** Обзор методов обнаружения опасных технологических дефектов в электронных платах // Надежность и качество: Тр. Междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский гос. ун-т, 2013. Т. 1. С. 331–335.

7. ***Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М., Плотникова Н.В.*** Контроль и диагностика печатных плат и микросхем посредством анализа их магнитных полей // Датчики и системы. 2008. № 1. С. 48–53.

8. Пат. 2159522 РФ. Способ контроля качества металлизации отверстий печатных плат / ***Ю.А. Плотников, М.Ю. Поляхов, Л.А. Чернов.*** Заявл. 23.07. 1999; опубл. 20.11.2000, Бюл. № 34.

9. On thermo-mechanical reliability of plated-through-hole (PTH) / ***F. Su, R. Mao, J. Xiong et al.*** // Microelectronics Reliability. 2012. Vol. 52. Iss. 6. P. 1189–1196. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.11.021

10. ***Винокуров А.*** Расчет печатных плат для светодиодов Cree серии XP и MX // Полупроводниковая светотехника. 2010. Т. 3. № 5. С. 16–20.

11. ***Сергеев В.А., Ходаков А.М.*** Нелинейный тепловые модели полупроводниковых приборов. Ульяновск: УлГПУ, 2012. 159 с.

12. Теплопередача через непроницаемые стенки. С. 4–5 // Корпоративный портал: [Электронный ресурс] / Томский политехнический университет. URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PNB/learning/Thermodynamics/Tab3/Lecture11.pdf (дата обращения: 07.06.2021).

13. ***Головин Д.Ю., Тюрин А.И., Самодуров А.А., Головин Ю.И.*** Определение температуропроводности материалов методом нестационарного точечного нагрева // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 1. С. 39–42. DOI: https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.01.48863.18052

Поступило в редакцию 19.04.2021 г.; после доработки 11.05.2021 г.; принято к публикации 08.07.2021 г.

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

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

Сальников Максим Юрьевич – инженер-конструктор Федерального научно-производственного центра АО «Научно-производственное объединение «Марс» (Россия, 432022, г. Ульяновск, ул. Солнечная, 20); аспирант базовой кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, 32), salnikov-1309@mail.ru

References

1. Bin Y., Hui C., Yudong L., Daojun L. Study of key failure modes of PTH in high density printed board and case study. *2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, Chengdu, IEEE, 2014, pp. 923–927. DOI: https://doi.org/10.1109/ICEPT.2014.6922798

2. GOST R 56251-2014. *Printed circuit boards. Classification of defects.* Moscow, Standartinform Publ., 2014. 107 p. (In Russian).

3. Medvedev A.M. Printed-circuit board. Reliability of interconnections. *Reliability: Theory & Applications*, 2012, vol. 7, no. 4 (27), pp. 72–79.

4. Sood B., Shue J., Leitner J., Daniluk K., Sindjui L.-N. A study on effects of copper wrap specifications on printed circuit board reliability. *IEEE Transactions on Reliability*, 2019, vol. 68, no. 1, pp. 248–266. DOI: https://doi.org/10.1109/TR.2018.2835140

5. GOST R 55744-2013. *Printed circuit boards. Physical parameters test methods.* Moscow, Standartinform Publ., 2014, ii, 21 p. (In Russian).

6. Danilova E.A. Review of methods for detecting dangerous technological defects in electronic boards. *Nadezhnost' i kachestvo = Reliability and Quality, Proceedings of International Symposium*, Penza, Penza State University, 2013, vol. 1, pp. 331–335. (In Russian).

7. Kasatkin S.I., Vasilieva N.P., Muraviov A.M., Plotnikova N.V. Inspection and diagnosis of circuit plates and microcircuits by analyzing their magnetic fields. *Datchiki & Systemi = Sensors & Systems*, 2008, no. 1, pp. 48–53. (In Russian).

8. Plotnikov Ju.A., Poljakhov M.Ju., Chernov L.A. *Method for monitoring the quality of metal coating of printed circuit board holes.* Patent 2159522 RF, publ. 20.11.2000, Bul. No. 34. (In Russian).

9. Su F., Mao R., Xiong J., Zhou K., Zhang Zh., Shao J., Xie C. On thermo-mechanical reliability of plated-through-hole (PTH). *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, no. 6, pp. 1189–1196. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.11.021

10. Vinokurov A. Calculation of printed circuit boards for Cree LEDs of the XP and MX series. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika = Semiconductor Lighting Engineering*, 2010, vol. 3, no. 5, pp. 16–20. (In Russian).

11. Sergeev V.A., Khodakov A.M. *Nonlinear thermal models of semiconductor devices.* Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2012. 159 p. (In Russian).

12. Heat transfer through impermeable walls, pp. 4–5. (In Russian). *Corporate Portal of Tomsk Polytechnic University.* Available at: https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PNB/learning/Thermodynamics/Tab3/Lecture11.pdf (accessed: 07.06.2021).

13. Golovin D.Yu., Tyurin A.I., Samodurov A.A., Golovin Yu.I. Determination of thermal diffusivity by nonstationary spot heating. *Tech. Phys. Lett.*, 2020, vol. 46, pp. 34–37. DOI: https://doi.org/10.1134/S106378502001006X

Received 19.04.2021; Revised 11.05.2021; Accepted 08.07.2021.

Information about the authors:

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

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

Maxim Yu. Salnikov – Design Engineer, Federal Research and Production Center of JSC «Scientific and Production Association «Mars» (Russia, 432022, Solnechnaya st., 20, Ulyanovsk), PhD student of the Radio Engineering, Opto-and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), salnikov-1309@mail.ru

УДК [546.26-162:546.26:548.3]:621:382 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-432-434

Энергия активизации атомов углерода в алмазе

С.А. Неустроев

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

doloto@list.ru

Активное состояние достигается при активизации атомов углерода с использованием плазмы в жестких энергетических условиях. Доля частиц с энергией, достаточной для активизации атомов углерода, составляет небольшой процент. В работе рассмотрен результат подвода энергии к атому углерода, находящемуся в инертном состоянии. Показано, что последующие возбуждения и рекомбинация переводят атомы углерода в активное состояние с образованием ковалентных связей с другими атомами кристалла. Выявлены состояния атомов углерода и его последующих переходов в активное состояние. В результате расчета получено значение энергии связи атомов углерода, равное 17,581079 эВ.

Ключевые слова: алмаз; энергия состояний атомов углерода; активизация атомов углерода в плазме

Для цитирования: Неустроев С.А. Энергия активизации атомов углерода в алмазе // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 5. С. 432–434. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-432-434

Carbon Atoms Activization Energy in Diamond

S.A. Neoustroev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

doloto@list.ru

Abstract: The active state of carbon atoms is achieved in plasma at rigid energetic conditions. Proportion of particles with enough energy to activate carbon atoms is small. This work considers the result of energy input to carbon atom, which was in inert state. It was shown that subsequent excitement and recombination activated carbon atoms. Active atoms formed covalent bonds with other atoms in crystal diamond. The states of carbon atoms and its subsequent transitions to the active state were revealed. The calculations have found that carbon atoms activization energy value is equal to 17,581079 eV.

Keywords: diamond; energy states of carbon atoms; carbon atoms activization in plasma

For citation: Neoustroev S.A. Carbon atoms activization energy in diamond. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 432–434. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-5-432-434

Алмаз является перспективным материалом для микроэлектроники, так как характеризуется высокой теплопроводностью и радиационной стойкостью. Сингония алмаза – регулярный набор атомов углерода, образующих между собой прочные ковалентные связи. Активное со-

© С.А. Неустроев, 2021

стояние атомов углерода достигается в жестких энергетических условиях. Известны энергетические переходы атома углерода в активное состояние (состояние активизации) с заданными параметрами с использованием плазмы, возникающей при «взрыве», импульсном разряде, разряде в газе пониженного давления. Энергетический спектр частиц плазмы широк – от долей до десятков электронвольт. Доля частиц с энергией, достаточной для активизации атомов углерода, составляет менее 0,01 %. Существуют сложности в синтезе алмаза в виде крупногабаритных кристаллов. Уменьшение затрат энергии, а также увеличение времени процесса активизации может решить проблему синтеза алмаза.

Цель настоящей работы – расчет энергии активизации атомов углерода и сопоставление ее с известными значениями.

Полная информация о состояниях атомов углерода пентакратной мультиплетности и изменении их энергии приведена на энергетической диаграмме Гротриана [1]. Однако энергия активизации атомов углерода на данной диаграмме в явном виде не представлена. Рассмотрим последовательность выявления активного состояния атомов углерода, участвующих в образовании ковалентных связей, в плазме с использованием структуры этана в качестве модели [2]. При этом подвод энергии к атомам углерода осуществляется с учетом первого правила Гунда [3].

В образовании связей участвуют все валентности атомов. Опишем энергетические переходы атома углерода в активное состояние с заданными параметрами (активизацию) с использованием энергетической диаграммы Гротриана. Исходное состояние атома с электронной конфигурацией орбитали $^5S^0_2$ и энергией 8,771 эВ характеризуется инертностью. Значения энергии переходов при активизации атомов углерода следующие:

Состояние	$^5S^0_2\ np$	$^3P^0_{0,1,2}\ ns$	$^3P^0_{0,1,2}\ nd$	Рекомбинация	$^3P^0_{0,1,2}\ ns$
Энергия, эВ	8,771	1,063	9,834	0,147	9,687

Подвод энергии 1,063 эВ к атому, находящемуся в состоянии $^5S^0_2\ np$, переводит его в состояние $^3P^0_{0,1,2}\ nd$ с энергией 9,834 эВ. Последующая рекомбинация этого состояния с затратой энергии 0,147 эВ переводит атом углерода в активное состояние $^3P^0_{0,1,2}\ ns$ с энергией 9,687 эВ. Реакция образования связи между двумя атомами углерода происходит с затратой энергии каждым из них, равной 1280,33 $см^{-1}$ и также 1658,12 $см^{-1}$, и достигает значения 9,135321545 эВ.

Образование связи между парой атомов сопровождается выделением энергии 1 эВ. Учет этого обстоятельства уменьшает расход энергии: 9,135321545 эВ – 0,5 эВ = 8,635321545 эВ. Сопоставим это значение энергии с половиной значения энергии связи, равной 8,790539501 эВ [4] (значение энергии связи атомов углерода составляет 17,581079 эВ). Разность Δ = 0,155217956 эВ, а относительное расхождение δ = 0,155217956 эВ / 8,790539501 эВ = 0,017657387, т.е. менее 1,8 %.

Можно отметить, что в работе [1] значения энергии состояний атомов углерода содержат три цифры после запятой, а остальные опускаются из-за малости. Запись состояния энергии атома углерода, равной 9,687 эВ, может быть дополнена значением энергии малости, которая равна $7{,}810486359 \cdot 10^{-4}$ эВ.

В результате проделанной работы выявлены состояния атома углерода и его энергетических переходов в активное состояние для синтеза алмаза.

Литература

1. ***Радциг А.А.*** Спектры атомов и молекул // Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 801.

2. ***Краснов К.С.*** Молекулы и химическая связь. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1984. 295 с.

3. ***Эткинс П.У.*** Кванты: Справочник концепций / пер. с англ. Е.Л. Ядровского; под ред. Е.Л. Розенберга. М.: Мир, 1977. 496 с.

4. ***Неустроев С.А.*** Этан как модель энергетического состояния атомов в кристалле кубического углерода // Изв. вузов. Электроника. 2016. Т. 21. № 1. С. 86–87.

Поступило в редакцию 26.02.2021 г.; после доработки 21.04. 2021 г.; принято к публикации 08.07.2021 г.

Неустроев Степан Архипович – доктор технических наук, профессор-консультант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), doloto@list.ru

References

1. Radzig A. Atomic optical spectra. *Handbook of Physical Quantities*, eds. I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhov. Boca Raton, FL, CRC Press, 1997, p. 801.

2. Krasnov K.S. *Molecules and chemical binding*. 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 295 p. (In Russian).

3. Atkins P.W. *Quanta: a handbook of concepts*. Oxford, Clarendon Press, 1974. 309 p.

4. Neoustroev S.A. Ethane as model of energetic state of atoms in cubic carbon crystal. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 86–87. (In Russian).

Received 26.02.2021; Revised 21.04.2021; Accepted 08.07.2021.

Information about the author:

Stepan A. Neoustroev – Dr. Sci. (Eng.), Consulting Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), doloto@list.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

Памяти Кубарева Юрия Васильевича



11.09.1936 – 06.10.2021

На 86-м году ушел из жизни выдающийся ученый в области физики плазмы, специалист, который впервые создал, реализовал и испытал работающий двигатель принципиально нового типа, вице-президент и действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, доктор физико-математических наук, профессор Юрий Васильевич Кубарев.

Ю.В. Кубарев родился в семье офицера ВВС, окончил школу в г. Ртищеве, поступил в 1954 г. в МФТИ, а в 1960 г. – в аспирантуру. Во время учебы в институте и аспирантуре работал по совместительству в НИИТП (в настоящее время АО ГНЦ «Центр Келдыша»), а с 1967 по 2016 г. – в разных должностях в РТУ МИРЭА (ранее МИРЭА, МГУПИ). Еще студентом МФТИ он изобрел, сконструировал и испытал новый тип многоцелевого ускорителя плазмы, названного в мировой литературе магнитоплазмодинамическим двигателем (МПДУ). На базе исследования процессов в МПДУ, будучи аспирантом МФТИ, сделал научное открытие: установил новый закон в физике плазмы. Работая в МИРЭА, Юрий Васильевич организовал и провел пять натурных экспериментов в верхних слоях атмосферы, ионосферы и магнитосферы в различных регионах Земли, подтвердивших основные положения открытия, которое получило положительную оценку академиков П.Л. Капицы, А.М. Прохорова, Б.Б. Кадомцева, Ю.В. Гуляева и др.

Фундаментальные труды и разработки Ю.В. Кубарева в области физики плазмы нашли широкое практическое применение в энергетике, космической технике, экспериментальной физике, радиоэлектронике, геофизике и новых технологиях. Юрий Васильевич предложил и обосновал многоцелевое использование МПДУ как электрореактивных двигателей, генераторов шумов и колебаний, плазменных антенн и волноводов, нейтрализаторов статических зарядов космических аппаратов, источников высоко-

скоростных заряженных и нейтральных частиц, технологических установок.

Ю.В. Кубарев опубликовал свыше 350 научных работ в отечественных и зарубежных изданиях, он автор и соавтор около 40 изобретений и патентов, большая часть которых сделана на положениях научного открытия. До последних дней Ю.В. Кубарев готовил к публикации книгу, посвященную созданию, исследованию и применению магнитоплазмодинамического двигателя.

Юрий Васильевич Кубарев был членом Международной ассоциации авторов научных открытий, членом правления Общества российско-китайской дружбы, членом редколлегии ряда научных журналов. С 1987 по 1995 г. Юрий Васильевич организовал и провел 9 научно-технических конференций в Крыму, с 2005 г. – 12 ежегодных международных научно-технических конференций в Абхазии «Информационные технологии в науке, технике и образовании».

Ю.В. Кубарев – лауреат Государственной премии СССР, ему присвоены почетные звания «Заслуженный изобретатель Российской Федерации», «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», «Заслуженный испытатель космической техники». Согласно Указу Президента РФ и по решению Президиума РАН Юрий Васильевич трижды удостоен государственной научной стипендии в номинации «Выдающийся ученый России», награжден более 100 медалями и почетными дипломами: Минобороны, Роскосмоса, Минвуза, АН СССР, Федерации космонавтики СССР, РФ и Украины, ВДНХ, Международной академии естественных наук, Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова и ряда других ведомств и организаций, высшим орденом Абхазии «Честь и слава», серебряной медалью Высшей школы Китая. Ю.В. Кубарев – почетный профессор Шанхайской аэрокосмической академии и Абхазского государственного университета.

Выражаем соболезнование родным и близким Юрия Васильевича.

Редколлегия

ЮБИЛЕИ

Неустроеву Степану Архиповичу – 95 лет



28 июля 2021 г. исполнилось 95 лет ученому в области плазмохимических процессов микроэлектроники, доктору технических наук, профессору Степану Архиповичу Неустроеву.

Свою трудовую деятельность С.А. Неустроев начал в 1942 г. на Урале, на заводе по производству боеприпасов, и проработал там до конца Великой Отечественной войны. Окончив Уральский политехнический институт, Степан Архипович работал в системе Министерства среднего машиностроения. Разработанные при его участии технологические процессы и аппараты были внедрены в производство. В 1963 г. С.А. Неустроев защитил кандидатскую диссертацию и продолжил свою трудовую деятельность в НИИ точного машиностроения в г. Зеленограде, а с 1969 г. – в МИЭТ.

По инициативе С.А. Неустроева в НИИ точного машиностроения впервые для разложения летучих элементоорганических соединений с целью получения твердых покрытий и химически активных частиц была применена плазма газового ВЧ-разряда. С.А. Неустроев разработал плазмохимические установки для осаждения пленок диэлектриков, травления фоторезистов, кремния и его соединений, металлов. В дальнейшем такими установками были оснащены предприятия электронной промышленности. На кафедре специальных материалов электроники МИЭТ С.А. Неустроев продолжил исследования плазмохимических процессов, а также принял участие во внедрении разработанных установок в операции герметизации и формирования многоуровневой разводки ИС, травления кремния для trench-изоляции, удаления фоторезиста и др. Итогом этой работы стала защита докторской диссертации в 1974 г.

За время работы в МИЭТ профессор С.А. Неустроев внес значительный вклад в постановку, совершенствование и развитие учебного процесса. Им были разработаны и прочитаны несколько курсов по технологии материалов электронной техники и плазмохимическим методам в микроэлектронике.

Степан Архипович с 1973 по 2008 г. занимал должность ученого секретаря Ученого совета МИЭТ, являлся членом двух диссертационных советов. С 2008 г. С.А. Неустроев продолжает научно-исследовательскую и педагогическую деятельность. В настоящее время он работает

в должности профессора-консультанта Института перспективных материалов и технологий МИЭТ.

С.А. Неустроев – автор 400 научных трудов, в том числе более 40 учебно-методических пособий, им получено 37 авторских свидетельств на изобретения и патентов. Под его руководством подготовлены 24 кандидата и 3 доктора наук, один из которых – академик РАН.

Трудовая деятельность С.А. Неустроева высоко оценена государством: он награжден медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», медалями за участие в конкурсе научных работ Минвуза СССР, знаком «Почетный работник высшего профессионального образования», имеет почетное звание «Заслуженный профессор МИЭТ».

Поздравляем Степана Архиповича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, благополучия и выражаем глубокую признательность за значительный вклад в развитие науки!

Редколлегия

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

Внимание! Введены новые требования к выполнению рисунков.

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

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

Основные рубрики:

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

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом ***в двух 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 двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: http://ivuz-e.ru/authors/

Статья должна быть подписана всеми авторами.

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

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

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

Аннотация:

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

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

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

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

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

Текст:

- печатается ***через два интервала*** с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

- абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

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

Иллюстрации:

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

2. **Использование MS Word не допускается.**

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

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

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

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

Библиографический список:

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

- нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

- русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

- оформляется отдельным файлом;

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru

ПОДПИСКА 2022

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

Периодичность журнала - 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

- **по каталогу** «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «УП Урал-Пресс». Подписной индекс 47570
- **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