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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS



Том 25
№ 5
сентябрь - октябрь

Vol. 25
No. 5
September - October

2020

МИЭТ 55 лет Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА

Институт биомедицинских систем

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

Институт перспективных материалов и технологий

Институт нано- и микросистемной техники

Институт системной и программной инженерии и информационных технологий

Институт лингвистического и педагогического образования

Военный учебный центр

Общеобразовательные кафедры 8

Выпускающие кафедры 7

Базовые кафедры 11

Научно-образовательные центры

НАУЧНАЯ СРЕДА

Институты и научно-исследовательские лаборатории

Центр НТИ «Сенсорика»

Лидирующий исследовательский центр «Доверенные сенсорные системы»

ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база»

ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов»

ЦКП по поверке и калибровке электронных приборов и оборудования

ИННОВАЦИОННАЯ СРЕДА

НПК «Технологический центр»

Зеленоградский нанотехнологический центр

Зеленоградский инновационно-технологический центр

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СРЕДА

Завод «Протон» МИЭТ»

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 25, № 5, 2020
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)
Коноплев Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
Кубарев Юрий Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., ООО «Центр плазменных и вакуумных технологий» (Москва, Россия)
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Максимов Иван Александрович – PhD, проф., Университет города Лунд (Швеция), ORCID: 0000-0003-1944-4878
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© "Известия вузов. Электроника", 2020
© МИЭТ, 2020

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

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

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

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

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

Подписано в печать 13.10.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 10,695 усл.печ.л., 10,664 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 11. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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

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

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

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

Является членом Cross Ref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге Агентства «Роспечать» – 47570

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

СОДЕРЖАНИЕ

Элементы интегральной электроники

Егоркин В.И., Беспалов В.А., Зайцев А.А., Земляков В.Е., Капаев В.В., Кухтяева О.Б. Нормально-закрытый транзистор с затвором *p*-типа на основе гетероструктур AlGaN/GaN..... 391

Гончаров И.Н., Козырев Е.Н., Тваури И.В. Моделирование процессов электронного усиления в каналах умножителей на пористых структурах оксида алюминия..... 402

Схемотехника и проектирование

Чочаев Р.Ж., Железников Д.А., Иванова Г.А., Гаврилов С.В., Эннс В.И. Модели и методы анализа структуры коммутационных ресурсов ПЛИС. Обзор..... 410

Иванов Е.А., Якунин А.Н. Импульсный DC/DC-преобразователь напряжения с уменьшенными массогабаритными параметрами..... 423

Микро- и наносистемная техника

Амеличев В.В., Резнев А.А., Сауров А.Н. Микросистемы с высоким коэффициентом преобразования слабого магнитного поля на основе магниторезистивных наноструктур..... 432

Йе Ко Ко Аунг, Симонов Б.М., Тимошенков С.П. Моделирование и исследование различных типов подвесов инерционной массы в чувствительных элементах микромеханических приборов..... 440

Интегральные радиоэлектронные устройства

Макшаков А.В., Штерн Ю.И., Волкова О.С., Васильченко К.А. Метод и аппаратно-программные средства для измерения с повышенной точностью высоты летательных аппаратов и спускаемых объектов..... 452

Информационно-коммуникационные технологии

Жилинский В.О., Печерица Д.С., Гагарина Л.Г. Анализ влияния эфемеридно-временной информации на точность решения навигационной задачи по сигналам системы ГЛОНАСС..... 465

К сведению авторов..... 475

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 25, No. 5, 2020
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., SMS «Optolink» (Moscow, Russia)
Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC «NIIME» (Moscow, Russia)
Yuri V. Kubarev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., LLC «Center for Plasma and Vacuum Technologies» (Moscow, Russia)
Vladimir A. Labunov – Acad. NAS of Belarus, Foreign member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Ivan A. Maksimov - PhD, Prof., Lund University (Sweden), ORCID: 0000-0003-1944-4878
Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJS Company «Sinopsis, Armenia» (Yerevan, Armenia), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© "Proceedings of Universities. Electronics", 2020
© MIET, 2020

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

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

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

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

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

Signed to print 13.10.2020. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 10,695. Number of copies 150. Order no. 11. Free price.
The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

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

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

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

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

Is the member of Cross Ref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue of Agency Rospechat – 47570

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

CONTENTS

Integrated electronics elements

Egorkin V.I., Bespalov V.A., Zaitsev A.A., Zemlyakov V.E., Kapaev V.V., Kukhtyaeva O.B. Normally-off *p*-Gate Transistor Based on AlGaN/GaN Heterostructure 391

Goncharov I.N., Kozyrev E.N., Tvauri I.V. Modeling of Electronic Amplification Processes in Channels of Multipliers on Porous Structures of Aluminum Oxide 402

Circuit engineering and design

Chochaev R.Zh., Zheleznikov D.A., Ivanova G.A., Gavrilov S.V., Enns V.I. FPGA Routing Architecture Estimation Models and Methods. Review 410

Ivanov E.A., Yakunin A.N. Pulse DC/DC Voltage Converter with Reduced Weight and Size Parameters 423

Micro- and nanosystem technology

Amelichev V.V., Reznev A.A., Saurov A.N. Microsystems with High Conversion Coefficient of a Weak Magnetic Field Based on Magnetoresistive Nanostructures 432

Ye Ko Ko Aung, Simonov B.M., Timoshenkov S.P. Modeling and Study of Various Types of Inertial Mass Suspensions in the Sensitive Elements of Micromechanical Devices 440

Integrated radioelectronic devices

Makshakov A.V., Shtern Yu.I., Volkova O.S., Vasilchenko K.A. Method and Hardware-Software for Measuring Altitude of Aircraft and Descent Facilities with Increased Accuracy 452

Information-communication technologies

Zhilinskiy V.O., Pecheritsa D.S., Gagarina L.G. Analysis of Influence of Ephemeris-Time Information on Accuracy of Solving a Navigation Problem by Signals of GLONASS System 465

Instructions for authors 475

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 621.382.323 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-391-401**

Нормально-закрытый транзистор с затвором *p*-типа на основе гетероструктур AlGaN/GaN

В.И. Егоркин, В.А. Беспалов, А.А. Зайцев, В.Е. Земляков, В.В. Капаев, О.Б. Кухтяева

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

egorkin@qdn.miee.ru

Традиционные AlGaN/GaN-транзисторы – приборы, работающие в режиме обеднения. Для большинства применений необходимо реализовывать *E*-режим работы, когда ток в канале не течет при нулевом напряжении на затворе. Возможность реализации работы транзистора в *E*-режиме открывает широкие перспективы для проектирования цифровых схем и силовых устройств. В работе рассмотрен новый способ формирования нормально-закрытых транзисторов, работающих в *E*-режиме, – использование *p*-GaN-слоя под затвором. В качестве метода формирования данного слоя выбрано плазмохимическое удаление *p*-GaN-слоя вне затвора. При этом возникают проблемы неоднородности травления по глубине и плохого контроля скорости травления. Разработана гетероструктура с дополнительным барьерным слоем AlN, который является стоп-слоем при травлении. Приведены результаты исследования влияния различных параметров гетероструктуры на концентрацию носителей в канале и, соответственно, на выходные характеристики транзистора, разработан технологический маршрут. По разработанному технологическому маршруту сформированы образцы нормально-закрытых транзисторов, максимальный ток стока которых в открытом состоянии составляет 350 мА/мм при напряжении на затворе 4 В, пробивное напряжение – около 550 В в закрытом состоянии при 0 В на затворе.

Ключевые слова: нитрид галлия; нормально-закрытый транзистор; *p*-затвор; TCAD-моделирование

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2019-068 от 26 ноября 2019 г.).

© В.И. Егоркин, В.А. Беспалов, А.А. Зайцев, В.Е. Земляков, В.В. Капаев, О.Б. Кухтяева, 2020

Для цитирования: Нормально-закрытый транзистор с затвором *p*-типа на основе гетероструктур AlGaN/GaN / В.И. Егоркин, В.А. Беспалов, А.А Зайцев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 391–401. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-391-401

Normally-off *p*-Gate Transistor Based on AlGaN/GaN Heterostructure

V.I. Egorkin, V.A. Bespalov, A.A. Zaitsev, V.E. Zemlyakov, V.V. Kapaev, O.B. Kukhtyaeva

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

egorkin@qdn.miee.ru

Abstract: The GaN based devices with respect to most parameters exceed the devices based on traditional semiconductor materials. The AlGaN-transistors are the devices, operating in the depletion mode. For most applications it is necessary to implement the operating mode *E*, when the current in the channel is closed at zero gate voltage. In this paper the novel method namely using the *p*-GaN layer under the gate has been considered. The plasma-chemical removal of *p*-GaN layer in the non-gated active region has been chosen as a formation method of this layer. In this case the challenges, namely the non-uniformity in the depth of etching and poor control of the etching rate, arise. To exclude these problems, the heterostructures with additional AlN barrier layer has been developed. The research results of the heterostructure parameters affecting the carrier concentration in the channel, and, respectively, the transistor output characteristics have been presented and the developed design process has been shown. According to it the normally-off transistors have been formed. The maximum drain current in the open state is 350 mA/mm at 4 V gate voltage and the breakdown voltage is about 550 V in closed state at 0 V gate voltage.

Keywords: gallium nitride (GaN); normally-off high electron mobility transistor (HEMPT); *p*-gate; TCAD simulation

Funding: this study has been supported by the Government of the Russian Federation (Agreement No. 075-11-2019-068 of November 26, 2019).

For citation: Egorkin V.I., Bespalov V.A., Zaitsev A.A., Zemlyakov V.E., Kapaev V.V., Kukhtyaeva O.B. Normally-off *p*-gate transistor based on AlGaN/GaN heterostructure. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 391–401. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-391-401

Введение. Гетероструктуры на основе GaN характеризуются уникальными электрофизическими свойствами [1], а приборы на его основе по многим параметрам превосходят приборы на основе традиционных полупроводниковых материалов. Широкая запрещенная зона обеспечивает высокие значения напряженности критического поля, что делает материал пригодным для изготовления высоковольтных устройств. Низкая собственная концентрация носителей в GaN является также следствием широкой запре-

щенной зоны. Эта характеристика позволяет увеличить максимальную температуру работы устройств, изготовленных из данного материала, и снизить токи утечки. Относительно высокие значения подвижности и концентрации носителей заряда в двумерном электронном газе (2DEG) обеспечивают большой ток насыщения структуры.

Классические GaN/AlGaN-транзисторы – это нормально-открытые приборы, работающие в режиме обеднения. Однако для более широкого применения в монолитных схемах и силовых приборах необходимо реализовать так называемый *E*-режим работы, или нормально-закрытое состояние транзисторов, когда ток не течет при нулевом напряжении на затворе. Возможность реализации *E*-режима открывает широкие перспективы для проектирования цифровых схем и устройств силовой электроники [2].

Важной характеристикой, определяющей тип прибора, является пороговое напряжение, которое зависит от параметров гетероструктуры. Для создания нормально-закрытого прибора необходимо обеспечить отсутствие носителей заряда в канале при нулевом напряжении на затворе. В основном это определяется конструкцией гетероструктуры [3, 4]. Параметры слоев, процентный состав, толщина слоев влияют на пороговое напряжение, следовательно, и на концентрацию носителей заряда в канале.

Существует несколько способов формирования GaN-транзисторов, работающих в режиме обогащения: утонение барьерного слоя в области под затвором [5]; обработка подзатворной области во фторсодержащей плазме [6]; формирование под затвором слоя *p*-типа проводимости (*p*-GaN, *p*-AlGaN или NiO_x) [7–9].

Наиболее перспективным методом формирования нормально-закрытого транзистора является создание слоя *p*-типа проводимости под затвором. В качестве *p*-слоя наносят либо NiO_x, который при определенной термической обработке принимает свойства полупроводника *p*-типа, либо эпитаксиально выращенный слой *p*-GaN или *p*-AlGaN. Слой *p*-типа увеличивает потенциал в канале, тем самым полностью истощая его. Данный метод обеспечивает точный контроль порогового напряжения и малые значения токов утечки в затвор. Недостаток данного метода заключается в том, что при прямом смещении происходит необратимая деградация *p*-слоя и транзистор неработоспособен [10].

Слой *p*-GaN или *p*-AlGaN под затвором можно получать различными способами: селективным выращиванием *p*-слоя через соответствующую маску; обработкой слоя *p*-GaN вне затворной области в водородной плазме, при которой атомы H плазмы и атомы Mg, которыми легирован *p*-слой, образуют нейтральные соединения H-Mg, в результате чего изменяются свойства слоя *p*-GaN; плазмохимическим удалением *p*-слоя в областях канала вне затвора [11].

Моделирование нормально-закрытого транзистора с *p*-GaN-затвором. При моделировании в качестве основы для нормально-закрытого HEMT-транзистора (гетероструктурного транзистора с высокой подвижностью) выбрана конструкция гетероструктуры, аналогичная конструкции, рассмотренной в [12]. Барьерный слой AlGaN ограничен двумя дополнительными барьерными слоями: снизу – спейсерным слоем AlN, сверху – стоп-слоем AlN. Спейсерный слой уменьшает рассеяние носителей на гетеропереходе AlGaN/GaN, верхний барьер AlN формирует потенциал в гетероструктуре, который способствует уменьшению токов утечки в затвор. Таким образом, последовательность слоев следующая: p^+-GaN толщиной h_p = 40 нм, верхний барьер AlN толщиной h_{b1} = 1 нм, основной барьер AlGaN толщиной h_b = 12 нм, спейсерный барьер AlN толщиной h_{b2} = 1 нм, область канала GaN толщиной h_{ch} = 20 нм. В процессе формирования затвора слой p^+-GaN удаляется в необходимых областях до стоп-слоя AlN, после чего удаляется стоп-слой и осаждается пассивирующий диэлектрик. Конструкция моделируемого прибора представлена на рис.1.

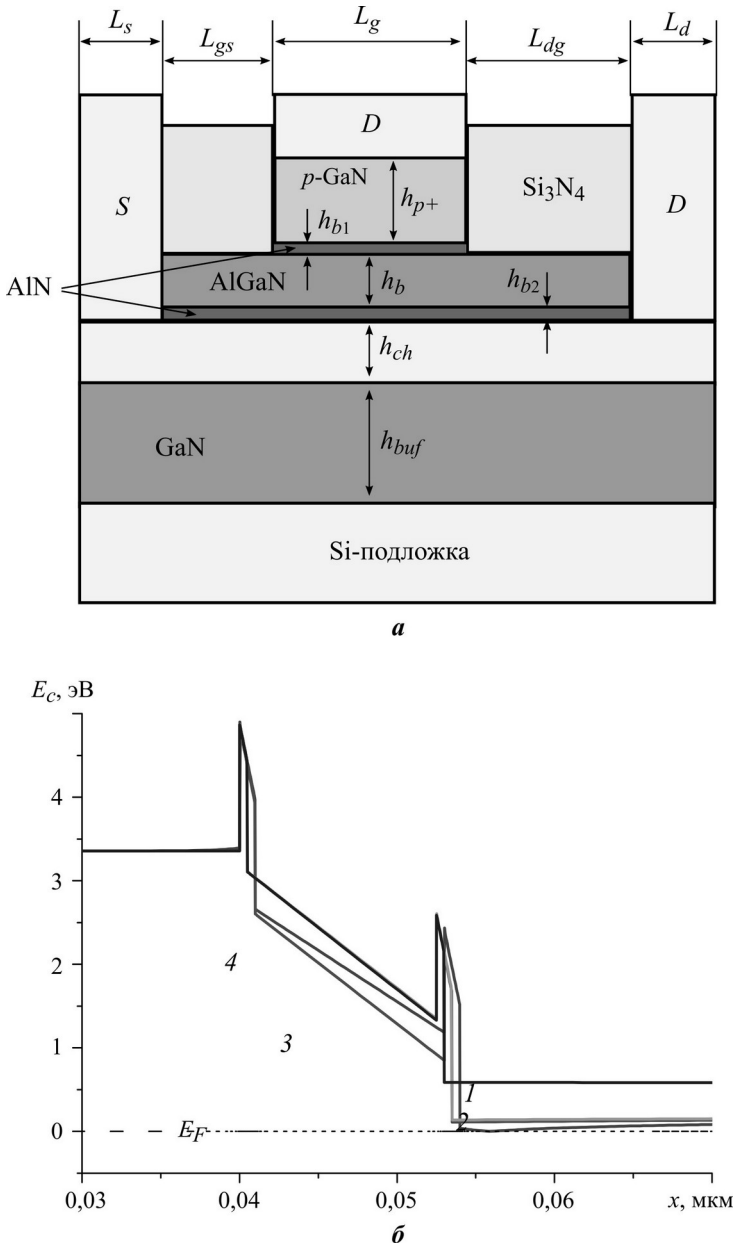


Рис.1. Геометрия моделируемой структуры (*а*) и зонные диаграммы подзатворной области при различных толщинах слоев AlN: *1* – $h_{b1} = h_{b2}$ =0,5 нм; *2* – h_{b1} = 0,5 нм; h_{b2} = 1,0 нм; *3* – h_{b1} = 1,0 нм; h_{b2} = 0,5 нм; *4* – $h_{b1} = h_{b2}$ = 1,0 нм (*б*) (L_s – длина истока; L_{gs} – расстояние от истока до затвора; L_g – длина затвора; L_{dg} – расстояние от затвора до стока; L_d – длина стока; h_{buf} – толщина буферного слоя GaN)

Fig.1. Schematic cross-sectional view of simulated structure (*a*) and band diagrams of heterostructures with various AlN thicknesses: *1* – $h_{b1} = h_{b2}$ =0,5 nm; *2* – h_{b1} = 0,5 nm; h_{b2} = 1,0 nm; *3* – h_{b1} = 1,0 nm; h_{b2} = 0,5 nm; *4* – $h_{b1} = h_{b2}$ = 1,0 nm (*b*) (L_s – source length; L_{gs} – gate-to-source length; L_g – gate length; L_{dg} – gate-to-drain length; L_d – drain length; h_{buf} – GaN buffer layer thickness)

Основные параметры гетероструктуры, обеспечивающие нормально-закрытое состояние, можно получить, решая только статистическую задачу. Основной целью при этом является определение зависимости концентрации электронов в канале от параметров структуры. В рассматриваемых структурах канал формируется на гетеропереходе GaN/AlN и для расчета концентрации носителей в канале необходимо решать квантово-

механическую задачу. Можно упростить задачу – решить только уравнения Пуассона и уравнения переноса [13, 14]. Для получения нормально-закрытого прибора толщина основного барьера должна быть достаточно малой. Дополнительные барьеры должны быть также достаточно малы, поскольку их наличие увеличивает эффективную толщину барьера в соотношении $1/x$.

Моделирование показало, что при толщине основного барьера h_b = 12 нм нормально-закрытое поведение прибора обеспечивается при толщине дополнительных барьеров по 0,5 нм (см. рис.1), поскольку в этом случае квантовая яма в области гетероперехода не образуется. При изменении толщин дополнительных барьерных слоев до 1 нм или при толщине одного слоя 0,5 нм, а другого 1 нм образуются квантовая яма и двумерный электронный газ. В результате прибор становится нормально-открытым даже при нулевом смещении на затворе.

Другими параметрами, которые определяют зонную диаграмму прибора и, соответственно, тип прибора являются толщина основного барьерного слоя и содержание Al в нем. В случае большой мольной доли Al в основном барьерном слое даже наличие слоя *p*-GaN не обеспечит нормально-закрытого поведения прибора. Малая доля Al позволяет более эффективно обеднить канал и уменьшает влияние рассогласования параметров решетки с GaN [15].

Исследовались зависимости концентрации носителей в канале N_c от толщины барьерного слоя AlGaN h_b и от содержания Al в этом слое x(Al) (рис.2). Зависимость $N_c(h_b)$ носит пороговый характер, при этом h_b ~14 нм. В некотором узком диапазоне наблюдаются линейный рост и затем насыщение. Как следует из результатов моделирования, прибор является нормально-закрытым при толщине слоя AlGaN менее 14 нм при мольной доле Al в нем 17 % (рис.2,*а*). Зависимость концентрации N_c от мольной доли Al в данном барьерном слое x(Al) оказывается практически линейной в широком диапазоне. Из рис.2,*б* видно, что транзистор является нормально-открытым, если мольная доля Al больше 21 % при толщине слоя AlGaN h_b = 12 нм.

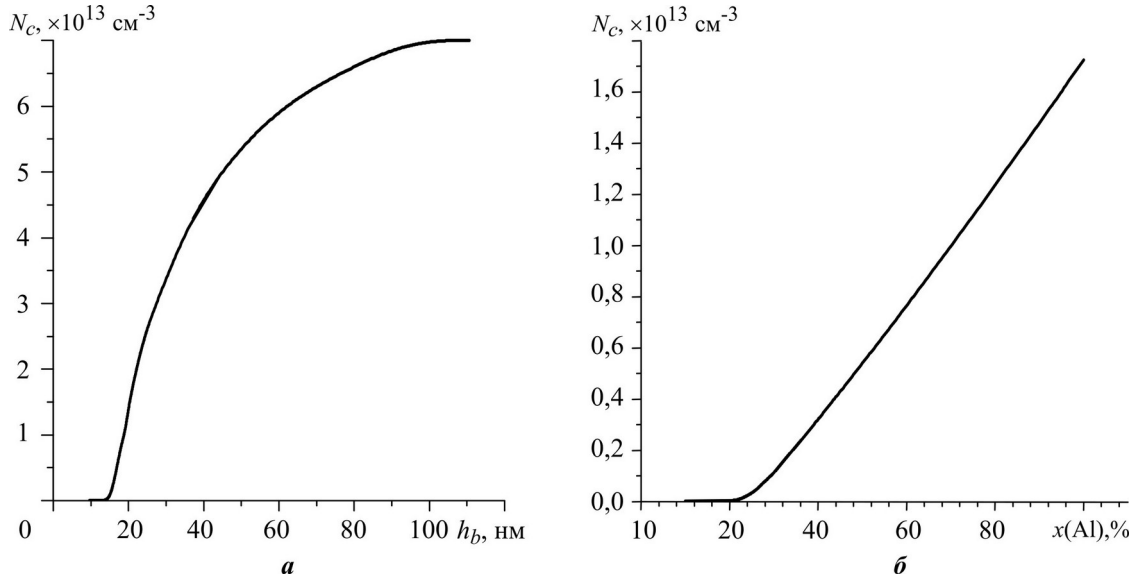


Рис.2. Зависимость слоевой концентрации двумерного электронного газа в канале N_c от толщины AlGaN барьерного слоя h_b при $h_{b1} = h_{b2}$ = 0,5 нм и x(Al) = 17 % (*а*) и мольной доли Al в барьерном слое AlGaN x(Al) при h_b = 12 нм (*б*)

Fig.2. Dependence of channel carrier density N_c on AlGaN barrier layer thickness h_b at $h_{b1} = h_{b2}$ = 0,5 nm and x(Al) = 17 % (*a*) and Al mole fraction (x(Al)) in the AlGaN barrier layer at h_b = 12 nm (*b*)

Другими немаловажными параметрами являются толщина слоя p^+-GaN h_p и концентрация примеси в нем N_{p+}. Эти величины должны быть такими, чтобы толщина h_{p+} превышала толщину области истощения для N_{p+}. В рассматриваемом случае, исходя из практических результатов легирования Mg, установили концентрацию примеси в *cap*-слое p^+-GaN $N_{p+} = 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. По результатам моделирования (рис.3,*а*) для такого значения концентрации в *cap*-слое p^+-GaN его толщина должна быть не менее 20 нм.

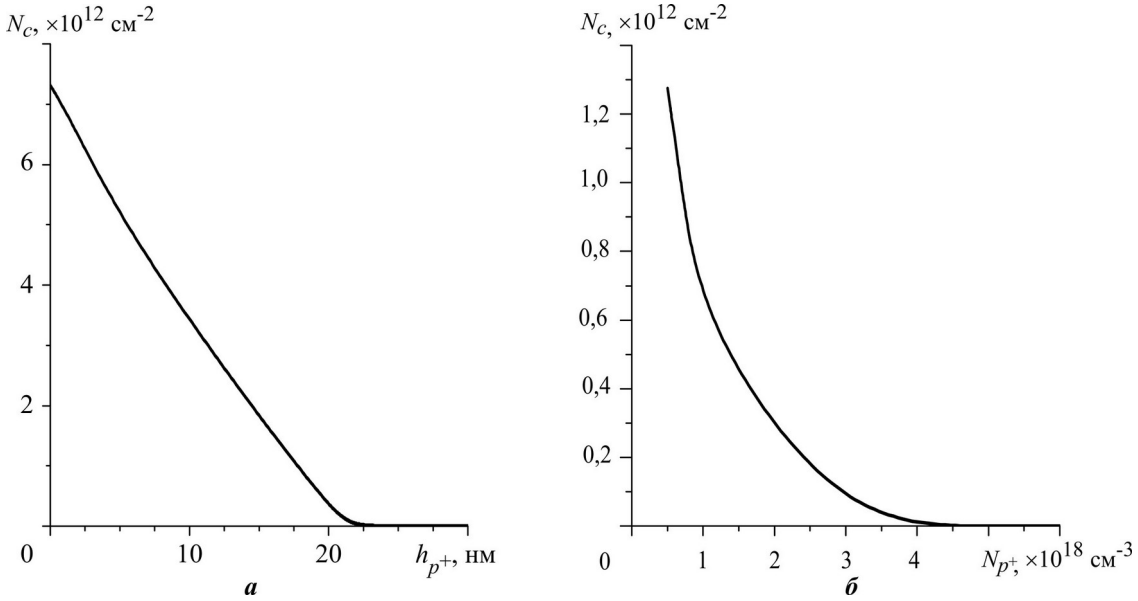


Рис.3. Зависимость плотности носителей в канале N_c от толщины *cap*-слоя *p*-GaN h_{p+} при $h_{b1} = h_{b2} = 0{,}5$ нм, $h_b = 12$ нм, $N_c = 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ (*а*) и концентрации примеси в *cap*-слое *p*-GaN N_{p+} при $h_{p+} = 40$ нм, $h_{b1} = h_{b2} = 0{,}5$ нм, $h_b = 12$ нм (*б*)

Fig.3. Dependence of channel carrier density N_c on *p*-GaN layer thickness h_{p+} at $h_{b1} = h_{b2} = 0{,}5$ nm, $h_b = 12$ nm, $N_c = 5 \cdot 10^{18}$ sm^{-3} (*a*) and concentration in *p*-GaN layer N_{p+} at $h_{p+} = 40$ nm, $h_{b1} = h_{b2} = 0{,}5$ nm, $h_b = 12$ nm (*b*)

С повышением концентрации примеси в слое *p*-GaN глубина квантовой ямы уменьшается и, соответственно, уменьшается плотность носителей заряда в канале [16]. Повышение концентрации примеси в *cap*-слое приводит к тому, что уменьшается величина поверхностного потенциала, что, в свою очередь, ведет к увеличению порогового напряжения транзистора и улучшению его ключевых характеристик [16]. Однако для оптимальной работы транзистора необходимо подбирать оптимальное легирование *cap*-слоя *p*-GaN, поскольку увеличение степени легирования *cap*-слоя позволяет уменьшить токи утечки в затвор, но в то же время уменьшает напряжение пробоя [17]. Также высокая концентрация примеси N_{p+} ухудшает кристаллическое качество слоя и не позволяет увеличить количество электрически активных акцепторов [18], поэтому важно исследовать влияние N_{p+} на формирование проводящего канала.

На рис.3,*б* показана зависимость носителей в канале N_c от концентрации примеси в *cap*-слое *p*-GaN N_{p+} при толщине слоя *p*-GaN $h_{p+} = 40$ нм и толщине дополнительных и основных барьерных слоев $h_{b1} = h_{b2} = 0{,}5$ нм, $h_b = 12$ нм. Моделирование показало, что при такой толщине *cap*-слоя прибор будет нормально-закрытым, если концентрация примеси в нем менее $4 \cdot 10^{18}$см$^{-3}$. По зависимости концентрации носителей в канале от напряжения, приложенного к затвору, определено пороговое напряжение транзистора, которое составило 1,5 В.

Формирование нормально-закрытого транзистора. На основе результатов моделирования выбран оптимальный состав гетероструктуры. На рис.4 показан разработанный технологический маршрут изготовления транзистора. На первом этапе формирует-

ся межприборная изоляция ионной имплантацией N, затем травится слой *p*-GaN под омические контакты, напыляются пленки Ti-Al-Ni-Au (20/100/40/30 нм) электронным лучом и вжигаются контакты в атмосфере азота при температуре 870 ºС. Далее происходят формирование затвора, пассивация и металлическая разводка.

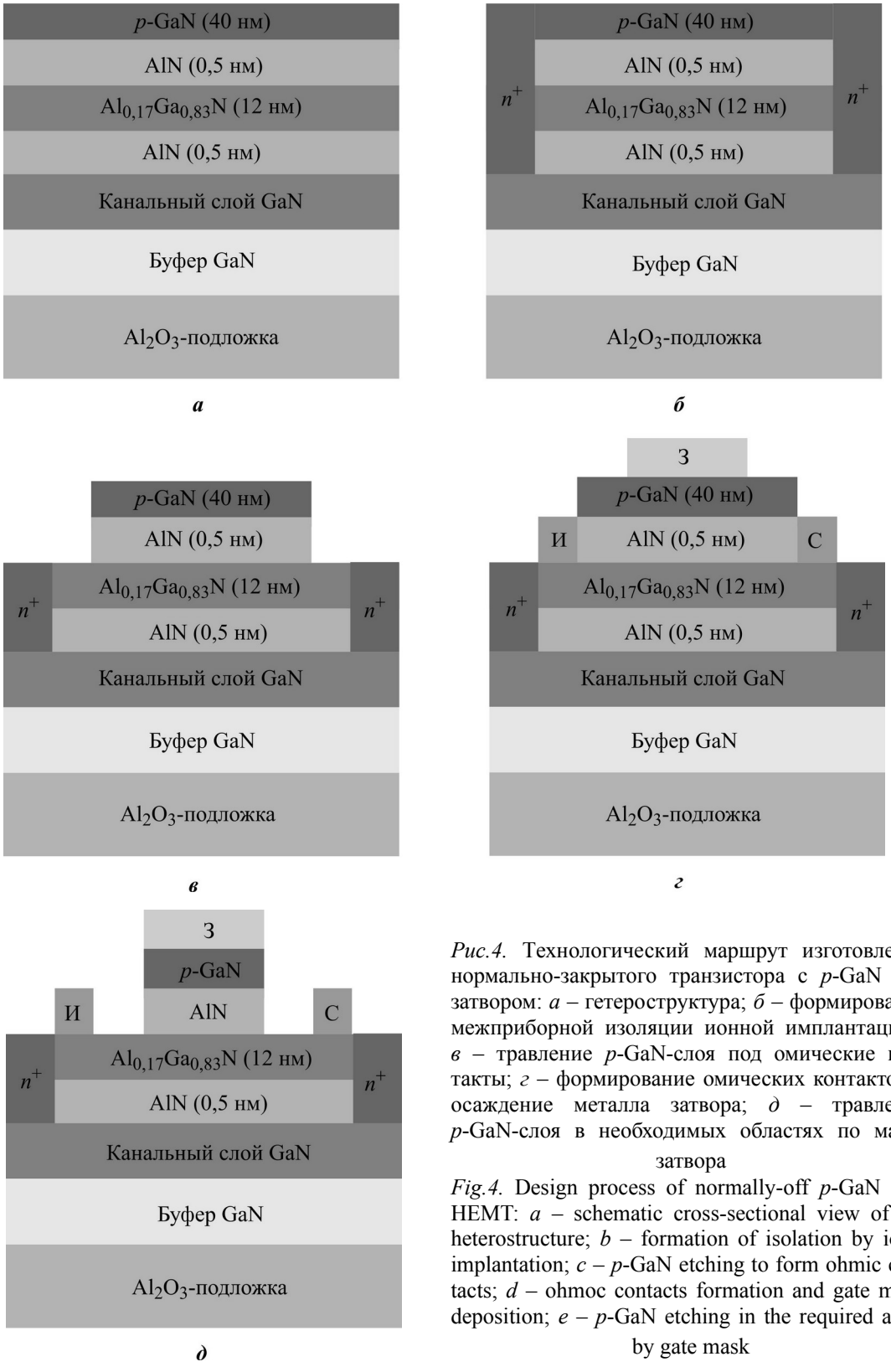


Рис.4. Технологический маршрут изготовления нормально-закрытого транзистора с *p*-GaN под затвором: *а* – гетероструктура; *б* – формирование межприборной изоляции ионной имплантацией; *в* – травление *p*-GaN-слоя под омические контакты; *г* – формирование омических контактов и осаждение металла затвора; *д* – травление *p*-GaN-слоя в необходимых областях по маске затвора

Fig.4. Design process of normally-off *p*-GaN gate HEMT: *a* – schematic cross-sectional view of the heterostructure; *b* – formation of isolation by ionic implantation; *c* – *p*-GaN etching to form ohmic contacts; *d* – ohmoc contacts formation and gate metal deposition; *e* – *p*-GaN etching in the required areas by gate mask

Канал формируется путем плазмохимического удаления слоя *p*-GaN вне затвора. Для контролируемости этого процесса в конструкции гетероструктуры существует дополнительный барьерный слоя AlN, который служит стоп-слоем при травлении, а также уменьшает токи утечки в затвор. При травлении слоя *p*-GaN используется смесь газов, содержащая не только хлор, но и фтор ($BCl_3 + SF_6$, $BCl_3 + CF_4$ и др.) [10, 15]. В этом случае образуются соединения AlF_3 и AlO_x, на которых и останавливается травление. Для того чтобы удалить этот тонкий диэлектрический слой, образец обрабатывается в растворе HF/NH_4OH или HCl.

На рис.5 представлена ВАХ сформированного транзистора с длиной затвора 1 мкм, расстоянием исток – затвор 1,5 мкм и расстоянием сток – затвор 9,5 мкм. Максимальный ток стока прибора в открытом состоянии составляет 350 мА/мм при 4 В на затворе, пробивное напряжение – около 550 В в закрытом состоянии при 0 В на затворе.

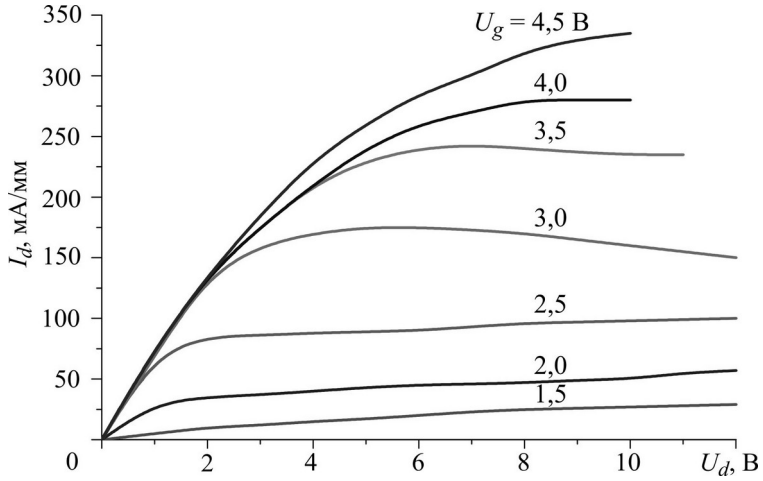


Рис.5. ВАХ сформированного транзистора
Fig.5. Output current-voltage characteristics of formed transistor

Заключение. Выбранная оптимальная конструкция гетероструктуры для формирования нормально-закрытого гетероструктурного транзистора на основе GaN с *p*-GaN-слоем под затвором характеризуется наличием дополнительного барьерного слоя AlN, который является стоп-слоем для травления *p*-GaN.

Сформированный по разработанному технологическому маршруту нормально-закрытый транзистор имеет длину затвора 1 мкм, расстояние исток – затвор 1,5 мкм и расстояние сток – затвор 9,5 мкм. Прибор характеризуется током насыщения в открытом состоянии плотностью до 350 мА/мм, крутизной до 100 мСм/мм и пробивным напряжением в закрытом состоянии 500 В при напряжении 0 В на затворе.

Литература

1. ***Гольцова М.*** Мощные GaN-транзисторы. Истинно революционная технология // Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. № 4. С. 86–100.

2. 600-V normally off SiN_x/AlGaN/GaN MISHEMT with large gate swing and low current collapse / ***Z. Tang, Q. Jiang, Y. Lu et al.*** // IEEE Electron Device Letters. 2013. Vol. 34. No. 11. P. 1373–1375.

3. ***Asgari A., Kalafi M.*** The control of two-dimensional-electron-gas density and mobility in AlGaN/GaN heterostructures with Schottky gate // Materials Science and Engineering: C. 2006. Vol. 26. P. 898–901.

4. ***Tiwari S.*** Compound semiconductor device physics. Academic Press, San Diego, 1992, 32 p.

5. ***Landford W.B., Tanaka T., Otoki Y., Adesida I.*** Recessed-gate enhancement-mode GaN HEMT with high threshold voltage // Electronics Letters. 2005. Vol. 41. No. 7. P. 449–450.

6. ***Cai Y., Zhou Y., Lau K.M., Chen K.J.*** Control of threshold voltage of AlGaN/GaN HEMTs by fluoride-based plasma treatment: from depletion mode to enhancement mode // IEEE Trans. Electron Devices. 2006. Vol. 53. No. 9. P. 2207–2215.

7. ***Ohmaki Y., Tanimoto M., Akamatsu S., Mukai T.*** Enhancement-mode AlGaN/AlN/GaN high electron mobility transistor with low on-state resistance and high breakdown voltage // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45. No. 2. P. 42–45.

8. ***Kambayashi H., Satoh Y., Ootomo S.*** Over 100 A operation normally-off AlGaN-GaN hybrid MOS-HFET on Si substrate with high-breakdown voltage // Solid-State Electronics. 2010. Vol. 54. No. 6. P. 660–664.

9. ***Roccaforte F., Fiorenza P., Greco G.*** Recent advances on dielectrics technology for SiC and GaN power devices // Applied surface science. 2014. Vol. 301. P. 9–18.

10. ***Greco G., Iucolano F., Roccaforte F.*** Review of technology for normally-off HEMTs with *p*-GaN gate // Materials Science in Semiconductor Processing. 2018. Vol. 78. P. 96–106.

11. ***Uemoto Y., Hikita M., Ueno H.*** Gate Injection Transistor (GIT) – a normally-off AlGaN/GaN power transistor using conductivity modulation // IEEE Transactions on Electron Devices. 2007. Vol. 54. No. 12. P. 3393–3399.

12. High-performance normally off *p*-GaN gate HEMT with composite AlN/$Al_{0.17}Ga_{0.83}N$/$Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ barrier layers design / ***H. Chiu, Y. Chang, B. Li at al.*** // Journal of the Electron Devices Society. 2018. Vol. 6. P. 201–206.

13. ***Bai Z., Du J., Jiang Z., Yu Q.*** Design and simulation of high breakdown voltage AlGaN/GaN HEMTs with a charged passivation layer for microwave power applications // Journal of Computational Electronics. 2017. Vol. 16. No. 3. P. 741–747.

14. ***Mohamed A.A., Granzner R., Schwier F.*** Theoretical investigation of trigate AlGaN/GaN HEMTs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2013. Vol. 60. P. 3335–3341.

15. High on/off ratio in enhancement-mode $Al_xGa_{1-x}N$/GaN junction heterostructure field-effect transistors with *p*-type GaN gate contact / ***T. Fujii, N. Tsuyukuchi, Y. Hirose et al.*** // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45. No. 2. P. 37–41.

16. ***Adak S., Swain S., Rahaman H., Sarkar Ch.*** Effect of doping in *p*-GaN gate on DC performances of AlGaN/GaN normally-off scaled HFETs // Devices for Integrated Circuit. 2017. P. 372–375.

17. Field- and current-driven degradation of GaN-based power HEMTs with *p*-GaN gate: Dependence on Mg-doping level / ***I. Rossetto, M. Meneghini, E. Canato et al.*** // Microelectronics Reliability. 2017. Vol. 76–77. P. 298–303.

18. ***Miyake H., Motogaito A., Hiramatsu K.*** Effects of reactor pressure on epitaxial lateral overgrowth of GaN via low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy // Japanese Journal of Applied Physics. 1999. Vol. 38. No. 9A/B. P. L1000–L1002.

Поступила в редакцию 21.05.2020 г.; после доработки 21.05.2020 г.; принята к публикации 30.06.2020 г.

Егоркин Владимир Ильич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), egorkin@qdn.miee.ru

Беспалов Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, ректор Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), rector@miet.ru

Зайцев Алексей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ziko27@yandex.ru

Земляков Валерий Евгеньевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vzml@rambler.ru

Капаев Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kapaevvv@lebedev.ru

Кухтяева Ольга Борисовна – техник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Kukhtuaeva@mail.ru

References

1. Goltsova M. High-voltage GaN transistors True revolutionary technology. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Bussines*, 2012, no.4, pp. 86–100. (in Russian).

2. Tang Z., Jiang Q., Lu Y., Huang S., Yang S., Tang X. et al. 600-V normally off SiN_x/AlGaN/GaN MISHEMT with large gate swing and low current collapse. IEEE *Electron Device Letters,* 2013, vol. 34, no. 11, pp. 1373–1375.

3. Asgari A., Kalafi M. The control of two-dimensional-electron-gas density and mobility in AlGaN/GaN heterostructures with Schottky gate. *Materials Science and Engineering: C*, 2006, vol. 26, pp. 898–901.

4. Tiwari S. *Compound semiconductor device physics*. Academic Press, San Diego, 1992, 32 p.

5. Landford W. B., Tanaka T., Otoki Y., Adesida I. Recessed-gate enhancement-mode GaN HEMT with high threshold voltage. *Electronics Letters*, 2005, vol. 41, no.7, pp. 449–450.

6. Cai Y., Zhou Y., Lau K.M., Chen K.J. Control of threshold voltage of AlGaN/GaN HEMTs by fluoride-based plasma treatment: from depletion mode to enhancement mode. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2006, vol. 53, no. 9, pp. 2207–2215.

7. Ohmaki Y., Tanimoto M., Akamatsu S., Mukai T. Enhancement-mode AlGaN/AlN/GaN high electron mobility transistor with low on-state resistance and high breakdown voltage. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 45, no. 2, pp. 42–45.

8. Kambayashi H., Satoh Y., Ootomo S. Over 100 A operation normally-off AlGaN-GaN hybrid MOS-HFET on Si substrate with high-breakdown voltage. *Solid-State Electronics,* 2010, vol. 54, no. 6, pp. 660–664.

9. Roccaforte F., Fiorenza P., Greco G. Recent advances on dielectrics technology for SiC and GaN power devices. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 301, pp. 9–18.

10. Greco G., Iucolano F., Roccaforte F. Review of technology for normally-off HEMTs with *p*-GaN gate. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, vol. 78, pp. 96–106.

11. Uemoto Y., Hikita M., Ueno H. Gate injection transistor (GIT) – A normally-off AlGaN/GaN power transistor using conductivity modulation. *IEEE Transactions on Electron Devices,* 2007, vol. 54, no. 12, pp. 3393–3399.

12. Chiu H., Chang Y., Li B., Wang H., Kao H., Hu C. et al. High-performance normally off *p*-GaN gate HEMT with composite AlN/$Al_{0.17}Ga_{0.83}N$/$Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ barrier layers design. *Journal of the Electron Devices Society*, 2018, vol. 6, pp. 201–206.

13. Bai Z., Du J., Jiang Z., Yu Q. Design and simulation of high breakdown voltage AlGaN/GaN HEMTs with a charged passivation layer for microwave power applications. *Journal of Computational Electronics*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 741–747.

14. Mohamed A.A., Granzner R., Schwier F. Theoretical investigation of trigate AlGaN/GaN HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, vol. 60, pp. 3335–3341.

15. Fujii T., Tsuyukuchi N., Hirose Y., Iwaya M., Kamiyama S., Amano H. et al. High on/off ratio in enhancement-mode $Al_xGa_{1-x}N$/GaN junction heterostructure field-effect transistors with *p*-type GaN gate contact. *Japanese Journal of Applied Physics,* 2006, vol. 45, no. 2, pp. 37–41.

16. Adak S., Swain S., Rahaman H, Sarkar Ch. Effect of doping in *p*-GaN gate on DC performances of AlGaN/GaN normally-off scaled HFETs. *Devices for Integrated Circuit*, 2017, pp. 372–375.

17. Rossetto I., Meneghini M., Canato E., Barbato M., Stoffels S., Posthuma N. et al. Field- and current-driven degradation of GaN-based power HEMTs with *p*-GaN gate: Dependence on Mg-doping level. *Microelectronics Reliability*, 2017, vol. 76–77, pp. 298–303.

18. Miyake H., Motogaito A., Hiramatsu K. Effects of reactor pressure on epitaxial lateral overgrowth of GaN via low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 38, no. 9A/B, pp. L1000– L1002.

Received 21.05.2020; Revised 21.05.2020; Accepted 30.06.2020.

Information about the authors:

Vladimir I. Egorkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Lead Researcher of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), egorkin@qdn.miee.ru

Vladimir A. Bespalov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Zelenograd, Moscow, Shokin sq., 1), rector@miet.ru

Alexey A. Zaytsev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Ziko27@yandex.ru

Valery E. Zemlyakov – Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vzml@rambler.ru

Vladimir V. Kapaev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head Researcher of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kapaevvv@lebedev.ru

Olga B. Kukhtyaeva – Technician of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Kukhtuaeva@mail.ru

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

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

http://ivuz-e.ru

УДК 621.383.8 001.891.573 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-402-409

Моделирование процессов электронного усиления в каналах умножителей на пористых структурах оксида алюминия

И.Н. Гончаров[1,2], Е.Н. Козырев[1], И.В. Тваури[2]

[1]Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Россия
[2]Северо-Осетинский государственный университет имени К.Л. Хетагурова, г. Владикавказ, Россия

goncharov-scgtu@mail.ru

Вторично-эмиссионный умножитель пространственно распределенных потоков электронов – микроканальная пластина – определяет усилительные характеристики электронно-оптических преобразователей и фотоэлектронных умножителей. Совершенствование параметров микроканальной пластины, а также поиск новых подходов к изготовлению вторично-эмиссионных умножителей на альтернативных материалах – актуальная задача. В работе рассмотрено применение самоорганизующихся и высокоупорядоченных пористых анодных структур оксида алюминия в качестве эффективных вторично-электронных эмиттеров. Предложены теоретические и практические подходы к разработке и реализации компьютерной модели процессов умножения электронов в канале структуры на основе оксида алюминия. По результатам расчетов, выполненных с использованием данной модели, установлены усилительная способность таких каналов, их оптимальный калибр, равный 25, и напряжение питания, равное 300 В. Проведен сравнительный анализ данных характеристик вторично-электронных умножителей с соответствующими параметрами микроканальных пластин на основе свинцово-силикатного стекла. Установлено, что пористый анодированный оксид алюминия пригоден для изготовления вторично-электронных умножителей. Его вторично-эмиссионная способность значительно выше, чем у свинцово-силикатного стекла.

Ключевые слова: вторичная электронная эмиссия; математическое моделирование; высокоупорядоченная пористая структура; анодный оксид алюминия; электронные умножители; коэффициент усиления

Для цитирования: Гончаров И.Н., Козырев Е.Н., Тваури И.В. Моделирование процессов электронного усиления в каналах умножителей на пористых структурах оксида алюминия // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 402–409. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-402-409

© И.Н. Гончаров, Е.Н. Козырев, И.В. Тваури, 2020

Modeling of Electronic Amplification Processes in Channels of Multipliers on Porous Structures of Aluminum Oxide

I.N. Goncharov[1,2], E.N. Kozyrev[1], I.V. Tvauri[2]

[1]North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia
[2]Khetagurov North Ossetian State University, Vladikavkaz, Russia

goncharov-scgtu@mail.ru

Abstract: The secondary-emission multiplier of spatial-distributed flows of electrons – microchannel membrane – determines along with the photocathode, luminescent screen, electron-optical system determines the amplifying characteristics of the electron-optical transformers, photoelectronic multipliers. This, in its turn, determines the application areas and the operating range of the items. The actual task is an improvement of the microchannel membrane parameters and the search for new approaches to manufacture on alternative materials of the secondary-emission multipliers. In the paper the use of self-organizing high-ordered porous anode structures of aluminum oxide as the secondary-electronic emitters have been considered. The theoretical and practical approaches to development and the implementation of the computer models of processes of multiplying electrons in the channel of the based on aluminum oxide, have been offered. Based on the results of the calculations, performed using this model, the amplifying ability of such channels has been determined, their optimal caliber is 25, and the supply voltage is 300 V. A comparative analysis of these characteristics of secondary electron multipliers with corresponding parameters of microchannel plates based on lead silicate glass has been performed. It has been determined that that porous anodized alumina may be suitable for the manufacture of secondary electron multipliers. Its secondary emission ability is comparable to lead silicate glass.

Keywords: secondary electron emission; mathematical modeling; highly ordered porous structure; anodic alumina; electron multipliers, gain

For citation: Goncharov I.N., Kozyrev E.N., Tvauri I.V. Modeling of electronic amplification processes in channels of multipliers on porous structures of aluminum oxide. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 402–409. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-402-409

Введение. Одним из важнейших элементов конструкции изделий фото- и оптоэлектроники является вторично-эмиссионный умножитель пространственно распределенных потоков электронов – микроканальная пластина (МКП). В таких изделиях, как электронно-оптические преобразователи (ЭОП) и фотоэлектронные умножители, канальный умножитель, наряду с фотокатодом, люминесцентным экраном (в ЭОП), электронно-оптической системой, определяет их усилительные характеристики, а также разрешающую способность ЭОП. Это, в свою очередь, обусловливает область применений и дальность действия изделий.

Актуальной задачей является совершенствование параметров МКП, а также поиск новых подходов к изготовлению на альтернативных материалах вторично-эмиссионных умножителей, в частности на основе пористых структур оксида алюминия. Применение аппарата компьютерного моделирования соответствующих физических процессов позволяет оперативно определить такие важнейшие характеристики вторично-эмиссионной структуры, как коэффициент электронного усиления, калибр канала, значение напряжения питания.

Описание микроканальной пластины. МКП представляет собой диск, который состоит из большого числа (несколько миллионов) регулярных идентичных трубчатых каналов диаметром порядка 5 мкм, выполненных из свинцово-силикатного стекла. Данное изделие характеризуется сложной, многоступенчатой и вероятностной технологией производства с относительно низким процентом выхода годных [1]. Это отражается на цене продукции, которая составляет порядка 100 долл. США за одну пластину.

В настоящее время рассматриваются альтернативные аналоги свинцово-силикатной МКП, например МКП из монокристаллического кремния с применением технологических процессов, характерных для химии и микроэлектроники, а также самоорганизующиеся пористые структуры на основе оксида алюминия, выращенные методом электролитического анодирования. Путем подбора электролита, а также токового и температурно-временного режима анодирования можно получать упорядоченные структуры со сквозными каналами высоковоспроизводимого диаметра до 0,4–0,5 мкм гексагонального расположения [2, 3] (рис.1). Дополнительное растравливание пор в 5%-ном растворе фосфорной кислоты позволяет получить структуры с высоким уровнем прозрачности и диаметром пор до 1 мкм, расположенных с периодичностью 1,5–2 мкм [4, 5].

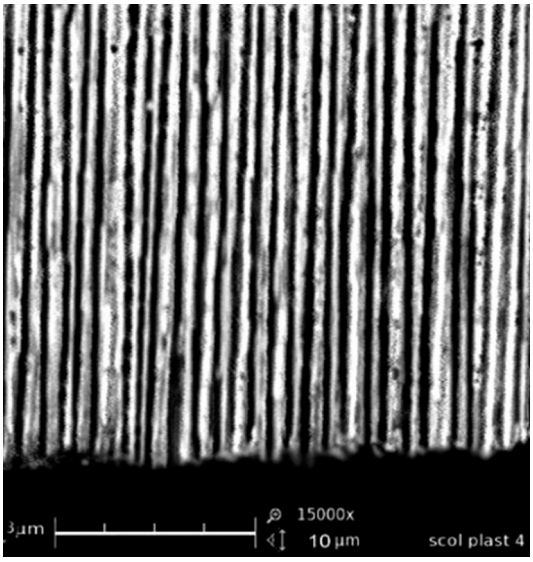


Рис.1. Микрофотография скола пленки оксида алюминия
Fig.1. Micrograph of cleaved alumina film

Меньшее по сравнению со свинцово-силикатными МКП значение диаметра канала может обеспечить рост разрешающей способности усиленного электронного изображения, формируемого данной вторично-умножительной структурой.

Моделирование процессов электронного усиления в каналах умножителей. Для подробного рассмотрения усилительных свойств канального умножителя на основе самоупорядоченной пористой структуры анодированного оксида алюминия удобно использовать инструмент компьютерного проектирования на основе соответствующей математической модели.

При моделировании поведения вторичных электронов, вылетающих с поверхности диэлектрика и полупроводника, включая их транспорт и непосредственно эмиссию в пространство, необходимо иметь представление прежде всего об условиях выхода и эффективной (минимальной) энергетике первичного электрона. Возбужденные в полупроводнике внутренние электроны – это неравновесные носители заряда, которые стремятся перейти в зону проводимости эмиттера. Для преодоления запрещенной зоны они должны иметь существенно большую энергию по сравнению с равновесными термали-

зованными носителями. Она должна превосходить ширину запрещенной зоны E_g соответствующего материала. Поскольку направление движения возбужденных электронов в толще эмиттера может быть любым, в том числе диаметрально противоположным от приповерхностного, то очевидно, что только их половина в среднем движется в нужном направлении. Поэтому вероятность выхода горячего вторичного электрона $f(x)$ из глубины x к поверхности снижается наполовину и может быть представлена в виде

$$f(x) < 0{,}5\exp(-x/L),$$

где L – возможная зона выхода вторичного электрона в объеме эмиттера (диффузионная длина неравновесных электронов), м.

Очевидно, что для повышения вероятности выхода вторичного электрона требуется увеличение энергии первичного электрона E_1. При расчете E_1 в ходе моделирования процесса вторичной электронной эмиссии следует иметь в виду также потери энергии при транспорте возбужденного электрона вследствие многочисленных рассеяний на остовах решетки, атомах примеси, фононах и структурных дефектах. Известно также условие выхода электрона с поверхности эмиттера в вакуум, согласно которому его энергия должна быть равной или превосходить работу выхода электрона E_a из данного материала. Теоретически пороговая энергия первичных электронов, необходимая для выхода вторичных электронов, соотносится с энергетической шириной запрещенной зоны примерно как $E_1 \geq 3E_g$ [6, 7]. В противном случае ток вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) может быть обусловлен только отраженными первичными электронами, а коэффициент вторичной эмиссии σ существенно меньше единицы.

Исследования, проведенные во Владикавказском технологическом центре «Баспик» и ОАО «Гран» (г. Владикавказ), которые имеют многолетние традиции по разработке и выпуску микроканальных пластин, ЭОП и фотоэлектронных умножителей различных модификаций, в том числе оборонного назначения, показали следующее [7–9]. Во-первых, для SiO_2 первый критический потенциал составляет около 19–20 В, а при 24 В значение коэффициента ВЭЭ больше единицы. Аналогичные первые критические потенциалы имеют и другие широкозонные диэлектрики, к которым относится и Al_2O_3. Это говорит о том, что у данных веществ истинная ВЭЭ имеет место при энергиях первичных электронов, меньших их утроенных значений E_g. Во-вторых, как следует из [6], начало эмиссии истинно вторичных электронов (порог ВЭЭ) из многих полупроводников и диэлектриков наблюдается при E_1, почти совпадающей с E_g, что косвенно свидетельствует о малых значениях электронного сродства для указанных материалов. Таким образом, в первом приближении, основываясь на экспериментальных результатах по ВЭЭ, в качестве порогового значения E_1 можно принять величину, равную E_g данного материала. Отметим, что E_g оксида кремния составляет 8 эВ, а оксида алюминия – 6,3 эВ [2, 10].

Энергия $E_1 = eU_1$ приобретается первичным электроном под воздействием ускоряющего напряжения U_1. Согласно [7, 11] в характерной для многоканальных умножителей области ускоряющих напряжений $U_1 = 0...100$ В для аппроксимации характеристики $\sigma(U_1)$ уравнение имеет вид

$$\sigma = \beta\sqrt{U_1},$$

где β – первый параметр вторично-эмиссионной эффективности.

Компьютерная модель процесса умножения электронов в канале структуры включает в себя два математических описания [12]:

– модель распределения ускоряющего электрического поля в объемном канале;

– модель поведения первичных и вторичных электронов в нем.

В качестве первой целесообразно использовать решаемое численным методом уравнение Лапласа для электрического поля в вакууме:

$$\nabla^2 U = 0, \tag{1}$$

где ∇^2 – дифференциальный оператор Лапласа, форма которого зависит от выбора координатной системы, 1/м^2; U – потенциал поля, В.

Вторая модель движения электрона в электрическом поле описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = V_x; & \dfrac{dV_x}{dt} = -\dfrac{e}{m} E_x; \\ \dfrac{dy}{dt} = V_y; & \dfrac{dV_y}{dt} = -\dfrac{e}{m} E_y; \\ \dfrac{dz}{dt} = V_z; & \dfrac{dV_z}{dt} = -\dfrac{e}{m} E_z, \end{cases} \tag{2}$$

где dx, dy – приращения поперечных координат, м; dz – приращение продольной координаты, м; dt – приращение времени, с; V_x, V_y, V_z – проекции вектора скорости на оси x, y, z соответственно, м/с; E_x, E_y, E_z – рассчитанные напряженности поля в проекции к осям x, y, z, В/м; e – заряд электрона, равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл; m – масса электрона, равная $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Результаты расчетов, проведенных с использованием реализованных в виде программных продуктов моделей (1) и (2), представлены на рис.2.

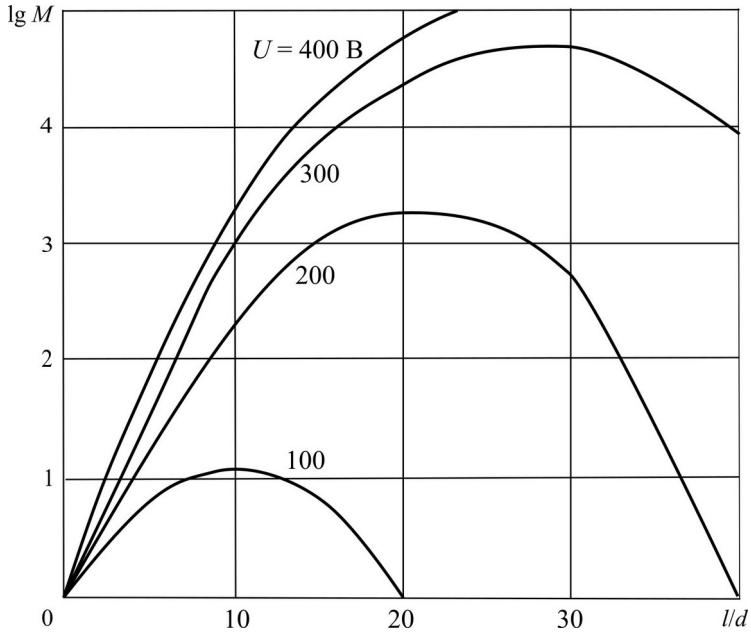


Рис.2. Распределения усилительной способности каналов структуры на основе Al_2O_3 при различных режимах работы
Fig.2. Distributions of the amplification ability of the channel structure based on Al_2O_3 in various operating modes

В ходе расчетов были приняты следующие условия:

– диаметр канала равен 1 мкм;

– энергия первичных электронов внутри канала в соответствии с числом каскадов усиления, калибром канала и подаваемым ускоряющим напряжением в среднем составляет порядка 10–20 эВ. Разность потенциалов, воздействующая на электрон, влетающий в канал, как правило, значительно выше и во многих МКП-изделиях задается оптимальной с точки зрения эффективности первого удара и может составлять 500 В. Тогда коэффициент ВЭЭ первого удара в канале из свинцово-силикатного стекла будет обеспечен порядка 4–4,5. Данный фактор регулируется электронно-оптической системой изделия и повышает эффективность первого удара;

– первое взаимодействие электрона со стенкой происходит на расстоянии не более 3 мкм от входа в канал (зависит от угла наклона каналов относительно оси МКП);

– угловое распределение вылета вторичных электронов косинусоидальное;

– зарядовые явления в канале не учитываются.

Из рис.2 видно, что рассматриваются случаи с характерным для канальных умножителей калибром (соотношением длины канала l к его диаметру d), достигающим 40 единиц. Напряжение питания структуры U варьируется от 100 до 400 В. Полученные зависимости имеют традиционный для канальных электронных умножителей характер с максимумом усиления M при оптимальном калибре. Расчеты показали, что уже при ускоряющем напряжении, равном 300 В, усилительная способность каналов достигла значения более 10 000 при калибре 25. Известно, что такое усиление у обычной свинцово-силикатной МКП достигается при подаче питающего напряжения порядка 1000 В и при большей длине канала, соответствующего калибру 40–45. Полученные данные для структуры на основе оксида алюминия объясняются повышенной эффективностью вторичного эмиттера, а также меньшей работой выхода его вторичных электронов. Оксид алюминия относится к высокоэффективным вторично-электронным эмиттерам с максимальным коэффициентом ВЭЭ, превышающим 5–7 [7].

Заключение. Проведенное компьютерное моделирование позволило определить вторично-эмиссионную способность канального умножителя на основе оксида алюминия. Анодированный оксид алюминия пригоден для изготовления вторично-электронных умножителей. Его вторично-эмиссионная способность не уступает свинцово-силикатному стеклу. Оптимальный калибр для такого усилителя с учетом его эмиссионной способности следует считать равным 25–30, а напряжение питания 300 В, что значительно ниже, чем у стеклянных умножителей. Расчетный коэффициент усиления канала достигает нескольких десятков тысяч.

Дальнейшие исследования в данной области в значительной степени должны быть направлены на повышение уровня кристаллизации стенок каналов структур из оксида алюминия.

Литература

1. ***Грузевич Ю.К.*** Оптико-электронные приборы ночного видения: монография. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. Т. 84. №1. 93 с.

2. ***Аверин И.А., Губич И.А.*** Анализ моделей формирования и упорядочения пористой структуры оксида алюминия // Технические науки. Машиностроение и машиноведение. 2013. №2 (26). С. 91–95.

3. Многослойные фотонно-кристаллические структуры на основе наноструктурированного пористого анодного оксида алюминия / ***Е.Н. Козырев, В.И. Филоненко, Т.Н. Беляева и др.*** // Материалы X Меж-

дунар. науч.-техн. конф «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 28 мая − 2 июня 2018 г.). Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2018. С. 403–406.

4. ***Шиманович Д.Л.*** Исследование параметров отклика и восстановления емкостных чувствительных элементов, сформированных на основе мембранных нанопористых матриц Al_2O_3 // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. INTERMATIC-2015 (Москва, 1–5 декабря 2015 г.). М., 2015. Ч. 4. С.123–126.

5. ***Козырев Е.Н.*** Способ анодирования алюминиевых изделий // Патент РФ № 2448202. 2012.

6. ***Броништейн И.М., Фрайман Б.С.*** Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.

7. ***Кулов С.К.*** Вторичная электронная эмиссия резистивно-эмиссионного слоя каналов МКП. Владикавказ: Баспик, 2000. 181 с.

8. ***Алкацева Т.Д.*** Закономерности формирования и минимизация дефектов электронного изображения микроканальных пластин: дис. … канд. техн. наук. Владикавказ, 1999. 247 с.

9. ***Кесаев С.А.*** Разработка и исследование микроканальных пластин с высоким пространственным разрешением для техники ночного видения: дис. … канд. техн. наук. Владикавказ, 2002. 205 с.

10. ***Штанг Т.В.*** Моделирование процессов заряжения и люминесценции при облучении электронами наноструктурных оксидов кремния и алюминия: дис. … канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2014. 140 с.

11. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений / под ред. Б Кейзана. Т. 1. М.: Мир, 1978. 336 с.

12. ***Дебновецкий С.В., Писаренко Л.Д., Резниченко В.К.*** Основы автоматизированного проектирования электронных приборов. Киев: Высшая школа, 1988. 278 с.

Поступила в редакцию 13.05.2020 г.; после доработки 26.05.2020 г.; принята к публикации 30.06.2020 г.

Гончаров Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры электронных приборов Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) (Россия, 362021, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), заведующий лабораторией ядерных исследований Северо-Осетинского государственного университета имени К.Л. Хетагурова (Россия, 362025, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44–46), goncharov-scgtu@mail.ru

Козырев Евгений Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных приборов Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) (Россия, 362021, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), kozyrev@skgmi-gtu.ru

Тваури Инга Васильевна – кандидат физико-математических наук, доцент, декан физико-технического факультета Северо-Осетинского государственного университета имени К.Л. Хетагурова (Россия, 362021, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), ateia@mail.ru

References

1. Gruzevich Yu.K. *Optoelectronic night vision devices*. Saint-Petersburg, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ., 2017, vol. 84, no. 1. 93 p. (in Russian).

2. Averin I.A., Gubich I.A. Analysis of models for the formation and ordering of the porous structure of aluminum oxide. *Tekhnicheskiye nauki. Mashinostroyeniye i mashinovedeniye = Technical Science. Mechanical Engineering and Mechanical Engineering,* 2013, no. 2 (26), pp. 91–95. (in Russian).

3. Kozyrev E.N., Filonenko V.I., Belyaeva T.N., Goncharov I.N., Kodzasova T.L. Multilayer photonic-crystal structures based on nanostructured porous anodic aluminum oxide. *Materials of the X International Scientific and Technical Conference «Micro-and Nanotechnologies in Electronics».* Nalchik, Kabardino-Balkar University Publ., 2018. pp. 403–406. (in Russian).

4. Shimanovich D.L Study of response parameters and recovery of capacitive sensing elements formed on the basis of membrane nanoporous Al_2O_3 matrices. *Materials of the International Scientific and Technical Conference, December INTERMATIC-2015.* Moscow, 2015, part 4, pp. 123–126. (in Russian).

5. Kozyrev E.N. *The method of anodizing aluminum products*. RF patent No. 2448202 from 04.20.2012. (in Russian).

6. Bronstein I.M., Freiman B.S. *Secondary electron emission*. Moscow, Nauka Publ., 1969. 408 p. (in Russian).

7. Kulov S.K. *Secondary electron emission of the resistive-emission layer of the MCP channels.* Vladikavkaz, Baspik Publ., 2000. 181 p. (in Russian).

8. Alkatseva T.D. *Patterns of formation and minimization of defects in the electronic image of microchannel plates*. Diss. for the degree of candidate of technical sciences. Vladikavkaz, 1999. 247 p. (in Russian).

9. Kesaev, S.A. *Development and research of microchannel plates with high spatial resolution for night vision technology*. Diss. for the degree of candidate of technical sciences. Vladikavkaz, 2002. 205 p. (in Russian).

10. Shtang T.V. *Modeling of the processes of charging and luminescence during electron irradiation of nanostructured silicon and aluminum oxides*. Diss. for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Ekaterinburg, 2014. 140 p. (in Russian).

11. *Achievements in the technique of transmission and playback of images*. Ed. B. Keysan. Vol. 1. Moscow, Mir Publ., 1978. 336 p. (in Russian).

12. Debnovetsky S.V., Pisarenko L.D., Reznichenko V.K. *Fundamentals of computer-aided design of electronic devices.* Kiev, Higher School Publ., 1988. 278 p. (in Russian).

Received 13.05.2020; Revised 26.05.2020; Accepted 30.06.2020.

Information about the authors:

Igor N. Goncharov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Devices Department, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University) (Russia, 362021, Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Nikolaeva st., 44), Head of the Laboratory for Nuclear Research, Khetagurova North Ossetian State University (Russia, 362025, Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Vatutin st., 44–46), goncharov-scgtu@mail.ru

Evgeny N. Kozyrev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Electronic Devices Department, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University) (Russia, 362021, Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Nikolaev st., 44), kozyrev@skgmi-gtu.ru

Inga V. Tvauri – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Dean of the Physics and Technology Faculty, Khetagurova North Ossetian State University (Russia, 362021, Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, Nikolaev st., 44), ateia@mail.ru

Уважаемые авторы!

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

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 004.3’12:004.051 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-410-422**

Модели и методы анализа структуры коммутационных ресурсов ПЛИС

Обзор

Р.Ж. Чочаев[1], Д.А. Железников[1], Г.А. Иванова[1], С.В. Гаврилов[1,2], В.И. Эннс[3]

[1]Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[3]Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, г. Москва, Россия

s.g@ippm.ru

До настоящего времени при решении задачи анализа и оценки структуры трассировочных ресурсов ПЛИС на ранних этапах проектирования доминировал подход, суть которого в прохождении полного маршрута проектирования (логический синтез, размещение, трассировка) на наборе тестовых схем с последующей оценкой различных параметров для каждой анализируемой архитектуры ПЛИС. Данный подход требует много времени и вычислительных ресурсов, а также наличия готового и настроенного на данную архитектуру САПР. Современные ПЛИС содержат больше миллиона логических вентилей, следовательно применение такого подхода неэффективно. Поэтому большое внимание уделяется построению различных моделей, позволяющих оценить структуру коммутационных ресурсов на ранних этапах, не прибегая к полному прохождению маршрута проектирования. В работе представлен детальный обзор существующих моделей и методов анализа структуры коммутационных ресурсов ПЛИС. Приведено сравнение методов и моделей, выполнена оценка их эффективности и возможности применения при проектировании отечественных ПЛИС. Установлено, что наиболее оптимальным подходом для анализа произвольных структур коммутационных ресурсов ПЛИС является разработка и применение смешанных методов. Это позволит получить точные модели, а также значительно сократить время разработки и выхода на рынок.

***Ключевые слова*:** автоматизация проектирования; программируемые логические интегральные схемы; FPGA; САПР; анализ архитектуры ПЛИС

© Р.Ж. Чочаев, Д.А. Железников, Г.А. Иванова, С.В. Гаврилов, В.И. Эннс, 2020

Для цитирования: Модели и методы анализа структуры коммутационных ресурсов ПЛИС. Обзор / Р.Ж. Чочаев, Д.А. Железников, Г.А. Иванова и др. // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 410–422. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-410-422

FPGA Routing Architecture Estimation Models and Methods

Review

R.Zh. Chochaev[1], D.A. Zheleznikov[1], G.A. Ivanova[1], S.V. Gavrilov[1,2], V.I. Enns[3]

[1]Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[3]Molecular Electronics Research Institute, Moscow, Russia

s.g@ippm.ru

Abstract: The problem of analyzing and evaluating the structure of FPGA routing resources at early stages of the design flow presents great interest for researchers. Until now, an approach, consisting in passing the full design flow (logic synthesis, placement, routing) on a set of the test circuits with subsequent estimation of various parameters for each FPGA architecture being analyzed, had been dominant. Despite the high accuracy, this approach has a long runtime and requires lots of computing resources, as well as CAD tuned to the analyzed FPGA architecture. Modern FPGA contain more than a million logical gates, therefore, the application of such approach is inefficient. Today, more attention is paid to the development of various models, which allows to evaluate the structure of the routing resources at early stages without using the benchmark circuits. In this work an overview of the existing models and methods for analyzing the structure of FPGA routing resources has been presented. A comparison of the methods and models has been performed, the estimation of their efficiency and possibility of application for designing domestic FPGA has been made. It has been found that the most optimal approach for analyzing of arbitrary structures of the routing resources FPGA is the development and application of mixed methods. This will allow to obtain the accurate models as well as to significantly reduce the development and market entry time.

Keywords: field programmable gate arrays; integrated circuit modeling; mathematical model; analytical models; design automation; routing; wires; benchmark testing

For citation: Chochaev R.Zh., Zheleznikov D.A., Ivanova G.A., Gavrilov S.V., Enns V.I. FPGA routing architecture estimation models and methods. Review. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 410–422. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-410-422

Введение. С момента появления первых ПЛИС в середине 1980-х гг. оценка структуры коммутационных ресурсов ПЛИС стала актуальной задачей, особенно в связи со стремительным ростом логической емкости ПЛИС. На сегодняшний день существуют два основных подхода к оценке архитектуры ПЛИС. В основе первого подхода лежат экспериментальные методы, которые заключаются в прохождении полного маршрута проектирования на наборе тестовых схем [1–5]. Для таких методов характерна высокая

точность оценки, сопровождаемая большими вычислительными и временными затратами. Второй, теоретический, подход позволяет оценить структуру коммутационных ресурсов на ранних этапах, не прибегая к полному прохождению маршрута проектирования [6–13]. Его применение позволяет расширить спектр анализируемых архитектур и значительно сократить время проектирования новых ПЛИС [14].

В настоящей работе представлены обзор и анализ современных методов и моделей оценки коммутационных ресурсов ПЛИС. Приведено сравнение методов и моделей, выполнена оценка их эффективности и возможности применения при проектировании отечественных ПЛИС.

Обзор структур коммутационных ресурсов ПЛИС. Ключевым элементом ПЛИС является логический блок (ЛБ), который состоит из N базовых логических элементов (БЛЭ), или конфигурируемых логических блоков (КЛБ). Классический БЛЭ включает в себя триггер и ячейку асинхронной памяти LUT (look-up table) с K-входами, которая может реализовать любую логическую функцию от K-переменных (рис.1).

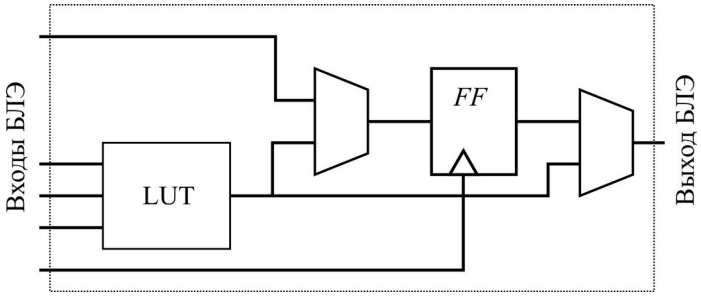


Рис.1. Структура классического БЛЭ
Fig.1. Basic logic element

В зависимости от расположения логических блоков и структуры коммутационных ресурсов можно выделить два основных класса ПЛИС: островные и иерархические.

Структура островной (island-style) ПЛИС представлена на рис.2. В данной архитектуре конфигурируемые блоки равномерно распределены между узлами коммутации и линиями связи по всей площади кристалла, образуя матрицу. К островным ПЛИС можно отнести ПЛИС серии Xilinx 4000 [15], Altera Stratix II [16]. Важными элементами коммутационной структуры островной ПЛИС являются блоки коммутации (connection box, CB) и блоки маршрутизации (switch box, SB). Блоки коммутации необходимы для подключения входов и выходов БЛЭ к горизонтальным и вертикальным трассировочным каналам шириной W и характеризуются коэффициентом разветвления F_c. Блоки маршрутизации предназначены для сегментации трассировочных каналов и также характеризуются коэффициентом разветвления F_s [17] (рис.3).

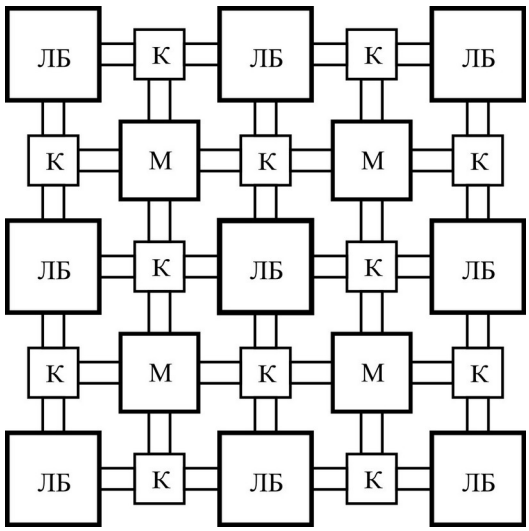


Рис.2. Структура островной ПЛИС (К – блок коммутации; М – блок маршрутизации)
Fig.2. An island-style FPGA (K – switching unit; M – routing unit)

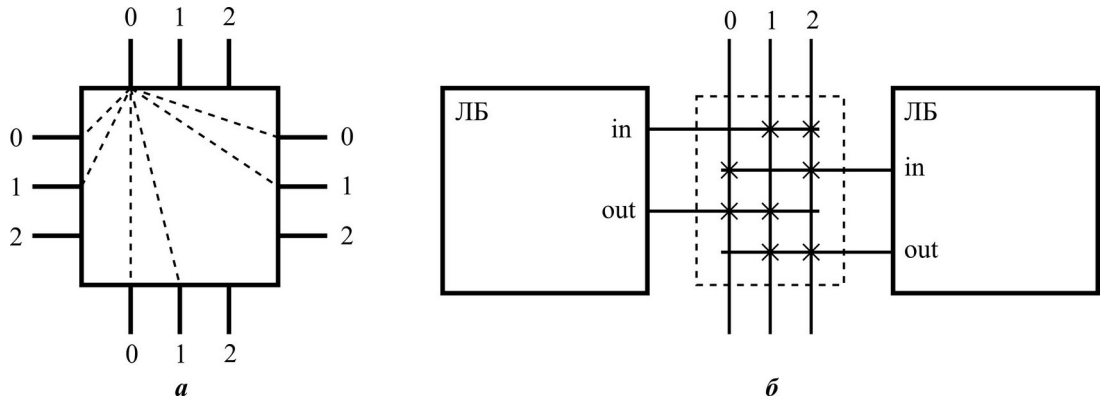


Рис.3. Блок маршрутизации $F_s = 6$ (*а*) и блок коммутации $F_c = 2$ (*б*) [6]
Fig.3. Switch box $F_s = 6$ (*a*) and connection box $F_c = 2$ (*b*) [6] details

В иерархических ПЛИС коммутационные ресурсы имеют многоуровневую структуру. Трассировка соединений между соседними БЛЭ не требует большого числа коммутаторов и не выходит за пределы нижнего уровня, в то время как для коммутации удаленных друг от друга на достаточно большое расстояние КЛБ необходим переход с нижних уровней коммутации на верхние и обратно. К иерархическим можно отнести ПЛИС Altera серии APEX [18] (рис.4), FLEX 10K [19]. Для связи БЛЭ в пределах группы используется локальная шина, а на верхнем уровне иерархии – непрерывные трассы FastTrack, связывающие отдаленные части схем.

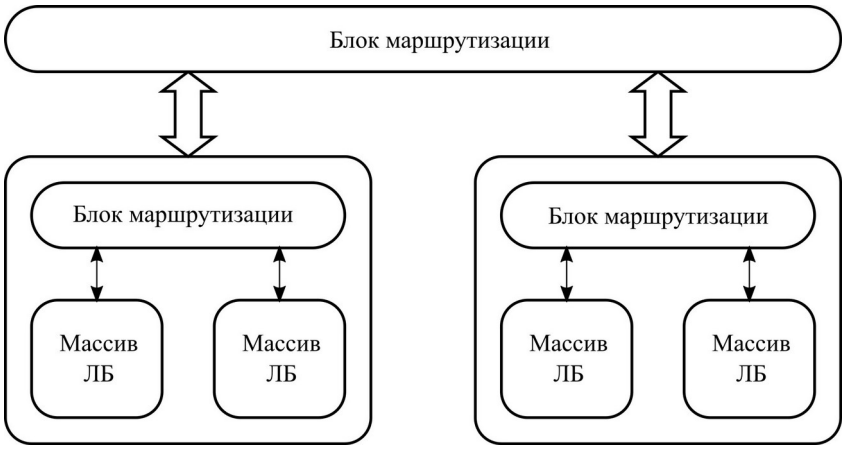


Рис.4. Структура иерархической ПЛИС Altera серии APEX [18]
Fig.4. Altera APEX FPGA [18]

В ПЛИС соединения для коммутации могут быть реализованы в двух исполнениях: single-driver и multi-driver (рис.5) [20]. В случае применения исполнения multi-driver используются двунаправленные соединения и ключи (буфера с третьим состоянием), в то время как в single-driver – однонаправленные. В настоящее время наиболее распространенным типом являются соединения single-driver.

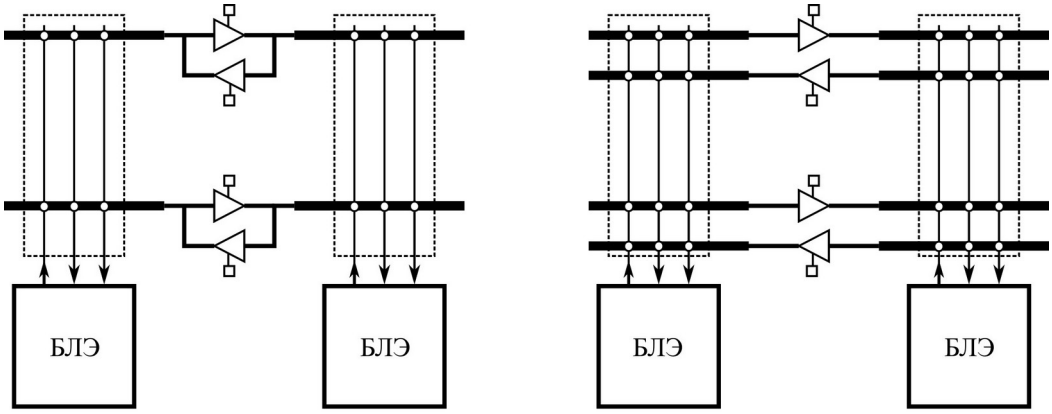


Рис.5. Соединения в ПЛИС: *а* – multi-driver; *б* – single-driver [20]
Fig.5. Connections in FPGA: *a* – multi-driver; *b* – single-driver [20]

Модели и методы анализа коммутационных ресурсов ПЛИС. Разработка моделей и методов анализа коммутационных ресурсов началась с появлением на рынке первых ПЛИС. Наиболее ранними являются экспериментальные методы, суть которых состоит в прохождении полного маршрута проектирования на наборе тестовых схем [1–5] с последующим анализом эффективности коммутационных ресурсов разрабатываемой ПЛИС с помощью точных моделей площади, мощности и задержек [21, 22]. При использовании данных методов выбор оптимальной структуры коммутационных ресурсов зависит от архитектора, решения которого базируются на полученных результатах и опыте проектирования.

На рис.6 представлен один из возможных маршрутов проектирования, который описан в работе [2]. В качестве входных данных используются описание архитектуры ПЛИС и набор тестовых схем (benchmark circuits). На первом этапе выполняются логический синтез (logic synthesis) и технологическое отображение (technology mapping) тестовых схем. На втором этапе осуществляются кластеризация, размещение и трассировка полученных нетлистов с оптимизацией задержек. В качестве критериев выбора оптимальной архитектуры применяются площадь и задержки тестируемых схем. Аналогичный маршрут для ПЛИС с крупномодульной архитектурой предложен в работе [3]. В [4] авторы представили алгоритм fGREP, который позволяет вычислить перегруженность блоков маршрутизации с учетом размещения схем в островных ПЛИС и оценить требуемую ширину канала *W*.

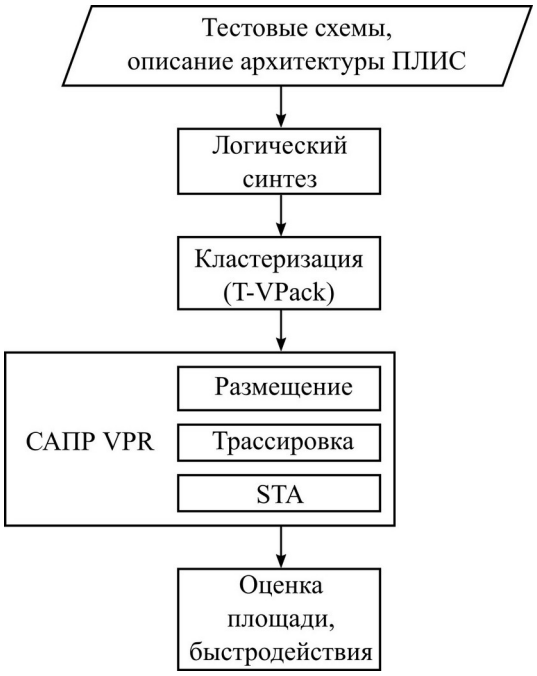


Рис.6. Маршрут проектирования в САПР VPR [2]
Fig.6. VPR CAD flow [2]

Существуют также экспериментальные методы, в которых не требуется полного прохождения маршрута проектирования. Например, в работе [5] предложен модифицированный метод Монте-Карло для бы-

строй оценки коммутационных ресурсов ПЛИС. В данном методе в коммутационном графе ПЛИС случайным образом удаляется K % ребер, после чего для всех возможных наборов пар источник-приемник выполняется трассировка. Повторив операцию множество раз для различных вариантов модифицированного коммутационного графа, можно получить зависимость трассируемости от K и, соответственно, трассируемость анализируемой коммутационной структуры ПЛИС. Недостатком данного алгоритма является отсутствие многотерминальных цепей, которые могут существенно влиять на оценку архитектуры ПЛИС.

Ключевым преимуществом экспериментального подхода является его высокая точность. Тем не менее экспериментальный подход содержит ряд существенных недостатков, которые ограничивают его применение для анализа коммутационных ресурсов при проектировании отечественных ПЛИС.

Во-первых, прохождение полного маршрута занимает много времени, а для получения статистически достоверных результатов необходимо большое количество экспериментов на широком наборе тестовых схем. С учетом того что для современных ПЛИС, содержащих миллионы логических вентилей, полный маршрут может занять несколько дней [23], анализ различных структур коммутационных ресурсов ПЛИС на наборах тестовых схем может занять недели и даже месяцы, что неприемлемо в современных условиях. Например, пусть имеем две ПЛИС стандартной островной архитектуры для анализа на наборе из 20 тестовых схем. Островная ПЛИС может быть описана пятью параметрами [24]. Допустим, что каждый из параметров может принимать пять значений. Тогда, если прохождение полного маршрута в среднем занимает 15 мин и есть возможность одновременно тестировать не более десяти схем, то суммарное время составит $2 \cdot 5^5 \cdot 20 \cdot 15/10 = 187\,500$ мин, или 130 дней.

Во-вторых, для прохождения полного маршрута требуется наличие полноценной САПР, оптимизированной с учетом каждой архитектуры ПЛИС [21, 25–27]. В противном случае результаты экспериментов могут привести разработчика к неверным архитектурным решениям.

В-третьих, несмотря на точность, экспериментальный подход не раскрывает истинных причин, по которым одна коммутационная структура эффективнее другой.

Проблемы экспериментального подхода побудили исследователей к разработке теоретических методов [6–13]. В отличие от экспериментальных теоретические методы дают возможность выполнить быстрый эвристический анализ и оценку коммутационных ресурсов ПЛИС и тем самым ускорить разработку ПЛИС и ее выход на рынок.

Одни из первых работ по теоретическим методам [6, 7] базируются на стохастической модели Эль Гамаля [28], предназначенной для предсказания количества требуемых трассировочных ресурсов в БМК:

$$W = \lambda R/2, \tag{1}$$

где W – ширина канала; λ – среднее количество контактов ячеек; R – средняя длина цепей.

В работе [6] показано, что данная модель для БМК достаточно точно позволяет оценить ширину каналов в ПЛИС. Также в [6] описана стохастическая модель, которая позволяет оценить вероятность успешной трассировки для островных ПЛИС с максимальной длиной соединений $L = 1$. Вероятность успешной трассировки вычисляется по формуле

$$Routability = \frac{1}{C_T} \sum_{i=1}^{C_T} P\left(R_{C_i}\right),$$

где C_T – множество двухтерминальных соединений; R_{C_i} – статистическое событие (успешная трассировка); $P(R_{C_i})$ – вероятность успешной трассировки C_i.

Работы Эль Гамаля и Брауна получили развитие в [8], где представлена новая аналитическая модель, которая также позволяет оценить вероятность успешной трассировки в ПЛИС.

В работе [7] для оценки трассируемости схем в ПЛИС применяется модифицированная модель Эль Гамаля. Среднее количество контактов ячеек λ' пересчитывается с учетом многотерминальных цепей, а для вычисления средней длины цепей применяется модель Файера [29]. В данной модели выделяется средняя длина внутренних R_i и внешних R_e цепей в области радиусом A, поэтому формула (1) преобразуется для вычисления требуемой ширины канала W_i и W_e:

$$W_i = \frac{\lambda' R_i}{2}, \quad W_e = \frac{\lambda' R_e}{2}.$$

Зная значения данных величин, а также заданную ширину W канала ПЛИС и количество соединений W_d, связывающих напрямую выход элемента с соседними БЛЭ, авторы выводят условия, при которых схема трассируема в данной ПЛИС:

$$W_e > 0{,}5 + I_G \text{ или } W_i > I_G + I_D + 0{,}5 \text{ – схема нетрассируема,}$$
$$W_e < I_G - 0{,}5 \text{ и } W_i < I_G + I_D + 0{,}5 \text{ – схема трассируема.}$$

Стохастические модели не получили большого развития ввиду невозможности учета различных схем коммутаций и прямых соединений с разной длиной. Другие методы оценки коммутационных ресурсов ПЛИС часто основаны на правиле Рента [30] – эмпирической зависимости между средними размерами подсхем и количеством их контактов:

$$T = kN^p,$$

где T – среднее количество контактов подсхем; k – среднее количество контактов логических элементов в подсхемах (коэффициент Рента); N – количество логических элементов в подсхемах; p – экспонента Рента.

На правиле Рента для оценки длины межсоединений основана модель Файера.

В работе [9] с использованием правила Рента представлена аналитическая модель для оценки коммутационных ресурсов ПЛИС без опоры на экспериментальные данные. Входные данные модели разбиты на три группы:

1) архитектурные параметры – количество входов K в БЛЭ, количество БЛЭ N в логическом блоке, количество входов I в логический блок;

2) схемные параметры – параметр Рента p схемы, количество элементов n_2 в схеме после технологического отображения в библиотеку из двух входовых элементов и ее глубина d_2;

3) среднее количество неиспользуемых входов γ БЛЭ.

При получении входных данных модель позволяет вычислить количество БЛЭ в ЛБ, необходимых для реализации схемы, среднее количество входов и выходов, используемых в КЛБ, и другие параметры для оценки количества требуемых ресурсов ПЛИС по сравнению с доступными.

В работах [10, 11] представлено решение проблемы определения оптимальных размеров транзисторов (transistor sizing) и параметров архитектуры ПЛИС (N, K, I, F_c) с помощью геометрического программирования.

Метод Wotan для оценки трассируемости для широкого спектра архитектур без использования тестового набора схем на основе надежности сетей представлен в работе [12]. В основе данного метода лежат алгоритм на основе подсчета путей в коммутаци-

онном графе, методы из комбинаторики и теории вероятности, которые позволяют оценить вероятность перегруженности вершин и успешной трассировки источников сигналов до ближайших приемников. В качестве исходных данных Wotan использует коммутационный граф и распределение вероятности длин цепей $P(l)$. Результатом является некоторое число, которое представляет собой абсолютную оценку трассируемости архитектуры ПЛИС, исполненную в виде графа коммутаций. Маршрут Wotan состоит из трех этапов:

1) вычисление перегруженности вершин коммутационного графа;
2) анализ трассируемости пар источник-приемник;
3) вычисление метрики трассируемости.

Основными преимуществами данного метода являются его универсальность и независимость от коммутационной структуры ПЛИС, а также отсутствие необходимости в прохождении полного маршрута проектирования. Однако, как и в работе [6], Wotan при анализе трассируемости не учитывает многотерминальные цепи, что приводит к неточной оценке некоторых архитектур.

Несмотря на то что теоретические модели позволяют обнаружить зависимости между архитектурными параметрами ПЛИС, они менее точны, чем экспериментальные, так как не всегда можно вывести правильные зависимости и учесть все факторы, влияющие на точность модели. Поэтому, помимо теоретического и экспериментального подхода, получил развитие и смешанный подход к оценке коммутационных ресурсов ПЛИС [24]. Данный подход, с одной стороны, может быть точнее, чем теоретический, за счет построения модели на основе точных данных. С другой стороны, сильное влияние на качество моделей может оказать набор тестовых схем и качество применяемой САПР.

Смешанный подход применен в работе [24], в которой представлена аналитическая модель для оценки ПЛИС с островной архитектурой, позволяющая дать оценку требуемой ширине канала W_{need}. Для получения зависимостей использовался набор тестовых схем, равномерно разделенных на две группы: обучающую, по которой строится модель, и контрольную, по которой оценивается точность модели. Полученная зависимость требуемой ширины канала W_{need} имеет следующий вид:

$$W_{need} = W_{abs_\min} + \frac{1}{\beta}\left(\frac{W_{abs_\min}}{F_s}\right)\left(\frac{W_{abs_\min}}{F_{c_{in}}}\right)^{\alpha_{in}}\left(\frac{W_{abs_\min}}{F_{c_{out}}}\right)^{\alpha_{out}} + \frac{\lambda(L-1)}{4}\left(1+\frac{1}{F_{c_{in}}^{\alpha_{in}}}\right). \qquad (2)$$

Здесь $W_{abs_\min}$ – минимальная ширина канала, необходимая для успешной трассировки в ПЛИС с максимальной гибкостью, которая вычисляется по модифицированной формуле (1), где $R = 4{,}43$; $\lambda = 0{,}88N + 3{,}2 = [I = 2N + 2] = 0{,}44I + 2{,}3$; $F_{c_{in}}$, $F_{c_{out}}$ – коэффициенты для входов и выходов БЛЭ; $\beta = 3$, $\alpha_{in} = 0{,}5$, $\alpha_{out} = 0{,}25$ – параметры для подстройки модели.

В (2) второе слагаемое учитывает влияние коэффициента разветвления БК и БМ, третье – влияние соединений $L > 1$. Если в ПЛИС контакты БЛЭ не эквивалентны ($Eqv = 0$), то средняя длина R в (1) заменяется на σR, где $\sigma = 1{,}166$, а $F_{c_{in}}$ заменяется на $F_{c_{in}}/\mu$, где $\mu = 0{,}33$.

В таблице приведены существующие методы оценки коммутационных ресурсов ПЛИС. Как видно из таблицы, большинство методов и моделей имеют похожий набор входных данных, при использовании которого можно дать оценку различным аспектам архитектуры ПЛИС.

Методы и модели оценки коммутационных ресурсов
Summary of work on FPGA modeling

Источник	Вход	Выход
[13]	1. Параметры логики ПЛИС (N, K, I) 2. Параметр Рента p схемы 3. Количество 2-входовых ячеек LUT в схеме	Оценка логических ресурсов ПЛИС (количество используемых входов i и выходов o, средний размер ЛБ n_k и др.)
[10]	1. Параметры логики ПЛИС 2. Параметр Рента p схемы 3. Количество 2-входовых ячеек LUT в схеме и ее глубина	1. Оценка площади и задержек 2. Размеры транзисторов в коммутационных ресурсах
[6]	1. Параметры логики ПЛИС 2. Параметры коммутационных ресурсов ПЛИС ($F_{c_{in}}$, $F_{c_{out}}$, F_s) 3. Средняя длина цепей R 4. Ширина канала W	Оценка трассируемости схем в ПЛИС
[7]	1. Параметры логики ПЛИС 2. Средняя длина цепей R	Оценка трассируемости схем в ПЛИС
[8]	1. Параметры логики ПЛИС 2. Параметры коммутационных ресурсов ПЛИС 3. Количество цепей в схеме и их средняя / максимальная длина после размещения	
[12]	1. Коммутационный граф ПЛИС 2. Распределение длин цепей $P(l)$	
[9]	1. Параметры логики ПЛИС 2. Параметр Рента p схемы 3. Количество 2-входовых ячеек LUT в схеме и ее глубина	Оценка логических ресурсов ПЛИС
[19]	1. Параметры коммутационных ресурсов ПЛИС ($F_{c_{in}}$, $F_{c_{out}}$, F_s, L, Eqv) 2. Средняя длина цепей R	Требуемая ширина канала W_{need}

Заключение. Обзор методов и моделей для решения задачи анализа и оценки структуры трассировочных ресурсов на ранних этапах проектирования позволяет сделать следующие выводы о возможности их применения при проектировании отечественных ПЛИС:

- теоретические методы и модели могут успешно применяться на ранних этапах проектирования для выбора правильного направления развития структуры коммутационных ресурсов ПЛИС;

- экспериментальные методы и модели могут успешно применяться для проверки результатов теоретических методов и их уточнения.

Оптимальным подходом для анализа произвольных структур коммутационных ресурсов отечественных ПЛИС является разработка и применение смешанных методов, которые позволят не только получить точные модели, но и значительно сократить время разработки и выхода на рынок.

Литература

1. ***Li X., Yang H., Zhong H.*** Use of VPR in design of FPGA architecture // 2006 8th Intern. Conf. on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings (Shanghai, China, 2004). IEEE, 2006. P. 1880–1882.

2. VPR 5.0: FPGA CAD and architecture exploration tools with single-driver routing, heterogeneity and process scaling / ***J. Luu, I Kuon, P. Jamieson et al.*** (Monterey, California, USA, 2008). ACM, 2008. P. 133–142.

3. ***Parvez H., Marrakchi Z., Farooq U., Mehrez H.*** A new coarse-grained FPGA architecture exploration environment // 2008 Intern. Conf. on Field-Programmable Technology (Taipei, Taiwan, 2008). IEEE, 2008. P. 285–288.

4. ***Kannan P., Balachandran S., Bhatia D.*** On metrics for comparing routability estimation methods for FPGAs // Proc. 2002 Design Automation Conference (IEEE Cat. No.02CH37324) (New Orleans, LA, USA, 2002). IEEE, 2002. P. 70–75.

5. A novel Monte-Carlo method for FPGA architecture research / ***Gao Hai-xia, Ma Xiao-hua, Shi Ming-hua et al.*** // Proc. 7th Intern. Conf. on Solid-State and Integrated Circuits Technology (Beijing, China, 2004). IEEE. 2004. Vol. 3. P. 1944–1947.

6. ***Brown S.D., Rose J., Vranesic Z.G.*** A stochastic model to predict the routability of field-programmable gate arrays: 12 // IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst. 1993. Vol. 12, No. 12. P. 1827–1838.

7. ***Chan P.K., Schlag M.D.F., Zien J.Y.*** On routability prediction for field-programmable gate arrays // Pro. of the 30th International on design automation conference - DAC ’93. Dallas (Texas, United States, 1993). ACM Press, 1993. P. 326–330.

8. ***Das J., Wilton S.J.E.*** Towards development of an analytical model relating FPGA architecture parameters to routability // ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst. 2013. Vol. 6. No. 2. P. 1–24.

9. An analytical model relating FPGA architecture to logic density and depth / ***J. Das, A. Lam, S.J.E Wilton et al.*** // IEEE Trans. VLSI Syst. 2011. Vol. 19. No.12. P. 2229–2242.

10. ***Smith A.M., Constantinides G.A., Wilton S.J.E., Cheung P.Y.K.*** Concurrently optimizing FPGA architecture parameters and transistor sizing: Implications for FPGA design // 2009 International Conf. on Field-Programmable Technology (Sydney, Australia, 2009). IEEE. 2009. P. 54–61.

11. ***Smith A.M., Constantinides G.A., Cheung P.Y.K.*** Fpga architecture optimization using geometric programming // ieee trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst. 2010. Vol. 29. No. 8. P. 1163–1176.

12. ***Petelin O., Betz V.*** Wotan: evaluating FPGA architecture routability without benchmarks // ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst. 2018. Vol. 11. No. 2. P. 1–23.

13. ***Lam A., Wilton S.J.E., Leong P., Luk W.*** An analytical model describing the relationships between logic architecture and FPGA density // 2008 Intern. Conf. on Field Programmable Logic and Applications (Heidelberg, Germany, 2008). IEEE. 2008. P. 221–226.

14. 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. No. 3. P. 176–186. DOI:10.1134/s1063739719030053

15. XC4000E and XC4000X series field programmable gate arrays / Xilinx. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/4000.pdf (дата обращения: 04.06.2020).

16. Stratix II Device Handbook, Volume 1 / Intel. URL: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/stx2/stratix2_handbook.pdf (дата обращения: 10.06.2020).

17. ***Rose J., Brown S.*** Flexibility of interconnection structures for field-programmable gate arrays // IEEE J. Solid-State Circuits. 1991. Vol. 26. No. 3. P. 277–282.

18. APEX 20K Programmable Logic Device Family Data Sheet / Intel. URL: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/ds/archives/apex.pdf (дата обращения: 26.05.2020)

19. FLEX 10K Embedded Programmable Logic Family Data Sheet / Intel. URL: https://edg.uchicago.edu/~bogdan/prefred/doc/parts/10k.pdf (дата обращения: 10.06.2020).

20. ***Lemieux G., Lee E., Tom M., Yu A.*** Directional and single-driver wires in FPGA interconnect // Proceedings. 2004 IEEE International Conference on Field- Programmable Technology (IEEE Cat. No.04EX921) (Brisbane, NSW, Australia, 2004). IEEE. 2004. P. 41–48.

21. ***Frolova P.I., Chochaev R.Z., Ivanova G.A., Gavrilov S.V.*** Delay matrix based timing-driven placement for reconfigurable systems-on-chip // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020 г.). 2020. P. 1799 – 1803.

22. ***Стемпковский А.Л., Гаврилов С.В., Каграманян Э.Р.*** Методы логико-временного анализа заказных блоков СБИС // Изв. вузов. Электроника. 2008. № 5. С. 41–50.

23. Titan: Enabling large and complex benchmarks in academic CAD / ***K.E. Murray, S Whitty., S Liu et al.*** // 2013 23rd Intern. Conf. on Field programmable Logic and Applications (Porto, Portugal, 2013). IEEE, 2013. P. 1–8.

24. ***Fang W.M., Rose J.*** Modeling routing demand for early-stage FPGA architecture development // Proc. of the 16th International ACM/SIGDA symposium on Field Programmable Gate Arrays - FPGA ’08 (Monterey, California, USA, 2008). ACM Press, 2008. P. 139.

25. ***Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Khvatov V.M., Chochaev R.Z.*** Clustering optimization based on simulated annealing algorithm for reconfigurable systems-on-chip // 2018 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2018. P. 1492 – 1495.

26. ***Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Chochaev R.Z.*** Simulated annealing based placement optimization for reconfigurable systems-on-chip // 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. Moscow, 2019. P. 1597–1600.

27. ***Vasilyev N., Ryzhova D., Tiunov I.*** Resynthesis for FPGA during technology mapping stage // 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. Moscow, 2019. P. 1644–1647.

28. ***Gamal A.E.*** Two-dimensional stochastic model for interconnections in master slice integrated circuits // IEEE Trans. Circuits Syst. 1981. Vol. 28. No. 2. P. 127–138.

29. ***Feuer M.*** Connectivity of random logic: 1 // IEEE Trans. Comput. 1982. Vol. C–31. No. 1. P. 29–33.

30. ***Landman B.S., Russo R.L.*** On a pin versus block relationship for partitions of logic graphs: 12 // IEEE Trans. Comput. 1971. Vol. C–20. No. 12. P. 1469–1479.

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.; после доработки 22.04.2020 г.; принята к публикации 30.06.2020 г.

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

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

Иванова Галина Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела САПР Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), ivanova_g@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 микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sergey_g@ippm.ru

Эннс Виктор Иванович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по разработкам и внедрению микросхем специального и космического назначения ОАО «НИИМЭ» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 12/1), venns@niime.ru

References

1. Li X., Yang H., Zhong H. Use of VPR in design of FPGA architecture. *2006 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings*. IEEE, 2006, pp. 1880–1882.

2. Luu J. Luu J., Kuon I., Jamieson P., Campbell T., Ye A., Fang M., Rose J. *VPR 5.0: FPGA CAD and architecture exploration tools with single-driver routing, heterogeneity and process scaling*. Monterey. California, USA: ACM, 2008, pp. 133–142.

3. Parvez H., Marrakchi Z., Farooq U., Mehrez H. A new coarse-grained FPGA architecture exploration environment. *2008 International Conference on Field-Programmable Technology.* IEEE, 2008, pp. 285–288.

4. Kannan P., Balachandran S., Bhatia D. On metrics for comparing routability estimation methods for FPGAs. *Proceedings 2002 Design Automation Conference (IEEE Cat. No.02CH37324*). IEEE, 2002, pp. 70–75.

5. Gao Hai-xia, Ma Xiao-hua, Shi Ming-hua, Zhou Duan, Yang Yin-tang. A novel Monte-Carlo method for FPGA architecture research. *Proceedings 7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology, 2004*. IEEE, 2004, vol. 3, pp. 1944–1947.

6. Brown S.D., Rose J., Vranesic Z.G. A stochastic model to predict the routability of field-programmable gate arrays: 12. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.,* 1993, vol. 12, no. 12, pp. 1827–1838.

7. Chan P.K., Schlag M.D.F., Zien J.Y. On routability prediction for field-programmable gate arrays. *Proceedings of the 30th international on Design automation conference - DAC '93*. Dallas, Texas, United States: ACM Press, 1993, pp. 326–330.

8. Das J., Wilton S.J.E. Towards development of an analytical model relating FPGA architecture parameters to routability. *ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst.*, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 1–24.

9. Das J., Lam A., Wilton S.J.E., Leong P.H.W., Luk W. An analytical model relating FPGA architecture to logic density and depth. *IEEE Trans. VLSI Syst.,* 2011, vol. 19, no. 12, pp. 2229–2242.

10. Smith A.M., Constantinides G.A., Wilton S.J.E., Cheung P.Y.K. Concurrently optimizing FPGA architecture parameters and transistor sizing: Implications for FPGA design. *2009 International Conference on Field-Programmable Technology.* IEEE, 2009, pp. 54–61.

11. Smith A.M., Constantinides G.A., Cheung P.Y.K. FPGA architecture optimization using geometric programming. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst*., 2010, vol. 29, no. 8, pp. 1163–1176.

12. Petelin O., Betz V. Wotan: evaluating FPGA architecture routability without benchmarks. *ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst*., 2018, vol. 11, no. 2, pp. 1–23.

13. Lam A., Wilton S.J.E., Leong P., Luk W. An analytical model describing the relationships between logic architecture and FPGA density. *2008 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. Heidelberg, Germany: IEEE, 2008. P. 221–226.

14. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A., Chochaev R.Z., Enns V.I. Layout synthesis design flow for special-purpose reconfigurable systems-on-a-chip. *Russian Microelectronics,* 2019, vol. 48, no. 3, pp. 176–186. DOI:10.1134/s1063739719030053

15. *XC4000E and XC4000X Series Field Programmable Gate Arrays / Xilinx*. Available at: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/4000.pdf (accessed: 04.06.2020)

16. *Stratix II Device Handbook, Volume 1. / Intel.* Available at: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/stx2/stratix2_handbook.pdf (accessed: 10.06.2020)

17. Rose J., Brown S. Flexibility of interconnection structures for field-programmable gate arrays. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1991, vol. 26, no. 3, pp. 277–282.

18. *APEX 20K Programmable Logic Device Family Data Sheet / Intel.* Available at: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/ds/archives/apex.pdf (accessed: 26.05.2020)

19. *FLEX 10K Embedded Programmable Logic Family Data Sheet / Intel.* Available at: https://edg.uchicago.edu/~bogdan/prefred/doc/parts/10k.pdf (accessed: 10.06.2020)

20. Lemieux G., Lee E., Tom M., Yu A. Directional and single-driver wires in FPGA interconnect. *Proceedings 2004 IEEE International Conference on Field- Programmable Technology (IEEE Cat. No.04EX921).* IEEE, 2004, pp. 41–48.

21. Frolova P.I., Chochaev R.Z., Ivanova G.A., Gavrilov S.V. Delay matrix based timing-driven placement for reconfigurable systems-on-chip. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St. Petersburg and Moscow, 2020, pp. 1799–1803.

22. Stempkovskij A.L., Gavrilov S.V., Kagramanjan E.R. Metody logiko-vremennogo analiza zakaznyh blokov SBIS. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics,* 2008, no. 5, pp. 41–50. (in Russian).

23. Murray K.E., Whitty S., Liu S., Luu J., Betz V. Titan: Enabling large and complex benchmarks in academic CAD. *2013 23rd International Conference on Field programmable Logic and Applications. Porto, Portugal: IEEE*, 2013, pp. 1–8.

24.Fang W.M., Rose J. Modeling routing demand for early-stage FPGA architecture development. *Proceedings of the 16th international ACM/SIGDA symposium on Field programmable gate arrays - FPGA '08*. Monterey, California, USA, ACM Press, 2008. P. 139.

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

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

27.Vasilyev N., Ryzhova D., Tiunov I. Resynthesis for FPGA during technology mapping stage. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Moscow, 2019, pp. 1644–1647.

28. Gamal A.E. Two-dimensional stochastic model for interconnections in master slice integrated circuits. *IEEE Trans. Circuits Syst.,* 1981, vol. 28, no. 2, pp. 127–138.

29. Feuer. Connectivity of Random Logic: 1. *IEEE Trans. Comput.*, 1982, vol. C–31, no. 1, pp. 29–33.

30. Landman B.S., Russo R.L. On a pin versus block relationship for partitions of logic graphs: 12. *IEEE Trans. Comput.,* 1971, vol. C–20, no. 12, pp. 1469–1479.

Received 22.04.2020; Revised 22.04.2020; Accepted 30.06.2020.

Information about the authors:

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

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

Galina A. Ivanova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of CAD Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), ivanova_g@ippm.ru

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

Victor I. Enns – Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director of the Development and Implementation Space & Special Purpose Chips, Molecular Electronics Research Institute (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Akademik Valiev st., 12/1), venns@niime.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

УДК 621.311.6:621.382.3 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-423-431

Импульсный DC/DC-преобразователь напряжения с уменьшенными массогабаритными параметрами

Е.А. Иванов, А.Н. Якунин

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

jonny-evildream@yandex.ru

При изготовлении преобразователей энергии значительное внимание уделяется высокой надежности при максимальной их миниатюризации. Также к конструкции и технологии создания преобразователей энергии предъявляются жесткие требования в части эффективного отвода тепла. В работе рассмотрена концепция изготовления DC/DC-преобразователей энергии с уменьшенными массогабаритными параметрами за счет отказа от систем отвода тепла. Предложено использовать коммутационные платы на основе алюмонитридной керамики, имеющей теплопроводность 180–200 Вт/(м·К). Для дополнительного снижения потерь энергии на перегрев компонентов (в преобразователь энергии) интегрирована цифровая система управления процессом коммутации силовых ключей. Значительное снижение высоты экспериментального образца достигнуто заменой моточного трансформатора на планарный. Отработка концепции на экспериментальном образце позволила получить следующие результаты: увеличена удельная мощность с 2,18 до 3,23 кВт/дм^3; увеличена пиковая удельная мощность с 5,66 до 8,4 кВт/дм^3; снижена высота с 32 до 13 мм; уменьшен объем с 0,115 до 0,077 дм^3; увеличен КПД с 85 до 88,6 %.

Ключевые слова: алюмонитридная керамика; квазирезонансная коммутация; транзисторы; цифровая система управления; планарный трансформатор

Для цитирования: Иванов Е.А., Якунин А.Н. Импульсный DC/DC-преобразователь напряжения с уменьшенными массогабаритными параметрами // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 423–431. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-423-431

© Е.А. Иванов, А.Н. Якунин, 2020

Pulse DC/DC Voltage Converter with Reduced Weight and Size Parameters

E.A. Ivanov, A.N. Yakunin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

jonny-evildream@yandex.ru

Abstract: In development of energy converter for feeding the phase rotators and modulators in the system of active phased antenna lattice special requirements to sizes with the specified nominal and peak power of the converter have been presented. In the paper, the concept of manufacturing DC/DC energy converter with reduced weight and size parameters has been presented. It has been proposed to use the switching boards based on aluminitride ceramic with a thermal conductivity of 180–200 W / (m·K). To further reduce the energy losses due to overheating of the components, a digital control system for switching the power switches has been used. A significant reduction in height corresponds to the replacement of a coil transformer with a planar one. The following results can be achieved: an increase of specific power from 2.18 to 3.23 kW / dm^3; an increase of peak specific power from 5.66 to 8.4 kW / dm^3; a reduction of the height of the experimental sample from 32 to 13 mm; a decrease of volume from 0.115 to 0.0773; an increase of efficiency from 85 to 88.6%.

Keywords: alumnitride ceramic; quasi-resonant switching; transistors; digital control system; planar transformer

For citation: Ivanov E.A., Yakunin A.N. Pulse DC/DC voltage converter with reduced weight and size parameters. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 423–431. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-423-431

Введение. При разработке преобразователя энергии для питания фазовращателей и модуляторов в системе активной фазированной антенной решетки (АФАР) особые требования предъявляются к габаритным размерам при заданных номинальной и пиковой мощностях преобразователя. Это связано с тем, что в радиолокационных станциях с АФАР преобразователи энергии монтируются в два ряда и ограничиваются жесткими массогабаритными параметрами. Значительная пиковая удельная мощность при КПД существующих преобразователей порядка 80 % предъявляет жесткие требования к конструкции и технологии создания преобразователя в части эффективного отвода тепла. Расчеты показывают, что использование в конструкции преобразователя энергии традиционных полимерных материалов (стеклотекстолита, полиимида, тефлона и т.п.), применяемых в современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА), не позволяет достичь требуемых максимальных значений удельной мощности из-за значительного перегрева изделия.

Коммутационные платы на основе DBC-керамики. Эффективный отвод тепла может быть реализован при использовании керамических коммутационных плат на основе DBC-керамики (Direct Bond Copper) – алюмооксидной или алюмонитридной керамики, плакированной толстой медной фольгой. DBC-керамика позволяет монтиро-

вать коммутационную плату непосредственно на базовое металлическое основание и обеспечивает малое тепловое сопротивление перехода между платой и основанием. Теплопроводность керамики более чем на два порядка выше по сравнению с теплопроводностью полимерных материалов, традиционно используемых для производства коммутационных плат: 24 Вт/(м·К) для алюмооксидной, 180–200 Вт/(м·К) для алюмонитридной керамики и 0,1–0,5 Вт/(м·К) для полимеров). При плотном контакте коммутационной платы с базовым металлическим основанием создаются условия для надежного отвода тепла даже при высокой удельной мощности преобразователя энергии.

Кроме того, коммутационные платы на основе керамических материалов характеризуются механической стабильностью и сохранением линейных размеров; хорошими электрическими характеристиками, в том числе в СВЧ-диапазоне; высокой радиационной стойкостью; стабильностью эксплуатационных параметров в широком диапазоне изменения свойств окружающей среды, в частности температуры и влажности. Это особенно важно при эксплуатации аппаратуры в условиях космического пространства [1–6].

Применение в конструкции РЭА керамических коммутационных плат хорошо сочетается с внедрением цифровых систем управления процессами преобразователей энергии. Перспективные методики построения преобразователей энергии [7, 8] на основе квазирезонансных подходов при коммутации транзисторов [9] позволяют дополнительно снизить теряемую в тепло энергию в процессе работы источника питания. Цифровая система управления по сравнению с аналоговой дает возможность уменьшить массогабаритные параметры за счет применения меньшего числа компонентов и имеет следующие преимущества: микроконтроллер выполняет корректировку рабочей точки в процессе работы преобразователя энергии; возможна реализация синхронного выпрямления во вторичной цепи параллельно с дополнительными функциями микроконтроллера; возможно применение гальванической высокоскоростной развязки без оптопар, имеющих ограничения при работе в космосе.

Таким образом, применение DBC-керамики в конструкции преобразователей энергии и вторичных источников питания, а также систем управления, основанных на квазирезонансных подходах, позволяет значительно снизить массогабаритные показатели (рис.1) и увеличить при этом удельную мощность по сравнению с существующими аналогами.

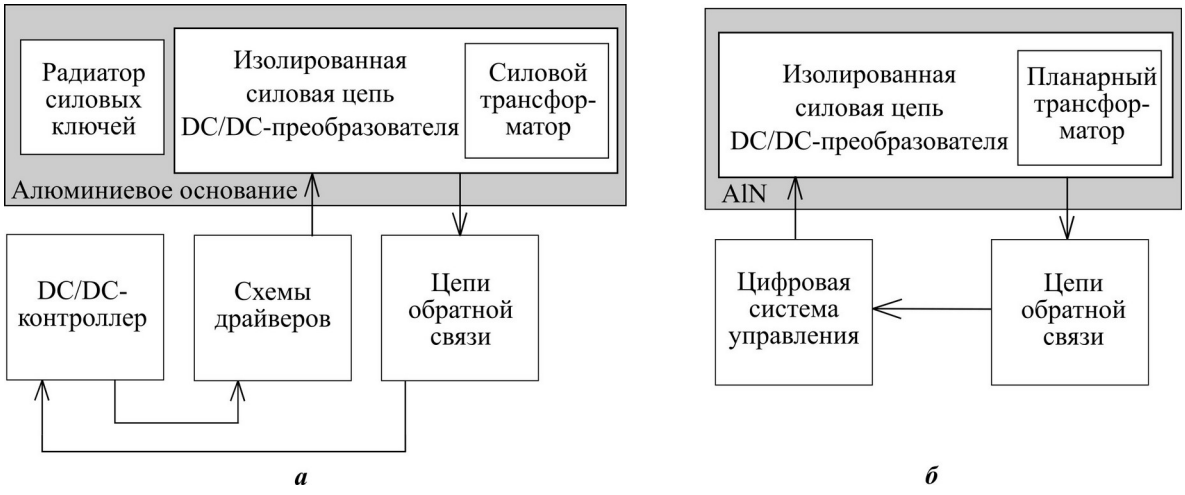


Рис.1. Упрощенная структурная схема DC/DC-преобразователя напряжения: *а* – исходная; *б* – после введения концептуальных составляющих

Fig.1. Simplified block diagram of a DC/DC voltage converter: *a* – initial; *b* – after the introduction of conceptual components

Принцип построения преобразователя. Рассмотрим концепцию построения высокоэффективных преобразователей энергии на образце, созданном на основе алюмонитридной (AlN) керамики в качестве теплоотводящей основы для силовой части преобразователя энергии. Цифровая система управления основана на современном квазирезонансном подходе к коммутации силового транзистора. Моточный трансформатор заменен на полиимидный планарный. Конструкция образца представлена на рис.2.

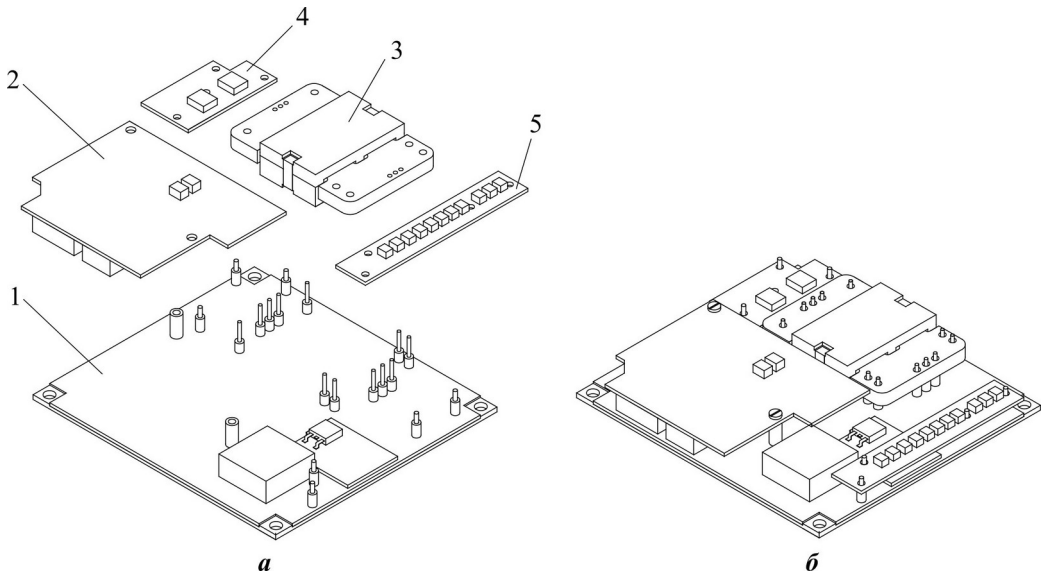


Рис.2. Конструкция преобразователя энергии: *а* – 1 – силовой блок преобразователя энергии; 2 – блок цифрового управления; 3 – планарный трансформатор; 4 – входной фильтр; 5 – выходной фильтр; *б* – образец в сборке

Fig.2. The design of the energy converter: *a* – 1 – power unit of the energy converter; 2 – digital control unit; 3 – planar transformer; 4 – input filter; 5 – output filter; *b* – sample in the build

Силовой блок преобразователя энергии выполнен из медного основания толщиной 0,5 мм. К силовому блоку припаяна алюмонитридная плата со смонтированными на ней компонентами, требующими отвода тепла. Алюмонитридный материал силовой платы выбран по результатам испытаний конструкции макетных образов (рис.3). В ходе испытаний на смонтированный резистор 2512 номиналом 100 Ом подавалось напряжение 10,1 В и измерялась температура его поверхности. Разность температур равна $\Delta T = T_i - T_0$, где T_i, T_0 – соответственно температура поверхности резистора в фиксируемый и начальный моменты времени.

Керамическая плата рассматриваемого преобразователя энергии выполнена на основе DBC-керамики (рис.4) при толщине диэлектрического слоя 130 мкм и толщине фольги 380 мкм. Переходные отверстия в керамике сделаны по типу колодца с дополнительными операциями гальванического заращивания этих отверстий медью с предварительной уникальной обработкой после лазерного удаления AlN. Такая особенность вызвана трудностью обработки керамики механическими способами, в частности сверлением, вследствие ее хрупкости. Альтернативная технология создания переходных металлизированных отверстий делает возможным выполнение топологического рисунка меди на обоих слоях керамической подложки. Двусторонняя трассировка сокращает площадь преобразователя энергии, определяемую размером керамической платы, с 7650 до 6957 мм^2. Значительная толщина медной фольги силовой платы при ширине проводников 2 мм позволяет преобразователю энергии выдавать в нагрузку в импульсном режиме токи до 25 А при 28 В.

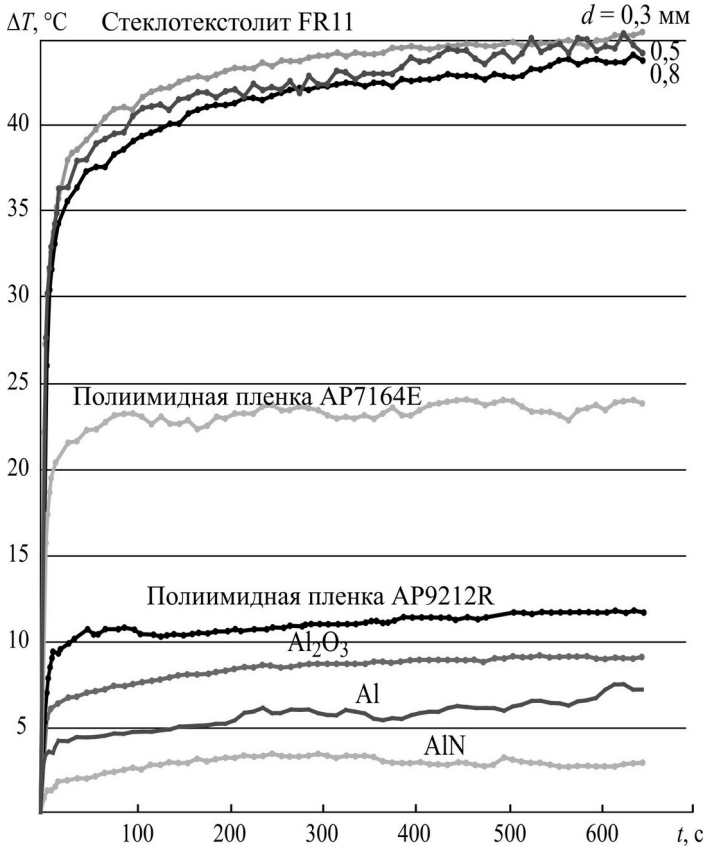


Рис.3. Результаты испытаний образцов различных материалов на возможность отвода тепла
Fig.3. Test result of samples of various materials for the possibility of heat removal

Цифровой блок управления не нуждается в значительном отводе тепла и может быть выполнен на стеклотекстолитовой основе толщиной 0,5 мм с фольгой толщиной 18 мкм. Особенность данного блока заключается в квазирезонансном подходе в управлении силовым транзистором [9]. Блок выполняет постоянную оцифровку формы преобразуемой в силовой цепи энергии (рис.5) с помощью АЦП.

В массиве оцифрованных значений микроконтроллер вычисляет значения, соответствующие ложбинам (см. рис.5), в свою очередь соответствующим моментам времени, коммутация транзистора в которые будет сопровождаться минимальным значением потерь энергии. В отличие от аналогов [10–14] разработанный микроконтроллер не останавливается на фиксировании положения только первой ложбины. Определение положения нескольких последующих ложбин создает гибкую последовательность импульсов управления затвором силового транзистора. Последовательность состоит из чередования импульсов разной длины с различными временными промежутками для обеспечения передачи требуемого уровня энергии (рис.6).

Регулирование выходной мощности преобразователя энергии осуществляется по принципу частотно-импульсного регулирования изменением временных промежутков между импульсами, так как требуется сохранять форму импульсов для обеспечения мягкой коммутации транзистора.

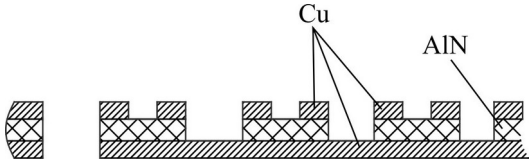


Рис.4. Конструкция керамической платы
Fig.4. Ceramic board design

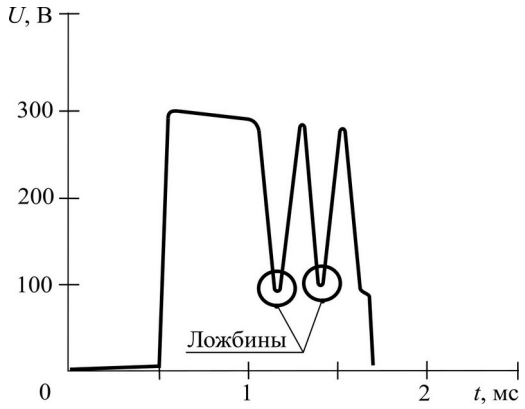


Рис.5. Форма преобразуемого в силовой цепи напряжения
Fig.5. The form of the voltage converted in the power circuit

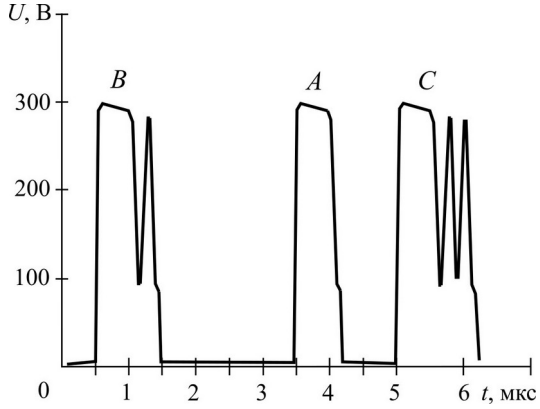


Рис.6. Фрагмент формы преобразуемого в силовой цепи напряжения в ходе действия последовательности коротких *A*, средних *B* и длинных *C* импульсов
Fig.6. Fragment of the form of the voltage converted in the power circuit during the action of a sequence of short *A*, medium *B* and long *C* pulses

Планарный трансформатор в конструкции преобразователя энергии позволяет минимизировать массогабаритные параметры источника питания. Разработанный для преобразователя энергии образец планарного трансформатора имеет габариты 32 × 45 × 9 мм и массу 36,3 г. Масса альтернативного моточного трансформатора тороидальной формы равна 65,2 г при внешнем диаметре 35 мм и высоте 12 мм. Таким образом, планарный трансформатор характеризуется несколько большим объемом, но его высота и масса на 3 мм и 44,5 % меньше соответственно.

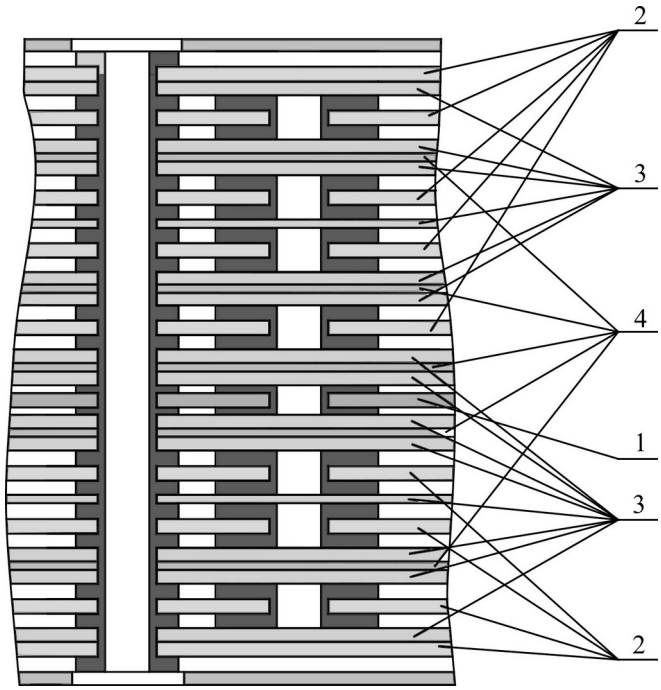


Рис.7. Конструкция разработанного планарного трансформатора: 1 – фольгированный полиимид AP7164E; 2 – фольгированный полиимид AP9212R; 3 – препрег IS420 2116; 4 – пленка полиимидная толщиной 12 мкм
Fig.7. Design of the developed planar transformer: 1 – foil polyimide AP7164E; 2 – foil polyimide AP9212R; 3 – prepreg IS420 2116; 4 – polyimide film 12 microns

Конструкция разработанного планарного трансформатора (рис.7) имеет ряд особенностей:

– для фольгированного полиимида слоев первичной и вторичной обмоток выполнены дополнительные операции гальванического наращивания меди для снижения омического сопротивления токоведущих дорожек трансформатора и обеспечения требуемого уровня тока во вторичной цепи;

– введены слои полиимидной пленки между чередующимися слоями первичной и вторичной обмоток для защиты от пробоя по напряжению.

Дальнейшее уменьшение высоты преобразователя возможно интегрированием трансформатора в одну из печатных плат [15], но требует значительного изменения конструкции.

В таблице представлены характеристики преобразователя энергии, разработанного на основе концепции применения современных DBC-материалов и квазирезонансных подходов в управлении процессом преобразования энергии, в сопоставлении с характеристиками передовых аналогов.

Общие характеристики преобразователей энергии
General characteristics of energy converters

Параметр	Изготовленный образец	МДМ240-П («Александр Электрик», Россия)	CN200A («TDK Labda», Япония)
Выходное напряжение, В	28	28	24
Номинальная мощность, Вт	250	240	200
Удельная мощность, кВт/дм^3	**3,26**	1,81	2,86
Пиковая мощность, Вт	650	–	–
Пиковая удельная мощность, кВт/дм^3	**8,46**	–	–
Высота преобразователя, мм	11	13	12,7
Объем преобразователя, дм^3	0,075	0,133	0,07
КПД при номинальной нагрузке, %	88,6	87	88
Частота преобразования, кГц	500	100	150
Масса, г	103	115	100

Исходя из данных таблицы, можно сделать вывод о целесообразности и перспективности разработки преобразователей энергии на основе предлагаемой концепции.

Заключение. Применение керамических материалов и квазирезонансный подход в управлении процессом коммутации силовых транзисторов позволили отказаться от систем отвода тепла и значительно снизить габаритные размеры преобразователя энергии и, соответственно, увеличить его удельную мощность.

Удельная мощность разработанного преобразователя энергии, равная 3,26 кВт/дм^3, превосходит мощность современных отечественных и зарубежных аналогов. При работе на импульсную нагрузку преобразователь энергии имеет пиковую удельную мощность 8,46 кВт/дм^3 при выходной мощности 650 Вт. Медное основание играет роль фиксирующего элемента и может быть заменено на более легкую алюминиевую подложку с монтажными отверстиями для крепления преобразователя энергии.

Литература

1. ***Лейтс И.Л.*** Перспективы развития техники печатных плат и микросборок. «Что было – что будет» // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 7. С. 40–42.

2. ***Нака К., Карташев Е.*** LFC-технология производства керамических подложек для автомобильной промышленности // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 170–172.

3. ***Глубоков А.А., Бондарь Д.Б., Шелковников Б.Н.*** Широкополосные трансформаторы для интегральных схем в технологии LTCC // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2006. № 3. С. 26–31.

4. Технология изготовления керамических теплонагруженных печатных плат на основе LTCC / ***В.Д. Ходжаев, К.В. Егоров, В.А. Алексеев и др.*** // Перспективные технологии в средствах передачи информации. 2017. С. 208–210.

5. ***Хроленко Т.С., Торгаш Т.Н., Яковлев А.Н., Перцель Я.М.*** Многослойные платы ГИС, изготовленные по технологии LTCC с применением тонких пленок // Техника радиосвязи..2017. № 1. С. 79–91.

6. ***Жданкин В.*** Радиационно-стойкие гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи – стандартные компоненты систем электропитания КА // Аппаратные средства. 2012. № 1. С. 26–41.

7. ***Иванов Е.А.*** Методика уменьшения значения коммутируемого напряжения в силовых ключах обратноходовых источников питания // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 11. С. 694–698.

8. ***Егоров А.П., Огурцова С.Г.*** Корректор коэффициента мощности с мягким переключением с интегрированным двухключевым преобразователем с переключением при нуле напряжения // Практическая силовая электроника. 2017. № 2. С. 38–43.

9. ***Иванов Е.А., Якунин А.Н.*** Алгоритм коммутации силовых ключей обратноходовых источников питания в квазирезонансном режиме с низкими энергетическими потерями // Материалы 11-й Всероссийской науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы информатизации в науке и образовании – 2018». М.: МИЭТ, 2018. С. 48–54.

10. ***Антонов А.А., Карпович М.С., Пичугин И.В., Васильев В.Ю.*** Разработка и верификация интегральной микросхемы драйвера «мягкой» коммутации силовых ключей для мощных источников электропитания // Нано- и микросистемная техника. 2015. №9. С. 57–64.

11. ***McMurray W.*** Optimum snubbers for power semiconductors // IEEE IAS transactions. 1972. Vol. I. No. 5. P. 593–600.

12. ***McMurray W.*** Selection of snubbers and clamps to optimize the design of transistor switching converters // IEEE IAS transactions. 1980. Vol. I. No. 4. P. 513–523.

13. ***Johansen J.K.*** Characterization of high power IGBT's with sinewave current // IEEE Transactions on Industry Applications. 1994. Vol. 30. No. 5. P. 1142–1147.

14. ***Zhang Yi., Sobhani S., Chokhawala R.*** Snubber considerations for IGBT applications, international rectifier designer's manual // IGBT-3. TPAP-5. 1995. P. 135–144.

15. ***Любимов А.В., Иванов Е.А., Коровин Г.В., Королев А.Н.*** Плоский трансформатор. Патент №176671 РФ. 2018. Бюл. № 3.

Поступила в редакцию 20.12.2019 г.; после доработки 20.12.2019 г.; принята к публикации 30.06.2020 г.

Иванов Евгений Андреевич – аспирант Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), jonny-evildream@yandex.ru

Якунин Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), needcar@mail.com

References

1. Leits I.L. Prospects for the development of printed circuit boards and microassemblies. «What was – what will be». *Tekhnologii v elektronnoj promyshlennosti = Technologies in the electronics industry*. 2011, no. 7, pp. 40–42. (in Russian).

2. Haka K., Kartashev E. LFC technology for the production of ceramic substrates for the automotive industry. *Komponenty i tekhnologii = Components and technologies*, 2007, no. 5, pp. 170–172. (in Russian).

3. Glubokov A.A., Bondar D.B., Shelkovnikov B.N. Broadband transformers for integrated circuits in LTCC technology. *Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoj apparature = Technology and design in electronic equipment*, 2006, no. 3, pp. 26–31. (in Russian).

4. Khodzhaev V.D., Egorov K.V., Alekseev V.A., Bugrov E.V., Marin V.P. Technology for manufacturing ceramic thermally loaded printed circuit boards based on LTCC. *Perspektivnye tekhnologii v sredstvah peredachi informacii =Advanced technologies in the means of information transmission,* 2017, pp. 208–210. (in Russian).

5. Khrolenko T.S., Torgash T.N., Yakovlev A.N., Pertsel Ya.M. Multilayer GIS boards made using LTCC technology using thin films. *Tekhnika radiosvyazi = Radio communication technology*, 2017, no. 1, pp. 79–91. (in Russian).

6. Zhdankin V. Radiation-resistant hybrid-film DC / DC converters - standard components of spacecraft power supply systems. *Apparatnye sredstva = Hardware,* 2012, no. 1, pp. 26–41(in Russian).

7. Ivanov E.A. Method for reduction of the value of the switched tension voltage in the power keys of the power supplies. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystems technology*, 2017, vol. 19, no. 11, pp. 694–698. (in Russian).

8. Egorov A.P., Ogurtsova S.G. Soft-transfer power factor corrector with integrated two-key converter with zero voltage transfer. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical power electronics,* 2017, no. 2, pp. 38–43. (in Russian).

9. Ivanov E.A., Yakunin A.N. Algorithm for switching power switches of flyback power supplies in a quasi-resonant mode with low energy losses. *Materials of the scientific-practical conference «Actual problems of informatization in science and education - 2018».* Moscow, MIET, 2018, pp. 48–54. (in Russian).

10. Antonov A.A., Karpovich M.S., Pichugin I.V., Vasiliev V.Yu. Development and verification of an integrated microcircuit of a driver for «soft» switching of power switches for powerful power supplies. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystems technology,* 2015, no. 9, pp. 57–64. (in Russian).

11. McMurray W. Optimum snubbers for power semiconductors. *IEEE IAS transactions,* 1972, vol. I, no. 5, pp. 593–600.

12. McMurray. W. Selection of snubbers and clamps to optimize the design of transistor switching converters. *IEEE IAS transactions*,1980, vol. I, no. 4, pp. 513–523.

13. Johansen J.K. Characterization of high power IGBT's with sinewave current. *IEEE transactions on industry applications*, 1994, vol. 30, no. 5, pp. 1142–1147.

14. Zhang Yi., Sobhani S., Chokhawala R. Snubber considerations for IGBT applications, international rectifier designer's manual. *IGBT-3.– TPAP-5,*1995, pp. 135–144.

15. Lyubimov A.V., Ivanov E.A., Korovin G.V., Korolev A.N. *Flat transformer*. Patent №176671 RF. 2018. (in Russian).

Received 20.12.2019; Revised 20.12.2019; Accepted 30.06.2020.

Information about the authors:

Evgeniy A. Ivanov – PhD student of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), jonny-evildream@yandex.ru

Alexey N. Yakunin – Dr. Sci.(Eng.), Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), needcar@mail.com

МИКРО- И НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА
MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNOLOGY

УДК 53.087.92 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-432-439

Микросистемы с высоким коэффициентом преобразования слабого магнитного поля на основе магниторезистивных наноструктур

В.В. Амеличев[1], А.А. Резнев[2], А.Н. Сауров[3]

[1]НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия
[2]ФГКУ «В/ч 68240», г. Москва, Россия
[3]Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва, Россия

avv@tcen.ru

Магниторезистивные преобразователи магнитного поля востребованы как для прямого, так и для косвенного применения в различных областях промышленности, транспорте и специальной технике. В работе отмечены особенности применяемой терминологии и размерностей основных параметров магниторезистивных преобразователей магнитного поля. Представлены основные результаты экспериментальных исследований разработанных тонкопленочных магниторезистивных наноструктур с четной и нечетной передаточной характеристикой. Конструкция данной системы, реализованная на основе анизотропного магниторезистивного эффекта, имеет нечетную передаточную характеристику и коэффициент преобразования на уровне 8 мВ/В/Э. Конструкция, реализованная на основе гигантского магниторезистивного эффекта, имеет четную передаточную характеристику и коэффициент преобразования на уровне 27 мВ/В/Э. Показаны результаты перспективных конструктивно-технологических решений, позволяющих достигать значений коэффициента преобразования тонкопленочных магниторезистивных наноструктур более 100 мВ/В/Э. Приведены результаты исследования тестовой спин-туннельной тонкопленочной магниторезистивной наноструктуры с гигантским магниторезистивным эффектом, превышающим 100 %. Отмечена новизна полученных результатов и определена перспективность использования высокочувствительных тонкопленочных магниторезистивных наноструктур для создания энергонезависимой памяти с произвольной выборкой на основе тонкопленочной магниторезистивной наноструктуры со спин-туннельным магниторезистивным эффектом.

© В.В. Амеличев, А.А. Резнев, А.Н. Сауров, 2020

Ключевые слова: коэффициент преобразования; магниторезистивный эффект; слабое магнитное поле; микросистема; наноструктура

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

Для цитирования: Амеличев В.В., Резнев А.А., Сауров А.Н. Микросистемы с высоким коэффициентом преобразования слабого магнитного поля на основе магниторезистивных наноструктур // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 432–439. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-432-439

Microsystems with High Conversion Coefficient of a Weak Magnetic Field Based on Magnetoresistive Nanostructures

V.V. Amelichev[1], A.A. Reznev[2], A.N. Saurov[3]

[1]SMC «Technological Centre», Moscow, Russia
[2]FGKU «Military Unit 6840», Moscow, Russia
[3]Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

avv@tcen.ru

Abstract: The magnetoresistive transducers of magnetic field have been claimed both for direct and indirect applications in various areas of industry, transport and special equipment. In the paper the special features of used terminology and dimensions in the main parameters of magnetic field magnetoresistive transformers have been revealed. The main results of experimental studies on the developed thin-film magnetoresistive nanostructures (TMN) with even and odd transfer characteristics have been presented. The TMN design on an anisotropic magnetoresistive effect has an odd transfer characteristic and conversion coefficient at the level of 8 mV/V/E. The TMN design based on a giant magnetoresistive effect has an even transfer characteristic and a conversion coefficient at the level of 27 mV/V/E. The results of promising design and technological solutions allowing reaching the values of conversion coefficient of TMN at the level exceeding 100 mV/V/E have been shown. The results of the study of the test spin-tunnel magnetoresistive nanostructure (spin-tunnel TMN) with giant magnetoresistive effect, exceeding 100% have been presented. The novelty of the obtained results has been reflected and the perspective of using highly sensitive TMN and creating the non-volatile MRAM on the basis of thin-film magnetoresistive structure with the spin-tunnel magnetoresistive effect have been determined.

Keywords: conversion coefficient; magnetoresistive effect; magnetic field; microsystem; nanostructure

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

For citation: Amelichev V.V., Reznev A.A., Saurov A.N. Microsystems with high conversion coefficient of a weak magnetic field based on magnetoresistive nanostructures. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 432–439. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-432-439

Введение. Магниторезистивные преобразователи магнитного поля (ПМП) являются востребованными компонентами для изготовления современных магнитометрических приборов и устройств, в частности, в таких областях приборостроения, как автоматические системы управления, информационные системы обработки и передачи информации, системы навигации, системы безопасности и др.

Магниторезистивные ПМП реализуются на основе тонкопленочных магниторезистивных наноструктур как с анизотропным магниторезистивным (АМР), так и с гигантским магниторезистивным (ГМР) эффектом. Передаточная вольт-эрстедная характеристика (ВЭХ) магниторезистивных ПМП может быть четной или нечетной. За предыдущие несколько десятилетий зарубежные магниторезистивные ПМП, в основном производимые фирмами Honeywell (США), NVE и Micro Magnetics, Inc. (США), достаточно прочно закрепились на рынке микроэлектронных компонентов. Отметим, что многие потребители, работая с сопроводительной документацией на изделия данных производителей, используют предлагаемые термины, параметры, размерности и ВЭХ. Поэтому единица напряженности магнитного поля системы СГС эрстед широко применяется специалистами, работающими с приборами контроля и измерения слабого магнитного поля. В настоящей работе эрстед использован для более привычного восприятия достигнутых результатов и удобного сравнения их с параметрами зарубежных аналогичных изделий.

Номенклатура магниторезистивных ПМП указанных американских производителей достаточно широкая, например фирмой Honeywell на АМР-эффекте представлены продукты как с одной осью чувствительности, так и с двумя и с тремя осями чувствительности. Продукция фирмы NVE достаточно широко представлена магниторезистивными ПМП и гальваническими развязками на ГМР-эффекте в многослойных периодических наноструктурах. Применение магниторезистивных ПМП может быть как прямым – для преобразования магнитного поля, так и косвенным – для преобразования тока, перемещения, угла поворота и др.

Количество фирм в данном секторе рынка более полутора десятков и продолжает увеличиваться. Что касается выручки, мировой рынок магнитометров, по оценкам, к 2027 г. достигнет значения ~ 4,7 млрд долл. США с приростом в течение прогнозируемого периода в среднем на 6 % [1].

Отечественные производители магниторезистивных ПМП в данном секторе рынка представлены не так широко, как зарубежные с номенклатурой продукции, реализованной в основном на АМР-эффекте. Стоимость единицы отечественных магниторезистивных ПМП, как правило, более высокая ввиду технических и технологических особенностей выпуска данной продукции, что обусловлено высокими значениями основных параметров магниторезистивных ПМП, их надежностью и стойкостью к внешним воздействующим факторам.

Магниторезистивные микросистемы преобразования слабого магнитного поля. В условиях слабого магнитного поля (не более 1 мТл) широко применяются датчики и преобразователи, реализованные на основе магниторезистивных наноструктур с АМР- или ГМР-эффектом. Одна из основных характеристик данных приборов – чувствительность, выражаемая отношением изменения выходного электрического сигнала к воздействующему магнитному полю (измеряется в В/Тл). В преобразователях, реализованных на основе мостовой схемы Уинстона, уровень выходного сигнала прямо пропорционален приложенному напряжению питания. Поэтому чувствительность магниторезистивного преобразователя многие производители приводят в относительных единицах (мВ/В/Э, мВ/В/Гс или мВ/В/Тл). По сути, данный параметр характеризует коэффициент преобразования магнитного поля в электрический сигнал при напряжении питания 1 В.

Не менее важная характеристика магниторезистивных преобразователей – порог чувствительности, или разрешающая способность. Порог чувствительности в единичной полосе частот является минимальным уровнем магнитного поля, регистрируемым датчиком или преобразователем, при отношении сигнал/шум, равном единице [2]. Пороговая чувствительность к магнитному полю зависит от отношения сигнал/шум и характеризует нижнюю границу динамического диапазона. Так, например, для анизотропных тонкопленочных магниторезистивных ПМП нижняя граница динамического диапазона 10^{-7}–10^{-8} Тл [2, 3].

Современные требования для ряда приборов и устройств на основе магниторезистивных преобразователей диктуют необходимость достижения порога чувствительности 10^{-9}–10^{-10} Тл в полосе частот 0,1–10 Гц. Для решения данной задачи могут быть использованы современные конструктивные и технологические решения, направленные на повышение отношения сигнал/шум за счет повышения уровня сигнала путем комбинации ряда конструктивно-технологических решений по увеличению коэффициента преобразования прибора. Один из эффективных способов повышения уровня сигнала – применение в конструкции магниторезистивных ПМП концентраторов магнитного поля (КМП) [4–6]. В НПК «Технологический центр» (г. Москва) разработаны конструкции анизотропных магниторезистивных ПМП, в которых коэффициент усиления КМП составляет 15–20. Это напрямую отражается на коэффициенте преобразования прибора и демонстрирует возможность снижения значения его порога чувствительности до требуемых величин.

Другим эффективным способом повышения уровня сигнала является использование ГМР-эффекта в тонкопленочных магниторезистивных наноструктурах, что также позволяет получать магниторезистивные ПМП с более низким порогом чувствительности. Разработанный в НПК «Технологический центр» (г. Москва) конструктивно-технологический базис производства магниторезистивных микросистем содержит блок технологических операций, определяющих способ имплантации миниатюрных КМП в кристалл, на поверхности которого в локальной области сформированы элементы на основе тонкопленочных магниторезистивных наноструктурах с АМР- или ГМР-эффектом.

На рис.1 представлена нечетная передаточная ВЭХ магниторезистивного ПМП с АМР-эффектом при напряжении питания мостовой схемы 10 В. Магниторезистивные ПМП с нечетной ВЭХ востребованы, когда необходимо определить вектор магнитного поля (навигация, магнитная интроскопия, измерение электрического тока в проводнике и др.). С целью минимизации гистерезиса в тонкопленочных магниторезистивных наноструктурах и начального смещения в конструкциях магниторезистивных ПМП с АМР-эффектом практически всегда присутствуют планарные катушки подмагничивания. В разработанных конструкциях магниторезистивных ПМП с КМП коэффициент преоб-

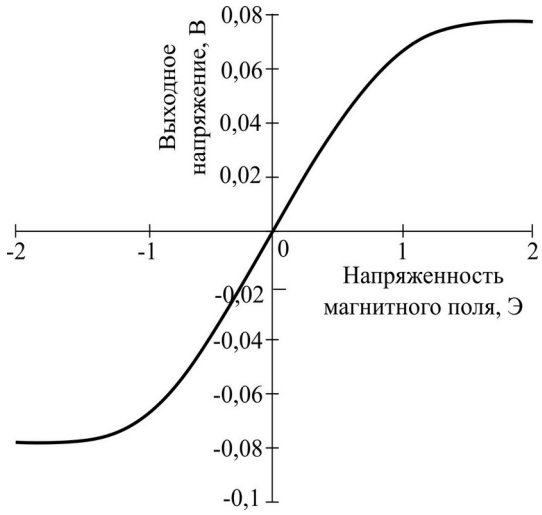


Рис.1. Нечетная передаточная ВЭХ магниторезистивного ПМП с КМП на АМР-эффекте
Fig.1. Odd transfer VOC magnetoresistive TMF with CMF on AMR effect

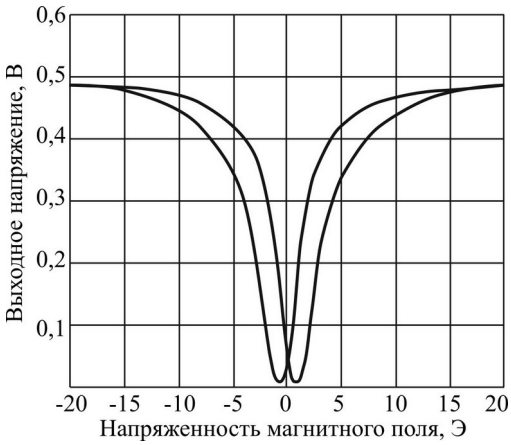


Рис.2. Четная передаточная ВЭХ разработанного магниторезистивного ПМП с ГМР-эффектом
Fig.2. Even transfer VOC developed by magnetoresistive TMF with GMR effect

разования на линейном участке ВЭХ (±0,5 Э) достигает 8 мВ/В/Э, при этом АМР-эффект в тонкопленочных магниторезистивных наноструктурах, из которых сформирована мостовая схема ПМП с сопротивлением 0,7−1,5 кОм, составляет 2−2,5 %.

На рис.2 представлена четная передаточная ВЭХ магниторезистивного ПМП с ГМР-эффектом, построенная при напряжении питания 5 В. Магниторезистивные ПМП с четной ВЭХ востребованы в тех случаях, когда не требуется определения направления вектора магнитного поля, где контролируется только его абсолютное значение с достаточно широким допуском из-за наличия гистерезиса в тонкопленочной магниторезистивной наноструктуре. Из зависимости, представленной на рис.2, следует, что коэффициент преобразования магниторезистивного ПМП с ГМР-эффектом на линейном участке ВЭХ равен 27 мВ/В/Э.

В сотрудничестве с коллективом ученых Института физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург) создана магниторезистивная многослойная периодическая (ММП) наноструктура с лучшим сочетанием магнитных параметров (высокий ГМР-эффект и малый гистерезис).

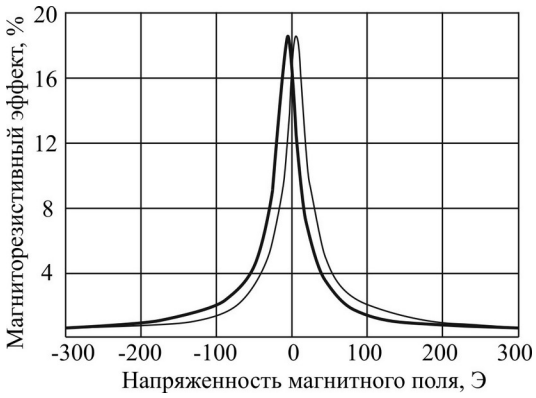


Рис.3. Зависимость магниторезистивного эффекта ММП наноструктуры типа Ta / FeNiCo / $[FeNiCo/Cu]_7$ / FeNiCo / Ta от напряженности магнитного поля
Fig.3. Dependence of magnetoresistive effect of the MMP of a Ta / FeNiCo / $[FeNiCo / Cu]_7$ / FeNiCo / Ta nanostructure on the magnetic field strength

На рис.3 приведена зависимость магниторезистивного эффекта ММП наноструктуры типа Ta / FeNiCo / $[FeNiCo/Cu]_7$ / FeNiCo / Ta с ГМР-эффектом 18–19 % от напряженности магнитного поля [7].

При использовании разработанного конструктивно-технологического базиса для создания высокочувствительных магниторезистивных микросистем ПМП с КМП в НПК «Технологический центр» (г. Москва) созданы опытные образцы магниторезистивной микросистемы преобразования слабого магнитного поля на основе

ММП наноструктур с коэффициентом преобразования до 40 мВ/В/Э. Кроме того, данные конструктивно-технологические решения позволяют достигать и более высоких значений коэффициента преобразования – более 100 мВ/В/Э. Полученные экспериментальные образцы магниторезистивных ПМП исследованы в одинаковых условиях с ПМП AAH002 (NVE, США).

На рис.4 приведены ВЭХ изготовленного в НПК «Технологический центр» (г. Москва) экспериментального образца магниторезистивного ПМП на основе ММП наноструктур с улучшенными магнитными параметрами и ВЭХ AAH002 (NVE, США).

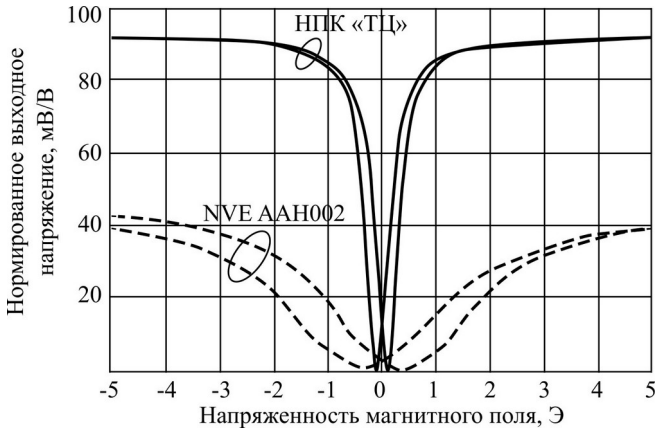


Рис.4. ВЭХ экспериментального образца магниторезистивного ПМП на основе ММП наноструктур с улучшенными магнитными параметрами и ВЭХ AAH002 (NVE, США)

Fig.4. VOC of an experimental sample of magnetoresistive TMF based on MMP nanostructures with improved magnetic parameters and VOC AAH002 (NVE, USA)

С целью создания высокочувствительных магниторезистивных ПМП и энергонезависимой магниторезистивной памяти с произвольной выборкой ведутся работы по созданию тонкопленочных магниторезистивных наноструктур с более высокими значениями ГМР-эффекта [8].

На рис.5 представлена зависимость изменения сопротивления в тестовой спин-туннельной тонкопленочной магниторезистивной наноструктуре с ГМР-эффектом, сформированной интегральным способом, от напряженности магнитного поля. В настоящее время достигнуто не только значение ГМР-эффекта, превышающее 100 %, но и способы модификации зависимости $R(H)$. Линеаризация данной зависимости в области нуля необходима для создания магниторезистивных ПМП с нечетной ВЭХ и достигается при установлении неколлинеарной конфигурации магнитной анизотропии оси легкой намагниченности и оси однонаправленной анизотропии в наноструктуре спин-туннельного магниторезистивного элемента.

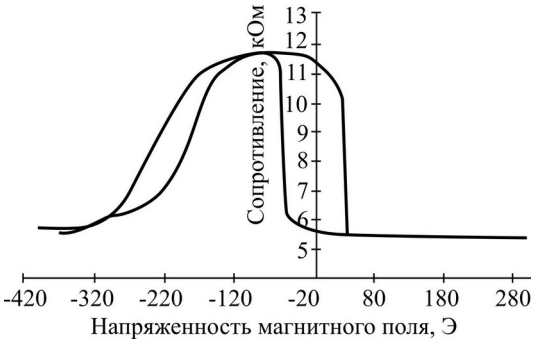


Рис.5. Зависимость сопротивления спин-туннельной магниторезистивной наноструктуры от напряженности магнитного поля

Fig.5. Dependence of the spin-tunnel magnetoresistive nanostructure resistance of the nanostructure on the magnetic field strength

Одна из особенностей спин-туннельной тонкопленочной магниторезистивной наноструктуры – низкое напряжение питания

(не более 0,1 В), ограниченное напряжением пробоя тонкого слоя диэлектрика (не более 5 нм), разделяющего ферромагнитные слои в тонкопленочной магниторезистивной наноструктуре. С учетом данного факта, как правило, в магниторезистивный ПМП последовательно включаются несколько десятков таких наноструктур, что приводит к высокому входному сопротивлению (до нескольких сотен килоом). Высокое значение ГМР-эффекта спин-туннельной тонкопленочной магниторезистивной наноструктуры в перспективе позволит получить более высокочувствительные магниторезистивные ПМП с малым энергопотреблением и высоким коэффициентом преобразования. Кроме того, подобные спин-туннельные тонкопленочные магниторезистивные наноструктуры могут быть использованы в составе ячейки энергонезависимой памяти с произвольной выборкой.

Заключение. Результаты исследования магниторезистивных ПМП и спин-туннельной тонкопленочной магниторезистивной наноструктуры с ГМР-эффектом, созданных на основе конструктивно-технологического базиса магниторезистивных микросистем с КМП, являются очередным шагом в развитии отечественных высокочувствительных магниторезистивных ПМП, имеющих низкое энергопотребление, высокий коэффициент преобразования и более низкий порог чувствительности (до 10^{-10} Тл).

Литература

1. Global Magnetometer Market: Snapshot. URL: https://www.transparencymarketresearch.com/magnetometer-market.html (дата обращения: 04.12.2019).

2. ***Бараночников М.Л.*** Микроэлектроника. М.: ДМК Пресс, 2001. Т. 1. С. 27–137.

3. ***Ripka P.*** Advances in magnetic field sensors // IEEE Sensors Journal. 2010. Vol. 10. No. 6. P. 1108–1116.

4. ***Буслов И., Бауткин В., Драпезо А., Ярмолович В.*** Датчики слабых магнитных полей на эффекте Холла // Современная электроника. 2011. № 1. С. 12–17.

5. Создание интегральных компонентов усиления магнитного сигнала в беспроводной МЭМС на основе магниторезистивных элементов / ***В.В. Амеличев, В.В. Аравин, А.Н. Белов и др.*** // Нано- и микросистемная техника. 2013. №3. С. 29–33.

6. ***Амеличев В.В., Резнев А.А.*** Микросистемы на основе тонкопленочных анизотропных магниторезистивных преобразователей магнитного поля и тока // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20. № 5. С. 303–307.

7. Перспективные магнитные наноструктуры с гигантским магнитосопротивлением и высокочувствительные сенсорные элементы на их основе / Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уро РАН. URL: http://imp.uran.ru/?q=ru/content/perspektivnye-magnitnye-nanostruktury-s-gigantskim-magnitosoprotivleniem-i-0 (дата обращения: 04.12.2019).

8. Развитие технологий магнитополупроводниковых микросистем / ***В.В. Амеличев, И.Е. Абанин, В.В. Аравин и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2015. Т. 20. № 5. С. 505–510.

Поступила в редакцию 13.03.2020 г.; после доработки 13.03.2020 г.; принята к публикации 30.06.2020 г.

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

Резнев Алексей Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя ФГКУ «В/ч 68240» (Россия, 101000, Москва, Главпочтамт), village@dol.ru

Сауров Александр Николаевич – академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 32А), org@inme-ras.ru

References

1. *The global market of magnetometers: a snapshot*. Available at: https://www.transparencymarketresearch.-com/magnetometer-market.html (accessed: 10.03.2020).

2. Baranochnikov M.L. *Microelectronics*. *Vol.1*. Moscow, DMK Press Publ., 2001, p. 27–137. (in Russian)

3. Ripka P. Achievements in the field of magnetic field sensors. *Magazine IEEE Sensors*, 2010, vol. 10, no. 6, pp. 1108–1116.

4. Buslov I., Bautkin V., Drapezo A., Yarmolovich V. Sensors of weak magnetic fields on the Hall effect. *Sovremennaya electronika = Modern Electronics*, 2011, no. 1, pp.12–17. (in Russian).

5. Amelichev V.V, Aravin V.V, Belov A.N., Krasyukov A.Yu., Reznev A.A., Saurov A.N. Creation of integral components of a magnetic signal in a wireless MEMS based on magnetoresistive elements. *Nano- i mikrosistemnaya tehnika = Nano- and Microsystems Technology,* 2013, no. 3, pp. 29–33. (in Russian).

6. Amelichev V.V., Reznev A.A. Microsystems based on thin-filmed anisotropic magneto-resistant magnetic field and current converters. *Nano- i mikrosistemnaya tehnika = Nano- and Microsystems Technology,* 2018, vol. 20, no. 5, pp. 303–307 (in Russian)

7. *Promising magnetic nanostructures with giant magnetoresistance and highly sensitive sensor elements based on them*. Available at: http://imp.uran.ru/?q=en/content/perspektivnye-magnitnye-nanostruktury-s-gigantskim-magnitosoprotivleniem-i-0 (accessed: 10.03.2020). (in Russian).

8. Amelichev V.V., Abanin I.E., Aravin V.V., Kostyuk D.V., Kasatkin S.I., Reznev A.A., Saurov A.N. The development of technology of magnetic semiconductor microsystems. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no. 5, pp. 505–510. (in Russian).

Received 13.03.2020; Revised 13.03.2020; Accepted 30.06.2020.

Information about the authors:

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

Aleksey A. Reznev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Deputy Head, FGKU «Military Unit 68240» (Russia, 101000, Moscow, Main Post Office), village@dol.ru

Alexander N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Nanotechnology of the Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky pr., 32A), org@inme-ras.ru

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

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2019 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

УДК 531.768 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-440-451

Моделирование и исследование различных типов подвесов инерционной массы в чувствительных элементах микромеханических приборов

Йе Ко Ко Аунг, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенков

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

serborsel@mail.ru

Для обеспечения надежной работы и стабильности параметров датчиков необходимо учитывать воздействие внешних факторов уже на этапе проектирования конструкции датчика, особенно его чувствительного элемента, и на последующих этапах жизненного цикла. Важнейшими элементами конструкции чувствительного элемента, в частности емкостного микромеханического акселерометра, являются подвесы, с помощью которых инерционная масса соединяется с неподвижной рамкой. В работе исследованы характерные конструкции элементов подвеса, выполненных из кремния с различной кристаллографической ориентацией, представлены результаты моделирования их важнейших параметров. Моделирование выполнено с использованием программы ANSYS. Рассчитаны собственные частоты колебаний инерционной массы, остаточные механические напряжения в элементах конструкции чувствительного элемента микромеханического акселерометра при ударе (до 10 000 g). Исследованы изменения собственной частоты колебаний и остаточного механического напряжения в элементах подвеса при изменении температуры от +150 до –150 °С за короткий интервал времени (10 с), что соответствует термическому удару. Результаты проведенных исследований остаточных механических напряжений, возникающих при ударе, и собственных частот колебаний инерционной массы позволили выработать рекомендации по выбору конструкции подвесных элементов из кремния, обеспечивающих высокую чувствительность и стабильность параметров микромеханического акселерометра. Установлено, что использование складчатых пружин с прямоугольной или круглой формой сечения при толщине элементов подвеса 40 мкм обеспечивает наибольшую температурную стабильность параметров. Полученные результаты полезны при разработке реальных конструкций микромеханических акселерометров и других микромеханических приборов.

Ключевые слова: микромеханические приборы; микромеханические акселерометры; собственная частота колебаний; элементы подвеса; остаточное механическое напряжение; температурная стабильность параметров

Для цитирования: Йе Ко Ко Аунг, Симонов Б.М., Тимошенков С.П. Моделирование и исследование различных типов подвесов инерционной массы в чувствительных элементах микромеханических приборов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 440–451. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5- 440-451

© Йе Ко Ко Аунг, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенков, 2020

Modeling and Study of Various Types of Inertial Mass Suspensions in the Sensitive Elements of Micromechanical Devices

Ye Ko Ko Aung, B.M. Simonov, S.P. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

serborsel@mail.ru

Abstract: In microelectromechanical devices and systems (MEMS), capacitive micromechanical accelerometers (MMA) are used in airbag systems, machine vibration monitoring, navigation, seismology, microgravity measurements, etc. The most important structural elements of the sensing element are suspensions, through which the inertial mass is connected to a fixed frame. To ensure reliable operation and stability of sensor parameters, it is necessary to take into account the results of external factors already at the design stage of the sensor structure, especially its sensitive element, and at subsequent stages of the life cycle. In this work, the characteristic structures of suspension elements, which are made of silicon with different crystallographic orientations, are investigated and the results of modeling their most important parameters are presented. The simulation has been performed using the ANSYS program. The natural frequencies of inertial mass oscillations, residual mechanical stresses in the structural elements of silicon sensitive element with different crystallographic orientations have been calculated upon impact (up to 10 000 g). The natural vibration frequency changes and the dynamics of the change in the residual mechanical stress in the suspension elements with a temperature change in the range from +150 to –150 °C for a short time interval of 10 s, which corresponds to thermal shock, investigated. The results of studies of residual mechanical stresses arising upon impact and natural frequencies of inertial mass oscillations have been made it possible to develop recommendations on the choice of the design of suspension elements made of silicon, providing high sensitivity and stability of MMA parameters. It has been established that the use of folded springs with a rectangular or round cross-sectional shape with a suspension element thickness of 40 μm provides the highest temperature stability of the parameters. The results obtained are useful for developing real designs of MMA and other micromechanical devices

Keywords: micromechanical devices; capacitive micromechanical accelerometers; natural vibration frequency; suspension elements; residual mechanical stress; temperature stability of the parameters

For citation: *Ye Ko Ko Aung, Simonov B.M., Timoshenkov S.P.* Modeling and study of various types of inertial mass suspensions in the sensitive elements of micromechanical devices. *Proc. Univ. Electronics,* 2020, vol. 25, no. 5, pp. 440–451. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5- 440-451

Введение. Микромеханические акселерометры (ММА) относятся к важнейшим типам МЭМС-устройств в связи с их высокой востребованностью в современных высокотехнологичных устройствах и приборах, определяющих уровень научно-технического

прогресса [1, 2]. Большой спрос на ММА обусловлен их использованием в качестве датчиков для измерения параметров движения. В настоящее время разработаны ММА емкостного типа различных конструкций. ММА с чувствительным элементом (ЧЭ) гребенчатой конструкции имеют ряд преимуществ, так как характеризуются высокой чувствительностью и стабильностью параметров [3]. Такой ММА может применяться как МЭМС-датчик, в его конструкции возможно использование актюаторов (механических приводов, исполнительных механизмов). Чувствительный элемент гребенчатого емкостного ММА содержит подвижную массу, подвешенную на пружинах, на которой расположен один или несколько электродов (подвижных электродов), а также фиксированные электроды. При воздействии ускорения на ММА меняются емкости между подвижным и неподвижными электродами.

Коэффициент жесткости элементов подвеса инерционной массы ЧЭ ММА определяется комбинацией физических и геометрических параметров подвесов и свойствами материалов, из которых они изготовлены, и в большой мере влияет на чувствительность и собственную частоту колебаний ММА [4]. Существуют различные конструкции подвесов. Первые три моды колебаний подвижной инерционной массы ЧЭ ММА особенно важны для оборудования, в котором используется емкостной акселерометр. Первая мода колебаний обычно является рабочей модой, а вторая и третья – это нерабочие моды, которые не должны оказывать паразитное влияние на работу ММА. Для стабильности рабочих параметров емкостного акселерометра нужно, чтобы резонансные частоты колебаний для первой и второй, а также третьей моды отстояли достаточно далеко друг от друга. Это гарантирует то, что вибрация в направлении рабочей оси (X) первой моды не будет подвергаться воздействию со стороны второй и третьей мод. Собственные частоты мод колебаний зависят от конструктивных параметров подвеса.

Важным свойством емкостного ММА при выборе области применения является ударопрочность его конструкции. От нее зависит стабильность функционирования МЭМС-приборов и надежность их работы [5]. Под воздействием ударов на датчик возможно механическое повреждение подвесных элементов его конструкции при превышении максимально допустимого механического напряжения в них. Для стабильного функционирования датчиков при воздействии ускорений за пределами их рабочих диапазонов разрабатываются ударопрочные акселерометры с диапазоном измерений 100 g и более [6]. Во многих случаях, особенно при использовании МЭМС-датчиков в автомобилях и для промышленного применения, необходимо учитывать различные типы воздействий: синусоидальные и другие (в том числе случайные) вибрации, механические и тепловые удары, изменения температуры [7]. В результате воздействия внешних факторов в датчиках могут возникать внутренние механические напряжения и другие нежелательные изменения. Для обеспечения надежной работы и стабильности параметров датчиков необходимо учитывать результаты воздействия внешних факторов уже на этапе проектирования конструкции датчика, особенно его ЧЭ, и на последующих этапах жизненного цикла.

Цель настоящей работы – исследование основных разновидностей подвесных элементов (подвесов), находящих применение в конструкциях ЧЭ ММА емкостного типа, а также в других изделиях МЭМС.

Исследование различных типов конструкции подвесной балки. В качестве элементов подвеса инерционной массы применяются упругие элементы (пружины), работающие на изгиб, кручение и растяжение-сжатие. Часто используются складчатые пружины для обеспечения подвеса и смещения инерционной массы под воздействием ускорения. Существуют разные типы конструкций элементов подвеса инерционной

массы: прямые балки, балки типа «ноги краба» (crab-leg), складчатые балки (folded beam), змеевидные балки (serpentine) и др. [8].

Исследуются три конструкции элементов подвеса: складчатые балки с прямоугольным сечением (модель 1), складчатые пружины с круглым сечением (модель 2) и прямые балки (модель 3). В расчетах полагается, что все подвесные элементы имеют идентичные геометрические параметры. В конструкциях различных устройств МЭМС и микросистемной техники в качестве материала широко используется кремний с кристаллографической ориентацией поверхности (100), (110) и (111). Параметры исследованных вариантов конструкции элементов подвеса следующие: длина 1065 мкм; ширина 35 мкм; радиус (модель 2) 65 мкрад; площадь подвижной массы 500 × 1000 мкм.

Расчет конструкции ЧЭ ММА с подвесами. Используя известную формулу

$$\sum F_x = ma,$$

для инерционной массы ЧЭ ММА на четырех пружинах имеем [9]

$$\begin{gathered} -(k_1 + k_2)\, x - (k_3 + k_4)\, x = ma, \\ ma + (k_1 + k_2)\, x + (k_3 + k_4)\, x = 0, \\ ma + k_{\text{сум}}\, x = 0. \end{gathered}$$

Здесь m – инерционная масса; F_x – сила; a – ускорение; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты жесткости пружин; x – отклонение; $k_{\text{сум}} = k_1 + k_2 + k_3 + k_4$ суммарный коэффициент жесткости четырех складчатых пружин.

Для инерционной массы на двух пружинах имеем

$$\begin{gathered} -(k_1)\, x - (k_2)\, x = ma, \\ ma + k_{\text{сум}}\, x = 0. \end{gathered}$$

В работе [10] рассчитан коэффициент жесткости пружины – складчатой балки с сечением прямоугольной формы:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2}\left(\frac{L_1^3}{12\,EI}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{6(1+\mu)\,L_1}{5\,w_1\,tE}\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{L_2}{ES_2}\right) - \frac{1}{4}\left(\frac{1}{4}\frac{L_1 L_2^2}{EI_2}\right),$$

где k – коэффициент жесткости пружины; L_1 и w_1 – длина и ширина первого фрагмента конструкции; L_2 и w_2 – длина и ширина второго фрагмента конструкции; $S_2 = L_2 w_2$ – площадь второго фрагмента конструкции; I_2 – момент инерции второго фрагмента конструкции.

В [10] рассчитан коэффициент жесткости складчатой пружины с сечением круглой формы:

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{Et}\left(\frac{L^3}{2w^3}\right) + \left(\frac{3(L+\mu)}{5w}L\right) + \left(\frac{24r^3}{wr^3}\right) - \left(\frac{\pi}{16} - \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\right) + \frac{3\pi L^2 r}{4w_r^3},$$

здесь r – радиус плоскости сечения.

Резонансная частота колебаний f акселерометра с массой подвижного элемента m определяется из уравнения [9]

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}},$$

где k – коэффициент жесткости.

Значения коэффициента жесткости для различных типов конструкций элементов подвеса инерционной массы будут разные. Поэтому собственная частота колебаний ЧЭ ММА также будет зависеть от конструкции элементов подвеса. Эскизы инерционных масс с элементами подвеса и рассчитанные собственные частоты колебаний ЧЭ ММА для трех исследованных моделей представлены на рис.1.

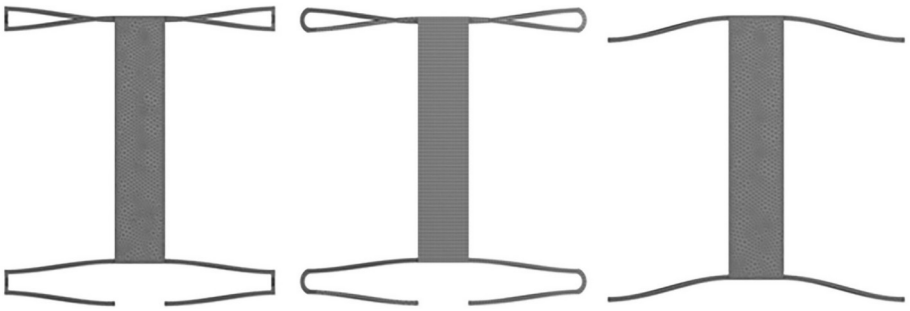


Рис.1. Эскизы инерционных масс с элементами подвеса из кремния толщиной 120 мкм с ориентацией поверхности (100) мкм для моделей 1–3 (*а–в* соответственно)
Fig.1. Sketches of inertial masses with suspension elements and the results of calculating the natural frequencies of vibrations according to the first mode of the SE MMA made of silicon with an orientation (100) of a thickness of 120 μm for models 1–3 (*a–c* respectively)

В табл.1 представлены результаты расчета собственных частот колебаний по первой моде ЧЭ ММА с элементами подвеса из кремния с ориентацией поверхности (100), (110), (111) разной толщины (от 40 до 120 мкм) для первых трех мод колебаний. Видно, что при ориентации кремния (100) значения резонансных частот колебаний ЧЭ с различными толщинами элементов подвеса различаются. Для модели 3 значения резонансных частот колебаний для всех толщин подвесов больше, чем для других моделей. Модели 1 и 2 имеют низкое отношение резонансных частот второй и первой мод. В модели 3 резонансные частоты колебаний для первой и второй мод находятся достаточно далеко друг от друга, поэтому вибрация в направлении оси чувствительности *X* в первой моде не будет подвергаться воздействию колебаний второй и третьей мод [11]. Из полученных результатов следует, что чем больше толщина подвесов, тем выше значение отношения резонансных частот колебаний разных мод. При ориентации кремния (100) модель 3 больше всего подходит для работы в составе высокоточных устройств (например, в навигационной системе подводной лодки и др.). При использовании в конструкции ЧЭ кремния с ориентацией (110) модели 1 и 2 имеют низкое значение отношения резонансных частот колебаний второй и первой мод. В модели 3 резонансные частоты колебаний для первой и второй мод находятся достаточно далеко друг от друга. Ясно, что модель 3 с толщиной элементов подвеса 120 мкм имеет самое большое значение отношения резонансных частот колебаний разных мод. При ориентации кремния (111) модель 3 с толщиной элементов подвеса 120 мкм имеет наибольшие резонансные частоты колебаний исследованных мод (1–3) и отношения резонансных частот колебаний разных мод выше, чем в моделях ЧЭ из кремния с ориентацией (100) и (110). Поэтому при использовании кремния с ориентацией (111) элементы подвеса – прямые балки толщиной 120 мкм – наилучшим образом подходят для высокоточного применения. Чем выше значения отношений резонансных частот колебаний разных мод, тем лучше чувствительность прибора и стабильность его параметров.

Таблица 1

Результаты расчета собственных частот колебаний по первым трем модам для трех моделей ЧЭ из кремния с ориентацией (100), (110), (111)

Table 1

Results of the calculation of the first three modes natural frequencies for 3 models of the sensitive element with Si orientation (100), (110), (111)

Номер модели	Толщина элемента подвеса, мкм	Резонансные частоты колебаний разных мод, Гц			Отношение резонансных частот	
		f_1	f_2	f_3	f_2/f_1	f_3/f_1
(100)						
1	40	8329,5	8418	14943	1	1,79
2		8140,3	8294,5	14 528	1,018	1,784
3		12 784	13 048	22 912	1,03	1,76
1	60	8433,1	11 529	20 433	1,36	2,422
2		8301,7	11 434	20 160	1,37	2,428
3		12 802	19 431	33 790	1,52	2,63
1	80	8442,6	14 152	24 032	1,67	2,84
2		8313,5	14 166	22 571	1,703	2,714
3		12 819	25 721	44 468	2	3,468
1	120	8468,5	18 173	24 051	2,16	2,84
2		8341,7	18 317	22 605	2,19	2,71
3		12 856	38 022	65 311	2,96	5,08
(110)						
1	40	9573,3	9694,9	17 471	1,01	1,802
2		9436,4	9441,2	16 928	1,1	1,793
3		14 533	14 874	26 217	1,12	1,803
1	60	9581,8	13 512	20 441	1,41	2,5
2		9439,5	13 355	23 638	1,41	2,504
3		14 544	22 147	38 622	1,523	2,656
1	80	9581,1	16 674	27 323	1,74	2,85
2		9444	16 656	25 663	1,763	2,717
3		14 545	29 322	50 810	2,016	3,49
1	120	9581,6	21 553	27 314	2,25	2,87
2		9451,8	21 747	25 670	2,3	2,71
3		14 550	43 384	74 648	3	5,13
(111)						
1	40	10011	10 100	17 964	1	1,79
2		9781,	9952,4	17 461	1,017	1,785
3		15 338	15 658	27 501	1,02	1,785
1	60	10117	13 863	24 575	1,37	2,429
2		9960,4	13 746	24 242	1,38	2,43
3		15 358	23 317	40 555	1,518	2,64
1	80	10 127	17 022	28 834	1,68	2,84
2		9973,5	17 037	27 081	1,708	2,715
3		15 376	30 865	53 370	2	3,47
1	120	10 155	21 868	28 853	2,15	2,84
2		10 004	22 044	27 118	2,203	2,71
3		15 416	45 630	78 387	2,96	5,08

Исследование остаточного механического напряжения в ЧЭ ММА с подвесами инерционной массы разной конструкции при термоударе. Практически у всех МЭМС-датчиков имеются остаточные механические напряжения, обусловленные используемыми материалами, конструкциями и технологией изготовления. Причины появления остаточного механического напряжения могут быть различными [12]. К ним, в частности, относится изменение температуры из-за разницы коэффициентов термического расширения материалов, из которых изготовлен ЧЭ, например кремния в сочетании с конструктивным основанием из стекла, соединенных методом сращивания.

В программе ANSYS выполнено моделирование остаточного механического напряжения в ЧЭ различных конструкций с элементами подвеса инерционной массы, соответствующими трем моделям. Изучено влияние на остаточное механическое напряжение изменения температуры от +150 до –150 °С за короткий интервал времени (10 с), что соответствует термическому удару (табл.2).

Таблица 2

Результаты расчета остаточного механического напряжения, МПа, в ЧЭ с элементами подвеса инерционной массы при изменении температуры от +150 до –150 °С за 10 с

Table 2

Results of the residual mechanical stress, MPa, in the sensitive element with elements of suspension of the inertial mass of three structures when the temperature changes from + 150 to –150 °C (for a period of 10 s)

Номер модели	Кристаллографическая ориентация кремния ЧЭ					
	(100)		(110)		(111)	
	Толщина элементов подвеса, мкм					
	40	120	40	120	40	120
1	114,75	147,51	158,75	208,77	165,53	213,28
2	114,54	145,56	158,58	206,63	165,26	210,56
3	157,12	206,7	193,3	262,61	225,97	297,36

На рис.2,*а* представлены результаты моделирования остаточного механического напряжения в ЧЭ из кремния с ориентацией (100) с элементами подвеса инерционной массы толщиной 40 мкм, на рис.2,*б* показано его изменение при температуре от +150 до –150 °С за короткий интервал времени (10 с) для трех моделей. Из графиков видно, что максимальные остаточные механические напряжения в ЧЭ при температурах +150 и –150 °С соответствуют максимальным деформациям подвесов инерционной массы. Чем больше деформации в ЧЭ, тем выше остаточное напряжение в подвесе. Важно, чтобы остаточное напряжение было ниже предела прочности кремния, равного 440 МПа, поскольку в противном случае ЧЭ акселерометра может выйти из строя.

Существенным фактором влияния на остаточное механическое напряжение в ЧЭ ММА является кристаллографическая ориентация кремния. Из данных табл.2 видно, что максимальное остаточное механическое напряжение имеет место в модели 3 при толщине элементов подвеса 120 мкм при ориентации кремния (111), минимальное – в модели 1 при толщине элементов подвеса 40 мкм при ориентации кремния (100). При ориентации (100) значения остаточного механического напряжения в моделях ЧЭ 1 и 2 с толщинами элементов подвеса 40 мкм наименьшие, что обеспечивает наибольшую чувствительность ММА. Вместе с тем очевидно, что чем меньше остаточное механическое напряжение в конструктивах ММА, тем лучше стабильность его параметров и выше надежность. Поэтому при разработке ММА с ЧЭ из кремния необходимо учиты-

вать эти факторы и находить компромиссные решения. Полученные данные необходимы при проектировании и разработке МЭМС-приборов с повышенной стабильностью параметров.

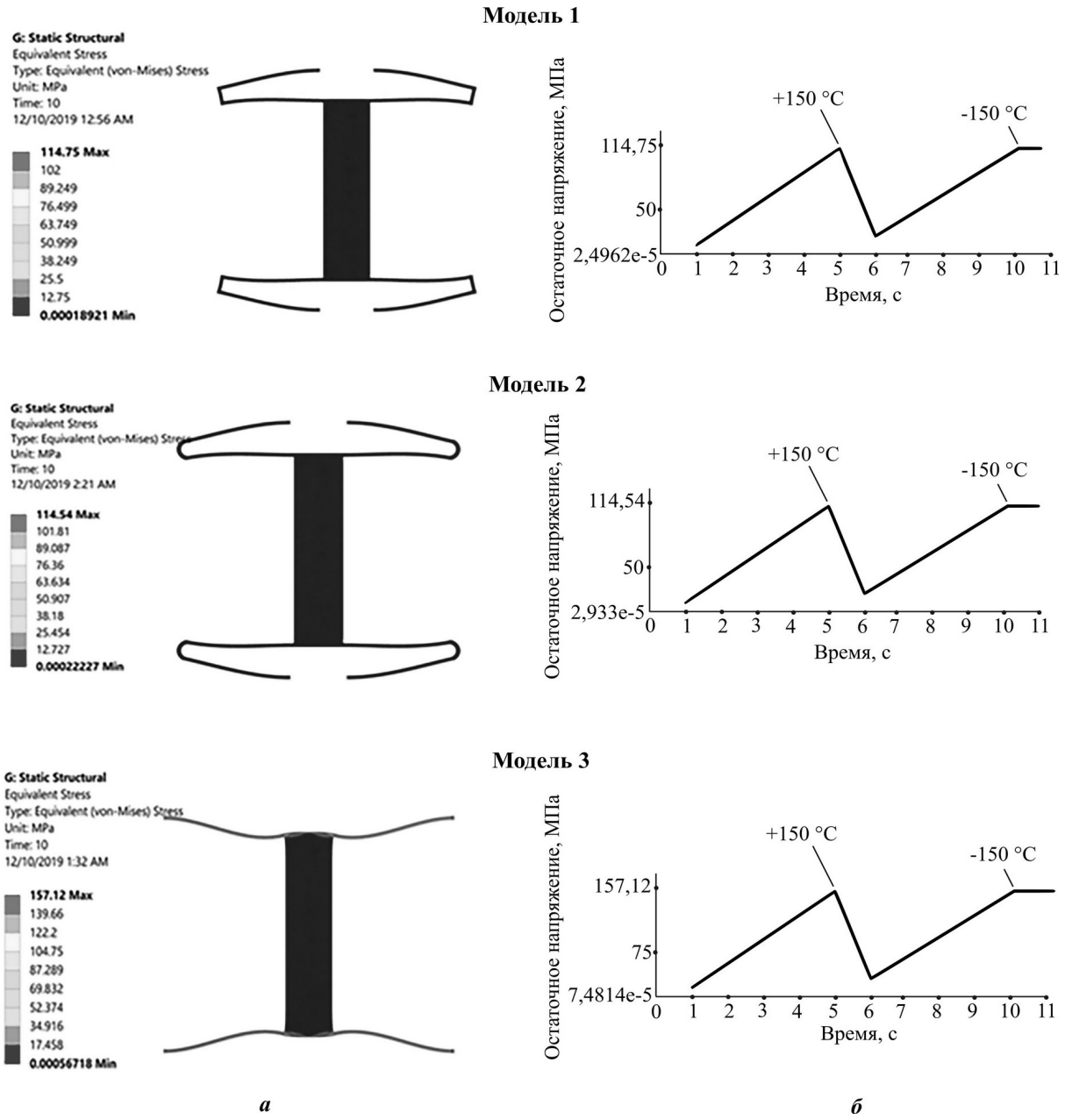


Рис.2. Результаты моделирования (*а*) и изменение (*б*) остаточного механического напряжения в ЧЭ из кремния с ориентацией поверхности (100) с элементами подвеса инерционной массы толщиной 40 мкм для моделей 1–3

Fig.2. Simulation results (*a*) and dynamics of changes (*b*) of the residual mechanical stress in the silicon sensitive element with (100) surface orientation with elements of suspension of inertial mass 40 μm thick of three structures for models 1–3

Исследование воздействия удара на элементы подвеса инерционной массы. Одним из наиболее важных условий, влияющих на выбор области применения и на коммерциализацию МЭМС-устройств, является их устойчивость к воздействию механических ударов. МЭМС могут подвергаться ударам во время изготовления, инсталлирования (развертывания в условиях функционирования) и непосредственно функционирования. Механический удар может вызывать высокодинамичные нагрузки на конструкции и привести к растрескиванию, сколу и разрушению изделия. В МЭМС ударные нагрузки могут испытывать микроструктуры, в частности подвесы. Остаточное механическое напряжение может возникать в элементах подвеса при ударе, его значение зависит от толщины и кристаллографической ориентации поверхности конструкционного материала – кремния. Чем меньше остаточное напряжение, тем больше сопротивление приборов воздействию внешних факторов.

Исследовано воздействие удара на элементы подвеса инерционной массы. Результаты расчета механических напряжений, возникающих в элементах подвеса при ударном воздействии A_X, A_Y, A_Z, для моделей 1–3 при разных ориентациях поверхности кремния приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты расчета механического напряжения в элементах подвеса из кремния с ориентацией (100), (110) и (111) при ударе 10 000 g

Table 3

Results of calculating the mechanical stress in the suspension elements of silicon with the orientations (100), (110) and (111) arising from an impact of 10 000 g

Толщина элементов подвеса, мкм	Внешний удар A, g			Напряжение, МПа		
	A_X	A_Y	A_Z	Модель 1	Модель 2	Модель 3
(100)						
40	10 000	–	–	37,78	40,27	3,1621
	–	10 000	–	290,7	277,7	256,44
	–	–	10 000	328,7	340,33	292,22
60	10 000	–	–	36,37	36,224	3,4169
	–	10 000	–	255,22	250,43	259,23
	–	–	10 000	249,99	241,37	208,97
80	10 000	–	–	35,40	36,079	3,239
	–	10 000	–	246,03	250,18	237,03
	–	–	10 000	202,06	197,8	144,63
120	10 000	–	–	33,223	35,13	3,3325
	–	10 000	–	232,76	245,69	225,21
	–	–	10 000	166,16	168,07	101,18
(110)						
40	10 000	–	–	44,6	46,94	3,4203
	–	10 000	–	307,77	322,59	296,34
	–	–	10 000	344,81	356,74	313,46
60	10 000	–	–	44,22	43,825	3,6372
	–	10 000	–	305,78	301,01	308,04
	–	–	10 000	237,22	253,95	224,39
80	10 000	–	–	44,07	44,581	3,4579
	–	10 000	–	303,92	306,44	292,24
	–	–	10 000	213,14	209,34	156,5
120	10 000	–	–	42,939	44,846	3,4945
	–	10 000	–	296,97	309,2	290,86
	–	–	10 000	174,86	176,43	–

Окончание

Толщина элементов подвеса, мкм	Внешний удар A, g			Напряжение, МПа		
	A_X	A_Y	A_Z	Модель 1	Модель 2	Модель 3
(111)						
40	10 000	–	–	38,314	40,184	3,1816
	–	10 000	–	265,33	281,13	259,53
	–	–	10 000	330,29	341,8	293,93
60	10 000	–	–	37,316	36,82	3,4329
	–	10 000	–	259,43	254,4	262,94
	–	–	10 000	251,08	242,55	210,24
80	10 000	–	–	36,073	36,73	3,2559
	–	10 000	–	250,53	254,52	241,3
	–	–	10 000	203,15	198,77	145,62
120	10 000	–	–	33,919	35,815	3,4945
	–	10 000	–	237,47	250,27	290,86
	–	–	10 000	167,4	168,66	109,19

Из полученных данных видно, что механическое напряжение, возникающее в элементах подвеса при ударе, зависит от толщины подвесов и кристаллографической ориентации материала основы. Минимальное напряжение имеет место в модели 3 при ориентации поверхности кремния (100) и толщине элементов подвеса 120 мкм. Если удар происходит по оси чувствительности X, то для этого случая получены минимальные механические напряжения. Минимальное остаточное напряжение характерно для всех исследованных моделей при ориентации поверхности кремния (100). Таким образом, модель 3 – наилучший ЧЭ ММА, поскольку этот вариант конструкции отличается минимальным остаточным напряжением. Чем больше толщина элементов подвеса, тем меньше остаточное напряжение. Вместе с тем следует учитывать, что увеличение толщины элементов подвеса уменьшает чувствительность ММА.

Заключение. Исследование трех моделей ЧЭ ММА емкостного типа, различающихся конструкцией элементов подвеса инерционной массы, показало следующее.

При ориентации кремния (111) модель 3 (элементы подвеса – прямые балки) с толщиной элементов подвеса 120 мкм имеет наибольшие резонансные частоты колебаний исследованных мод колебаний инерционной массы (1–3) и отношения резонансных частот колебаний разных мод по сравнению с моделями ЧЭ, изготовленными из кремния с ориентацией поверхности (100) и (110). Поэтому при использовании кремния с ориентацией (111) элементы подвеса (прямые балки толщиной 120 мкм) наилучшим образом подходят для высокоточного применения.

Для всех исследованных моделей ЧЭ установлено, что чем больше толщина элементов подвеса, тем больше значение отношения резонансных частот колебаний разных мод и тем выше стабильность его параметров. Для высокоточных применений нужны большие значения отношений резонансных частот колебаний разных мод. Расчеты показали, что при использовании ЧЭ из кремния с ориентацией поверхности (111) в модели 3 (элементы подвеса – прямые балки, толщина элементов подвеса 120 мкм) обеспечивается стабильность параметров ММА за счет максимального различия резонансных частот соседних мод колебаний.

При быстром изменении температуры от +150 до –150 °С за 10 с модели 1 и 2 с толщиной элементов подвеса 40 мкм имеют наименьшие остаточные механические напря-

жения (соответственно 114,75 и 114,54 МПа) в ЧЭ из кремния с ориентаций (100), в то время как прочность кремния составляет до 440 МПа. Из результатов расчетов следует, что при термическом ударе минимальные остаточные механические напряжения имеют место в элементах подвеса малой толщины (40 мкм).

При воздействии удара по рабочей оси X с амплитудой до 10 000 g возникающие механические напряжения в элементах подвеса ЧЭ наименьшие во всех исследованных моделях ЧЭ при ориентации поверхности кремния (100). Модель 3 по сравнению с моделями 1 и 2 имеет минимальное механическое напряжение (3,3325 МПа).

Литература

1. ***Hong Lianjin, Fang Erzheng.*** Model of frequency characteristics of capacitive accelerometers // IEEE International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 2010. P. 668–670.

2. ***Hadi Tavakoli, Hadi Ghasemzadeh Momen, Ebrahim Abbaspour Sani.*** Designing a new high performance 3-axis MEMS capacitive accelerometer // IEEE 25th Iranian Conference on Electrical Engineering (lCEE). 2017. P. 519–522.

3. ***Karbari Sudha R. Kumari Uttara, Pasha Roshan C. Gowda Vikas K.*** Design and analysis of serpentine based MEMS accelerometer // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1966. P. 194–198.

4. Design, fabrication and characterization of a high performance MEMS accelerometer / ***Fatemeh Edalatfar, Bahareh Yaghootkar, Abdul Qader Ahsan Qureshi et al.*** // Sensors Conference, Orlando, FL, USA 2017. P. 1–3.

5. ***Аунг Тхура.*** Влияние термоупругого демпфирования на параметры резонаторов частотных микроакселерометров // 24-я Всероссийская межвузовская науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика». М.: МИЭТ, 2017. С. 105.

6. ***Atsushi Kazama, Takanori Aono, Ryoji Okad.*** High shock-resistant design for wafer-level-packaged three-axis accelerometer with ring-shaped beam // Journal of Microelecromechanical System. 2018. Vol. 27. P. 1–9.

7. Исследование влияния температуры на работу резонатора частотного микромеханического акселерометра / ***Аунг Тхура, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенков и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. №3. С. 268–276.

8. ***Avinash Kamble, Siddheshwar Khillare***. Comparative study of different flexures of MEMS accelerometers // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2015. Vol. 4. P. 22–25.

9. ***Waichi W., Azid A.A., Mailis B.Y.*** Formulation of stiffness constant and effective mass for a folded beam // Archives of Mechanics. 2010. Vol. 62(5). P. 405–418.

10. ***Wai Chi Wong, Ishak Abdul Azid, Burhanuddin Yeop Majlis.*** Theoretical analysis of stiffness constant and effective mass for a round-folded beam in MEMS accelerometer // Journal of Mechanical Engineering. 2011. Vol. 57. P. 517–525.

11. Балансировка кремниевых датчиков угловой скорости в процессе изготовления / ***С.П. Тимошенков, Б.М. Симонов, О.М. Бритков и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2015. Т. 20. № 1. С. 58–67.

12. ***Girija Sravanil K., Koushik Guha, Srinivasa Rao K.*** Design and analysis of serpentine flexure based RF MEMS switch for high isolation with low pull in voltage // Spinger. Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2018. Vol. 20. P. 154–164.

Поступила в редакцию 23.04.2020 г.; после доработки 23.04.2020 г.; принята к публикации 30.06.2020 г.

Йе Ко Ко Аунг – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yekokoaung64675@gmail.com

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

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

References

1. Hong Lianjin, Fang Erzheng. Model Of Frequency Characteristics Of Capacitive Accelerometers. *IEEE International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation,* 2010, pp. 668–670.

2. Hadi Tavakoli, Hadi Ghasemzadeh Momen, Ebrahim Abbaspour Sani. Timoshenkov, Designing a New High Performance 3-Axis MEMS Capacitive Accelerometer. *IEEE 25th Iranian Conference on Electrical Engineering (lCEE)*, 2017, pp. 519–522.

3. Karbari Sudha R, Kumari Uttara, Pasha Roshan C, Gowda Vikas K. Design and analysis of serpentine based MEMS accelerometer. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1966, pp.194–198.

4. Fatemeh Edalatfar, Bahareh Yaghootkar, Abdul Qader Ahsan Qureshi, Soheil Azimi, Behraad Bahreyni, Design, Fabrication and Characterization of a High Performance MEMS Accelerometer. *Sensors Conference*, Orlando, FL, USA, 2017, pp. 1–3.

5. Aung Thura. Influence of thermoelastic damping on the parameters of resonators of frequency microaccelerometers. *24th all-Russian interuniversity scientific and technical conference of students and postgraduates: Microelectronics and Informatics*. Moscow, MIET, 2017, p. 105. (in Russian).

6. Atsushi Kazama, Takanori Aono, and Ryoji Okad. High shock-resistant design for wafer-level-packaged three-axis accelerometer with ring-shaped beam. *Journal of Microelecromechanical System,* 2018, vol. 27, pp. 1–9.

7. Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov S.P., Kyaw Myo Aung. Investigation of the effect of temperature on the operation of the resonator of a frequency micromechanical accelerometer. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of University. Electronics*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 268–276. (in Russian).

8. Avinash Kamble, Siddheshwar Khillare. Comparative study of different flexures of MEMS accelerometers. *International Journal of Engineering and Advanced Technology.* 2015, vol. 4, pp. 22–25.

9. Waichi W., Azid A.A., Mailis B.Y. Formulation of stiffness constant and effective mass for a folded beam. *Archives of Mechanics*, 2010, vol. 62(5), pp. 405–418.

10. Wai Chi Wong, Ishak Abdul Azid, Burhanuddin Yeop Majlis. Theoretical analysis of stiffness constant and effective mass for a round-folded beam in MEMS accelerometer. *Journal of Mechanical Engineering,* 2011, vol. 57, pp. 517–525.

11. Timoshenkov S.P., Simonov B.M., Britkov O.M. et al. Balancing silicon angular velocity sensors during manufacturing. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of University. Electronics,* 2015, vol. 20, no. 1, pp. 58–67. (in Russian).

12. Girija Sravanil K., Koushik Guha, Srinivasa Rao K. design and analysis of serpentine flexure based RF MEMS switch for high isolation with low pull in voltage. *Transactions on Electrical and Electronic Materials.* 2018, vol. 20, pp. 154–164.

Received 23.04.2020; Revised 23.04.2020; Accepted 30.06.2020.

Information about the authors:

Ye Ko Ko Aung – PhD student of the Institute Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yekokoaung64675@gmail.com

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

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

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА
INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

УДК 531.78.084.2:004 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-452-464**

Метод и аппаратно-программные средства для измерения с повышенной точностью высоты летательных аппаратов и спускаемых объектов

А.В. Макшаков[1,2], Ю.И. Штерн[1], О.С. Волкова[2], К.А. Васильченко[2]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]ООО «МЭКРУС», г. Королёв, Россия

makshakov@mekrus.ru

Для безопасного маневрирования, спуска и приземления сверхлегкой авиации, беспилотных воздушных судов, парашютной техники требуется повышенная точность определения высоты. В работе проведен критический анализ существующих методов измерения высоты для определения наиболее точных из них. Особое внимание уделено барометрическому методу. С целью снижения погрешностей измерения разработаны интеллектуальные датчики высоты и на их основе сконструирован опытный образец барометрического высотомера. В процессе компьютерного и макетного моделирования установлено, что в конструкции высотомера необходимо использовать несколько интеллектуальных датчиков высоты, причем на точность измерений существенным образом влияет расположение датчиков на летательном объекте. Разработанный метод измерения высоты с использованием таких датчиков включает в себя аппаратно-программную компенсацию погрешностей, вызванных атмосферными явлениями и аэродинамическими параметрами конструкции летательного объекта. Разработаны аппаратно-программные средства для обработки измеренных данных, а также программное обеспечение для функционирования интеллектуального датчика давления, автоматической обработки данных и вывода информации на дисплей высотомера. Предложенный метод и аппаратно-программные средства для измерения высоты в реальных условиях эксплуатации показали существенное снижение погрешностей, которые не превышают 1 м при движении в потоке воздуха на скоростях до 8 м/с и 5 м на скоростях до 70 м/с.

Ключевые слова: методы измерения высоты; летательные аппараты; интеллектуальный датчик высоты; аппаратно-программные средства; погрешность измерений

© А.В. Макшаков, Ю.И. Штерн, О.С. Волкова, К.А. Васильченко, 2020

Для цитирования: Макшаков А.В., Штерн Ю.И., Волкова О.С., Васильченко К.А. Метод и аппаратно-программные средства для измерения с повышенной точностью высоты летательных аппаратов и спускаемых объектов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 452–464. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5- 452-464

Method and Hardware-Software for Measuring Altitude of Aircraft and Descent Facilities with Increased Accuracy

A.V. Makshakov[1,2], Yu.I. Shtern[1], O.S. Volkova[2], K.A. Vasilchenko[2]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]LLC «MEKRUS», Korolev, Russia

makshakov@mekrus.ru

Abstract: Reliable, accident-free operation of extra light aviation, drone aircraft, the parachute equipment for landing of people and loads, demands to increase an accuracy of determination of height for the purpose of their safe maneuvering, descent and landing. In the work the critical analysis of existing methods of the height measurement has been carried out for the purpose of defining the most accurate ones and the preference has been given to the barometric method. To decrease the measurement errors, the smart altimeter sensors (SAS) intellectual sensors have been developed, and on their basis the prototype of a barometric altimeter have been designed. In the course of computer modeling and prototyping it has been determined that in designing the altimeter it is necessary to use several SAS, and the accuracy of measurements is essentially affected by an arrangement of sensors on a flying object. The developed method of the height measurement using SAS includes the hardware-software compensation of the errors, caused by the atmospheric phenomena and aerodynamic parameters of the flying object design. The hardware – software for processing the measured data has been developed as well as the software for functioning of intelligent pressure sensor, automatic data processing and the information output to the altimeter display. The tests on the offered technique and hardware – software have been carried out in actual practice of operation. The developed altimeter has been installed on the equipment of a parachutist. In the test result it has been determined that the developed original method and the hardware – software permit to significantly decrease the errors of measurements, which do not exceed 1 meter while the airflow moving at speeds up to 8 meters per second 5 meters up to 70 meters per second

Keywords: altitude measurement methods; flying objects; smart altitude sensor; hardware and software; measurement error

For citation: Makshakov A.V., Shtern Yu.I., Volkova O.S., Vasilchenko K.A. Method and hardware-software for measuring altitude of aircraft and descent facilities with increased accuracy. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 452–464. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-452-464

Введение. Надежная и безаварийная эксплуатация сверхлегкой авиации, беспилотных воздушных судов, парашютной техники для десантирования людей и грузов с целью их безопасного маневрирования, спуска и приземления требует повышения точности определения высоты. В настоящее время существует несколько методов, позволяющих определять высоту летательных аппаратов и спускаемых объектов. При этом параметр высоты может определяться различным начальным уровнем отсчета: истинная высота определяется как расстояние до точки на поверхности земли; относительная высота определяется от условного уровня, который может быть представлен высотой, с которой производился взлет, уровнем посадочной площадки, наивысшей точкой рельефа или же другим удобным для отсчета уровнем; абсолютная высота определяется относительно среднего уровня моря. Однако применение известных методов измерения высоты эффективно лишь в заданных условиях и не позволяет осуществлять полноценную навигацию без использования дополнительных методов определения высоты и компенсации погрешностей. Цель настоящей работы – разработка метода и аппаратно-программных средств для повышения точности измерения высоты летательных аппаратов и спускаемых объектов.

Анализ методов измерения высоты. На рис.1 показаны четыре уровня, относительно которых измеряется высота полета.

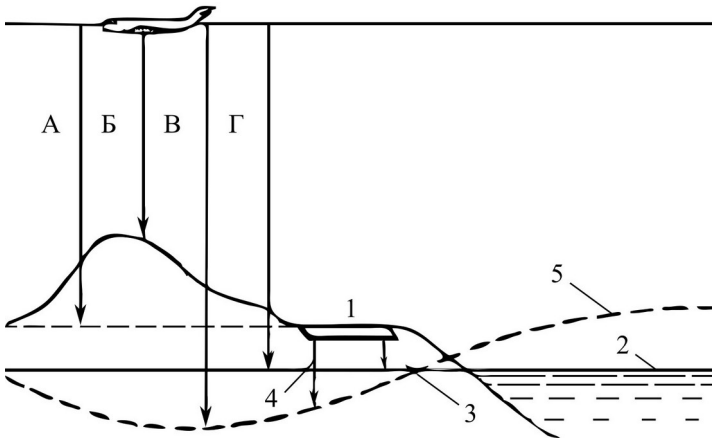


Рис.1. Высота полета относительно разных уровней отсчета: А – относительный уровень высоты (относительно полосы взлета); Б – истинная высота (относительно уровня земли); В – высота уровня эшелона (относительно стандартного давления 760 мм рт. ст.); Г – абсолютная высота (относительно уровня среднего уровня моря); 1 – взлетно-посадочная полоса; 2 – уровень моря; 3 – уровень абсолютной высоты аэродрома; 4 – барометрический уровень высоты

Fig.1. Flight height of rather different levels of counting: А – relative height (relative to the take-off strip); Б – true height (relative to ground level); В – height of the echelon (relative to the standard pressure of 760 mm Hg); Г – absolute height (relative to the average sea level); 1 – runway; 2 – sea level; 3 – the level of the absolute height of the airfield; 4 – barometric altitude level

Основная сложность при измерениях высоты состоит в том, что для разных задач уровень, относительно которого проводятся измерения, постоянно меняется. Как правило, для безопасной посадки большинства летательных аппаратов и спускаемых объектов необходимо знать относительный или истинный уровень до поверхности, на которую осуществляется приземление. Отметим, что измерения параметра высоты в

летательных объектах происходят с помощью косвенных принципов и методов измерения. Это может существенно снижать точность измерения показаний. Более того, большинство измерений происходит не в статических, а в динамических условиях, которые также могут вносить свои погрешности в измерения за счет различных эффектов, возникающих в окружающей среде. Такие эффекты могут быть вызваны инерциальными, аэродинамическими, погодными, антропогенными факторами, а также ландшафтными особенностями рельефа.

Проведем анализ радиоволнового, акустического, оптического, инерциального и барометрического методов измерения высоты с целью определения их преимуществ и недостатков.

Радиоволновой метод основан на измерении времени, которое требуется для получения сигнала отраженных радиоволн от земной поверхности либо сигнала от спутниковых передатчиков. Устройства, построенные по этому принципу, измеряют истинную высоту полета и называются радиовысотомерами, или спутниковыми высотомерами. Погрешности радиовысотомеров импульсного действия складываются из погрешностей от радиопомех и других инструментальных погрешностей [1, 2]. Спутниковые высотомеры для нормальной работы должны иметь постоянный сигнал не менее чем от трех спутников для определения высоты с высокой погрешностью, а для получения более точного значения требуется не менее четырех сигналов от спутников. Также на высоких скоростях движения из-за эффекта Доплера возможна потеря и искажение сигнала [3].

Акустический метод измерения высоты полета аналогичен радиоволновому, однако отличается тем, что вместо электромагнитных колебаний, которые генерируются на летательном аппарате и отражаются от земли, в роли источника сигнала выступают звуковые колебания. Акустическому высотомеру присущи температурная погрешность, а также погрешность, которая зависит от скорости движения летательного аппарата.

Оптический метод измерения высоты полета аналогичен радиоволновому и акустическому. Метод основан на отражении от земли светового луча, передатчиком служит оптический квантовый генератор (лазер), приемником – фотоэлемент. Оптический метод применяется в основном для контроля других типов высотомеров во время полета.

Инерциальный метод измерения высоты полета основан на двойном интегрировании вертикального ускорения летательного аппарата. Инерциальный высотомер состоит из акселерометра (датчика линейных ускорений) и интегрирующего устройства. Погрешности инерциального высотомера складываются из погрешностей акселерометра, неточной компенсации силы тяжести и интегрирующего устройства.

Барометрический высотомер измеряет высоту относительно некоторого уровня, давление воздуха на котором известно. Принцип действия барометрического высотомера основан на барометрической зависимости плотности воздуха на различных высотах. Эта экспоненциальная зависимость определяется формулой [4]

$$P = P_0 e^{\frac{\mu g h}{RT}}, \qquad (1)$$

где P_0 – текущее атмосферное давление над уровнем моря, Па; h – разница высот, м; μ = 0,029 кг/моль – молярная масса воздуха; R = 8,31 Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; g = 9,81 м/с^2 – ускорение силы тяжести; T – температура воздуха, К.

Согласно уравнению (1) можно определить высоту, зная барометрическое давление в заданной точке атмосферы. Барометрический метод основан на зависимости высоты

от известного давления воздуха на этой высоте. Благодаря такой реализации не требуется каждый раз осуществлять расчет уравнений для определения высоты. В аппаратной части устройств, основанных на данном методе, хранится двухмерная таблица, которая позволяет сопоставлять текущее измеренное значение давления и высоту (таблица).

Таблица значений давления воздуха для разных высот
The table of air pressure values for different altitudes

Высота, км	Давление, Па	Давление, мм рт. ст.
0,00	101 325	760,00
0,05	100 726	755,00
0,10	100 129	751,00
1,00	89 876	674,10
2,00	79 501	596,30
5,00	54 048	405,40
8,00	35 652	267,40
10,00	26 500	198,80
12, 00	19 399	145,50
15,00	12 112	90,80
20,00	5 529	41,50
30,00	1 197	8,98
50,00	79,8	0,59
100,00	$3{,}19\cdot10^{-2}$	$2{,}4\cdot10^{-4}$
120,00	$2{,}67\cdot10^{-3}$	$2{,}0\cdot10^{-5}$

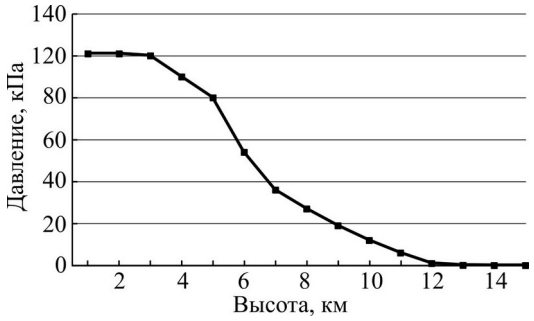


Рис.2. Зависимость атмосферного давления от высоты
Fig.2. Dependency of atmospheric pressure value on height

В более сложных технических решениях вводится температурная компенсация, которая учитывает плотность воздуха [5]. Для снижения погрешностей измерений в барометрическом методе часто применяется несколько таблиц корреляции значений давления и высоты. Это вызвано сложной экспоненциальной зависимостью значений высоты и давления (рис.2) согласно формуле (1), а также тем, что на низких высотах требуется более высокая точность измерений.

Несмотря на кажущуюся простоту рассмотренных методов, каждый из них имеет факторы, которые снижают точность измерений, а в отдельных случаях могут и вовсе ограничить получение информации о высоте.

Разработка интеллектуального датчика высоты. Барометрический метод измерения высоты за счет своей автономности наиболее распространен. Здесь возникают проблемы, которые требуется решать для разных применений [6]: изменение погодных условий, влияющих на атмосферное давление; влияние аэродинамических особенностей летательного аппарата; локальные аномалии в атмосфере (области турбулентности, низкого и высокого давления). Наличие указанных эффектов изменяет значение измеренного давления, тем самым искажаются показания высоты, что может привести к негативным и даже фатальным последствиям в отдельных случаях [7].

Для повышения точности измерения высоты летательных объектов за счет уменьшения влияния атмосферных факторов и аэродинамических эффектов, возникающих

при измерении высоты барометрическим методом, предлагается комбинированный метод измерений, который позволяет оценивать и компенсировать влияние негативных эффектов. Данный метод основан на использовании нескольких измерительных приборов, реализованных с применением разработанных интеллектуальных аппаратно-программных средств, не имеющих аналогов, включающих в себя датчики ускорения для определения изменения скорости движения. Предложенные измерительные аппаратно-программные средства, помимо проведения основных измерений высоты, отслеживают возможные искажения параметров среды, вызванные атмосферными явлениями и аэродинамическими эффектами, с целью их компенсации.

Основным элементом разработанных аппаратно-программных средств является интеллектуальный датчик высоты (ИДВ), который в процессе измерений компенсирует влияние аэродинамических эффектов, возникающих при движении на высоких вертикальных скоростях (более 10 м/с). Функционирование ИДВ возможно в сложных метеоусловиях при сильном постоянном или порывистом ветре, а также атмосферных осадках. В процессе моделирования ИДВ для визуализации потоков воздуха, воздействующих на различные формы конструкций в аэродинамической трубе, использована компьютерная модель, разработанная в программе RWIND Simulation. В результате моделирования установлено, что в разных частях конструкции летательных аппаратов десантной системы интенсивность потока воздуха может значительно варьироваться за счет аэродинамической формы объекта и направления движения. В определенных частях конструкции летательного аппарата и десантных систем образуются зоны повышенного давления в направлении движения (от набегающего потока воздуха), а в других – зоны пониженного давления воздуха (позади траектории движения объекта).

Таким образом, в случае расположения чувствительных элементов на части конструкции в направлении движения датчики будут фиксировать повышенное давление, соответственно барометрический высотомер будет выдавать заниженные показания. Чем выше скорость движения, тем больше погрешность. В случае расположения датчиков в области пониженного давления, напротив, показания будут искажены в сторону увеличения значения текущей высоты. Помимо этого, у летательных аппаратов существует аэродинамический эффект, возникающий в результате работы лопастей двигателей. Он выражается в изменении давления воздуха, обтекающего летательный аппарат, которое является переменной величиной, зависящей от скорости движения в воздушном потоке [8]. Оба эффекта одинаково опасны, и исключение их влияния позволит улучшить точность определения высоты и, как следствие, безопасность совершаемых полетов для летательных аппаратов и их пилотов.

По результатам моделирования установлена необходимость использования в конструкции ИДВ нескольких чувствительных элементов, расположенных в разных частях летательного аппарата. Места расположения датчиков определялись по специальной методике, предложенной в работе [9]. С помощью данной методики в процессе моделирования определены интенсивность воздействия потоков воздуха на чувствительные элементы датчиков давления, а также вектор направления этих потоков воздуха на разных плоскостях летательного аппарата. Структурная схема, разработанного ИДВ, представлена на рис.3.

В ИДВ в качестве чувствительных элементов давления воздуха использованы интегральные датчики фирмы NXP Semiconductors (модель MPL3115A2). Конструктивно датчик представляет собой компактный пьезорезистивный чувствительный элемент, выполненный по МЭМС-технологии. В структурную схему датчика входят измерительный мост Уитстона; датчик температурной компенсации; мультиплексор; усилитель сигнала; схема фильтрации; устройство АЦП; вычислительное устройство; цифровой

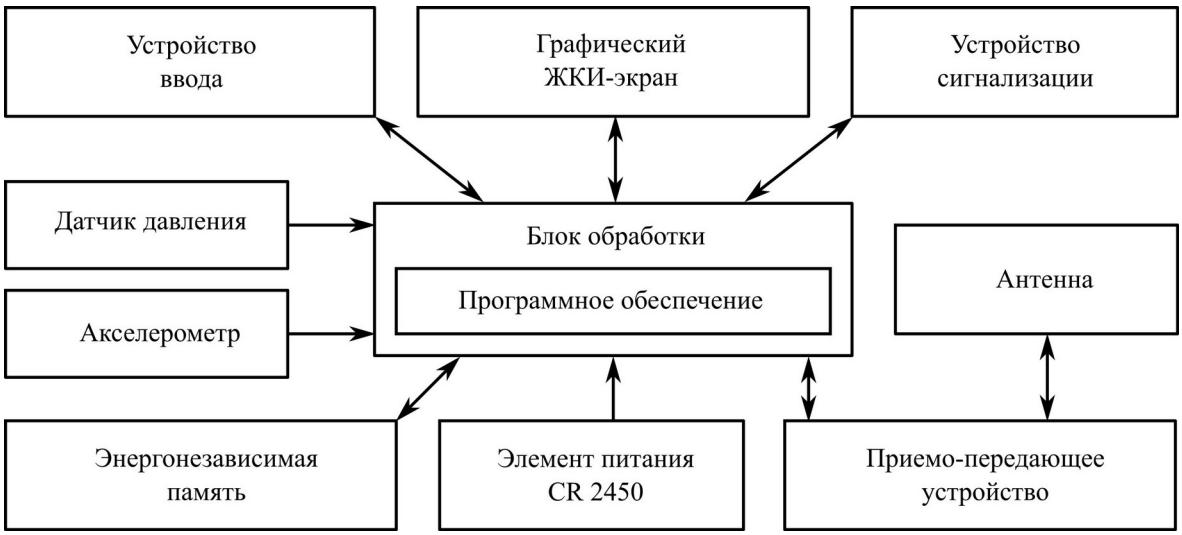


Рис.3. Структурная схема ИДВ
Fig.3. Block diagram of SAS

интерфейс. Датчики имеют высокую разрешающую способность (до 10 см) в интервале давления воздуха 50–110 кПа, а также разрешение 1 м в интервале 20–110 кПа. Это позволяет реализовать измерения высоты в диапазоне 698–11 750 м при атмосферном давлении 101,325 кПа (760 мм рт. ст.) на относительном уровне отсчета высоты. В разработанном методе измерения высоты определение вектора направления, в котором движется летательный аппарат, осуществляется с помощью датчика LSM9DS1TR компании ST Microelectronics с интегрированными МЭМС-датчиками трехосевого акселерометра, трехосевого гироскопа, а также трехосевого магнитометра. Указанные устройства в совокупности образуют инерциальную систему навигации в компактном корпусе размером 3×3,5×1 мм. В настоящем конструктивном решении ИДВ используется только акселерометр. В дальнейших разработках при совершенствовании работы алгоритмов планируется использование возможностей датчика LSM9DS1TR в полном объеме. Это позволит повысить точность измерений высоты без изменения аппаратной части ИДВ.

Для обработки сигналов используется микроконтроллер компании Texas Instruments серии MSP430. С помощью микропроцессора CC2640R2F выполняется связь между ИДВ по радиоканалу. Данный микропроцессор реализован на основе ядра ARM Cortex, имеет собственную систему инициализации, что позволяет использовать «спящий» режим, т.е. включается только в установленное время приема-передачи. Это существенно экономит энергию автономного источника питания. Наличие в ИДВ полностью реализованных унифицированных протоколов позволяет осуществлять подключение, прием и передачу данных по стандарту Bluetooth 5.0. В качестве антенны используется микрополосковая антенна на печатной плате. Конструкция антенны разработана и изготовлена с учетом рекомендаций разработчиков микропроцессора CC2640R2F.

Таким образом, ИДВ представляют собой энергоэффективные компактные устройства со встроенным радиочастотным интерфейсом для передачи данных и синхронизации работы датчиков. Конструкция ИДВ является усовершенствованной версией макетного устройства, ранее предложенного в работе [10]. Внешний вид опытных образцов ИДВ представлен на рис.4.

Корпус ИДВ содержит элементы управления, реализованные с помощью трехтактовых кнопок, графический экран для отображения информации, устройство звуковой сигнализации, модуль энергонезависимой памяти объемом 2 Мб и элемент питания с напряжением

3 В емкостью 600 мА. Вся элементная база размещена на единой печатной плате ИДВ.

В результате компьютерного моделирования установлено, что разные части фюзеляжа летательного аппарата испытывают различное давление в режимах изменения высоты. Поэтому необходимо с помощью моделирования или проведения испытаний в воздушном тоннеле определить области максимальной плотности потока (куда набегает воздух), а также области с минимальной плотностью потока (области разрежения воздуха).



Рис.4. Внешний вид опытных образцов ИДВ
Fig.4. Exterior of SAS prototypes

При разработке ИДВ оптимальным конструктивным решением являются устройства, которые позволяют проводить монтаж их на любой из поверхностей летательного аппарата. В связи с этим разработана герметичная конструкция корпуса, обеспечивающая защиту устройства от влаги (см. рис.4). Контакт чувствительного элемента ИДВ и атмосферы осуществляется с помощью тонкого мембранного фильтра из политетрафторэтилена. Данный вид фильтра (мембраны) позволяет передавать с минимальной инерцией давление воздуха за счет большой площади и крупных мембранных пор. При этом атмосферная влага не смачивает мембрану. Конструкция ИДВ обеспечивает защиту чувствительного элемента датчика абсолютного давления воздуха от попадания влаги, пыли и разрушительных УФ-лучей. Для удобства монтажа на корпусе ИДВ предусмотрены элементы крепления к фюзеляжу летательного аппарата или снаряжению парашютиста.

Для реализации одновременного измерения давления с помощью ИДВ в нескольких местах летательного объекта потребовалось обеспечить их беспроводную синхронизацию с применением разработанного программного обеспечения. При испытаниях использованы три ИДВ, один из которых проводил сбор рассчитанных данных высоты, сохранял данные в энергонезависимой памяти и индицировал показания высоты на экране ИДВ в режиме реального времени.

Алгоритм обработки сигнала, блок-схема которого представлена на рис.5, обеспечивает решение четырех параллельных задач.

Рассмотрим работу алгоритма ИДВ. При подаче питания происходит инициализация блока обработки, в котором выполняется алгоритм программного обеспечения. Далее в зависимости от конфигурации настроек, сохраненных в памяти, алгоритм переходит в режим трансляции или обработки показаний, инициализируя радиоканал. В режиме трансляции блок обработки считывает данные с измерительных датчиков и передает их в радиоканал с заданной частотой. В режиме обработки показаний блок обработки сигналов получает информацию от других датчиков по радиоканалу, а также считывает данные с собственных измерительных датчиков.

ИДВ, получающий информацию от других датчиков, выполняет постоянное сохранение показаний на внутреннюю энергонезависимую память. Также он оценивает изменения трехключевых параметров для каждого ИДВ: текущую высоту, скорость изменения высоты и показания акселерометра. В случае если скорость изменения высоты поменялась более чем на 5 м/с, но показания акселерометра остались прежними, алгоритм начинает рассчитывать показания исходя из последнего значения скорости изменения

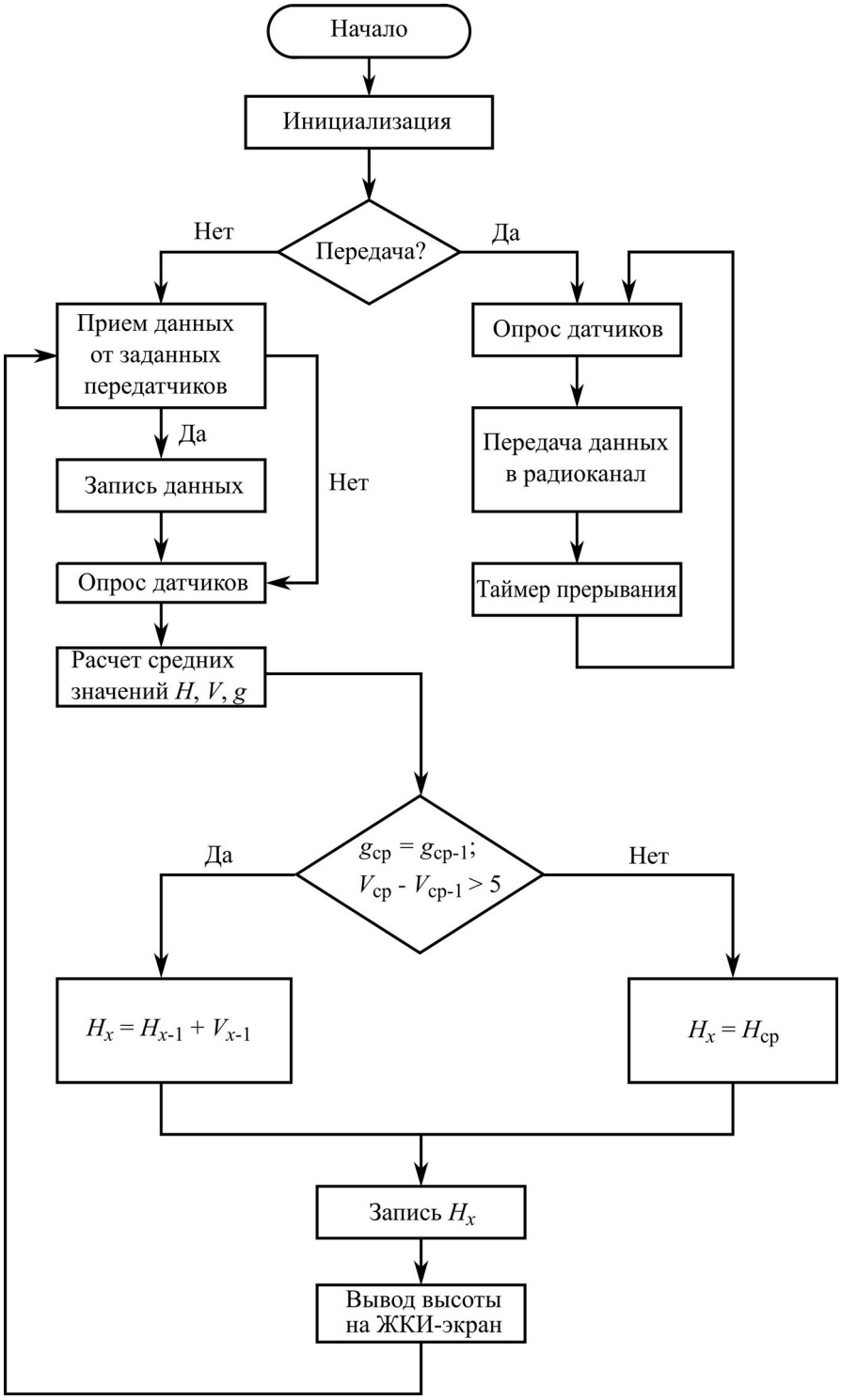


Рис.5. Алгоритм обработки сигналов ИДВ
Fig.5. Signal processing algorithm of SAS

высоты. Далее значения текущей высоты от всех ИДВ аппроксимируются и складываются с расчетным значением высоты. При наличии ускорений на акселерометре (происходит увеличение или уменьшение вертикальной скорости) алгоритм использует среднее значение показаний, полученных от ИДВ. В результате решаются следующие задачи: сбор показаний датчиков барометрического давления воздуха; расчет коэффици-

ента погрешности при определении давления; сбор показаний датчиков инерциальной системы (от акселерометра); расчет отклонений показаний акселерометра. Таким образом контролируется как изменение давления воздуха, так и показания акселерометра. При этом обеспечивается расчет адаптивных коэффициентов для компенсации погрешностей измерений с помощью аппроксимирующего фильтра. В настоящее время программное обеспечение реализует стабильную работу трех устройств ИДВ, однако планируется увеличить количество подключаемых датчиков до восьми.

Для проверки работоспособности разработанного метода и реализующих его аппаратно-программных средств проведены следующие экспериментальные исследования. В разных местах снаряжения парашютиста размещены три ИДВ. С помощью беспроводной связи сбор данных, расчет значения высоты и ее индикация проводились одним из трех «ведущих» ИДВ. Согласно проведенному моделированию аэродинамических процессов ИДВ размещались таким образом, чтобы часть из них находилась как в области избыточного давления, так и в области пониженного давления. Установка ИДВ проводилась следующим образом: первое устройство размещалось на груди, второе – в области между лопатками, третье – внутри закрытого шлема. Парашютист совершал прыжок с летательного аппарата АН-28 с высоты 4000 м относительно высоты аэродрома и с момента отделения от самолета находился в вертикальном положении.

После совершения прыжка данные, поступавшие от приборов ИДВ для графического отображения, синхронизировались с персональным компьютером. На рис.6 приведены кривые, построенные по данным изменения высоты, на которой находится парашютист, в зависимости от времени. Также на рисунке показана результирующая кривая, построенная с использованием программного метода компенсации погрешностей измерений, возникающих за счет атмосферных явлений, и с учетом аэродинамических параметров парашютиста.

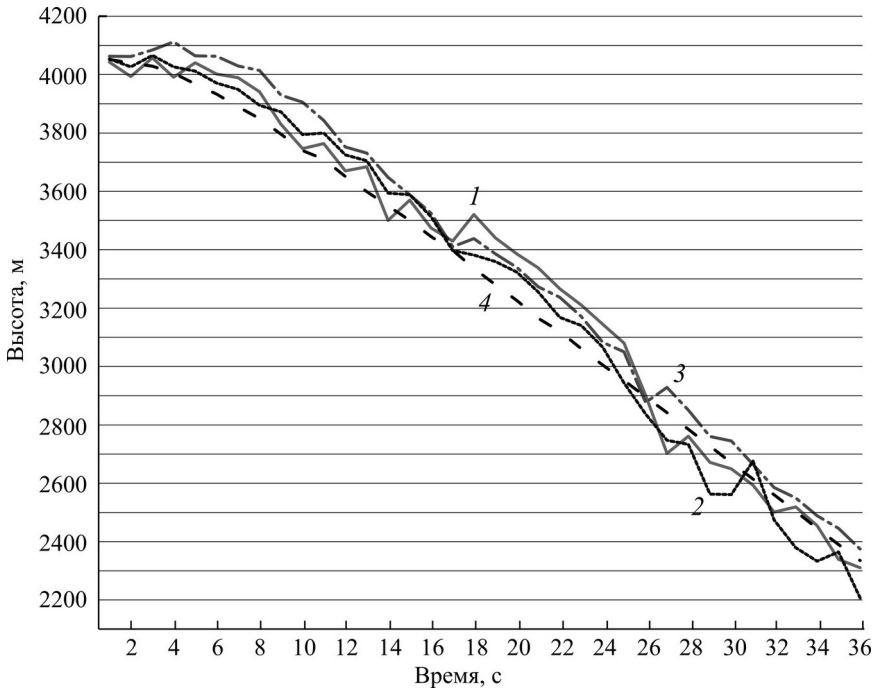


Рис.6. Зависимость высоты от времени для устройств ИДВ:
1 – ИДВ-1; *2* – ИДВ-2; *3* – ИДВ-3; *4* – программный метод
Fig.6. Skydiver altitude chart: *1* – SAS-1; *2* – SAS-2; *3* – SAS-3;
4 – software method

Согласно представленным на рис.6 результатам, использование трех ИДВ, расположение которых оптимизировано на летательном объекте, и программного метода компенсации погрешностей измерений (до ±100 м) позволило существенно повысить точность измерений. В результате испытаний установлено, что разработанный барометрический метод дает возможность определять высоту с погрешностью менее 1 м при движении в потоке воздуха на скоростях до 8 м/с и менее 5 м на скоростях до 70 м/с.

Заключение. Проведенный анализ существующих методов измерения высоты летательных объектов показал, что наиболее точным является барометрический метод.

Комбинированный метод измерений, основанный на использовании одновременно нескольких разработанных ИДВ, позволяет оценивать и компенсировать влияние негативных эффектов, определяющих погрешности измерений. Датчики реализованы на базе разработанных аппаратно-программных средств, не имеющих аналогов. ИДВ, помимо измерений высоты, отслеживают возможные искажения параметров среды, вызванные атмосферными явлениями и аэродинамическими эффектами, с целью их компенсации. Функционирование ИДВ возможно в сложных метеоусловиях при сильном постоянном или порывистом ветре, а также атмосферных осадках. Испытания предложенной методики и аппаратно-программных средств проведены в реальных условиях эксплуатации.

Литература

1. ***Коптев А.Н.*** Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации. Самара: Изд-во СГАУ, 2011. Кн. 2. 196. с.

2. ***Bo Li, Chao Xu, Xiaohui Li, Wenli Wa.*** Research and experimental validation of the method for barometric altimeter aid GPS in challenged environment // 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). 2018. P. 88–92. DOI: 10.1109/ICEMI.2017.8265725

3. ***Zaliva V., Franchetti Fr.*** Barometric and GPS altitude sensor fusion // 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2014. P. 7525–7529. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855063

4. ***Кикоин А.К., Кикоин И.К.*** Молекулярная физика. 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1976. С. 48–54.

5. ***Bolanakis Di. E., Kotsis Ko. T., Laopoulos Th.*** Temperature influence on differential barometric altitude measurements // 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). 2015. P. 120–124. DOI: 10.1109/IDAACS.2015.7340711

6. ***Xuan-Mung Ng., Sung-Kyung Ho.*** Barometric altitude measurement fault diagnosis for the improvement of quadcopter altitude control // 2019 19th international conference on control, automation and systems (iccas). 2019. P. 1359–1364. DOI: 10.23919/ICCAS47443.2019.8971729

7. ***Makshakov A.V., Shtern Yu.I.*** Determination method of the aircrafts flying height using absolute pressure sensors // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2020. P. 2379–2382. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039188

8. High-precision barometric altitude measurement method and technology / ***W. Zhu, Yu. Dong, G. Wang et al.*** // 2013 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). 2014. P. 430–435. DOI: 10.1109/ICInfA.2013.6720337

9. ***Mung N.Xu, Hong S.K.*** Improved altitude control algorithm for quadrotor unmanned aerial vehicles // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. P. 2122. DOI: 10.3390/app9102122

10. ***Shtern Yu.I., Karavaev I.S., Makshakov A.V., Larionov N.N.*** The research of measurement error for smart temperature sensors with wireless interface // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2019. P. 2117–2122. DOI: 10.1109/SED.2019.8798414

Поступила в редакцию 18.06.2020 г.; после доработки 18.06.2020 г.; принята к публикации 30.06.2020 г.

Макшаков Артем Владимирович – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), генеральный директор ООО «МЭКРУС» (Россия, 141080, г. Королёв, ул. Дзержинского, 27, помещение 3), makshakov@mekrus.ru

Штерн Юрий Исаакович – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), hptt@miee.ru

Волкова Ольга Сергеевна – инженер-специалист, научный сотрудник ООО «МЭКРУС» (Россия, 141080, г. Королёв, ул. Дзержинского, 27, помещение 3), 17volkovaos@gmail.com

Васильченко Кирилл Андреевич – инженер-специалист, младший научный сотрудник ООО «МЭКРУС» (Россия, 141080, г. Королёв, ул. Дзержинского, 27, помещение 3), vasilchenko.k4@gmail.com

References

1. Kopteyev A.N. *Aviation and radio-electronic equipment of civil aircraft.* Vol.2. Samara, SGAU Publ., 2011, 196 p. (in Russian).

2. Bo Li, Chao Xu, Xiaohui Li, Wenli Wa**.** Research and experimental validation of the method for barometric altimeter aid GPS in challenged environment. *2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI).* 2018, pp. 88–92. DOI: 10.1109/ICEMI.2017.8265725.

3. Zaliva V., Franchetti Fr. Barometric and GPS altitude sensor fusion. *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2014, pp. 7525–7529. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855063.

4. Kikoin A.K., Kikoin I.K. *Molecular physics*. Moscow, Nauka Publ., 2-nd ed., 1976, pp. 48–54. (in Russian).

5. Bolanakis Di. E., Kotsis Ko. T., Laopoulos Th. Temperature influence on differential barometric altitude measurements. *2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS),* 2015, pp. 120–124. DOI: 10.1109/IDAACS.2015.7340711.

6. Xuan-Mung Ng., Sung-Kyung Ho. Barometric Altitude Measurement Fault Diagnosis for the Improvement of Quadcopter Altitude Control. *2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS),* 2019, pp. 1359–1364. DOI: 10.23919/ICCAS47443.2019.8971729.

7. Makshakov A.V., Shtern Yu.I. Determination method of the aircrafts flying height using absolute pressure sensors. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus*), 2020, pp. 2379–2382. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039188.

8. Zhu W, Dong Yu, Wang G., Qiao Zh., Gao Fe. High-precision barometric altitude measurement method and technology. *2013 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA),* 2014, pp. 430–435. DOI: 10.1109/ICInfA.2013.6720337.

9. Mung N. Xu, Hong S.K. Improved altitude control algorithm for quadrotor unmanned aerial vehicles. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, 2122 p. DOI: 10.3390/app9102122.

10. Shtern Yu.I., Karavaev I.S., Makshakov A. V., Larionov N.N. The research of measurement error for smart temperature sensors with wireless interface. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus),* 2019, pp. 2117–2122. DOI: 10.1109/SED.2019.8798414

Received 18.06.2020; Revised 18.06.2020; Accepted 30.06.2020.

Information about the authors:

Artem V. Makshakov – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), General Director, LLC «MEKRUS» (Russia, 141080, Moscow region, Korolev, Dzerzhinsky st., 27, room 3), makshakov@mekrus.ru

Yuri I. Shtern – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), hptt@miee.ru

Olga S. Volkova – Engineer-Specialist, Researcher, LLC «MEKRUS» (Russia, 141080, Moscow region, Korolev, Dzerzhinsky st., 27, room 3), 17volkovaos@gmail.com

Kirill A. Vasilchenko – Engineer-Specialist, Junior Researcher, LLC «MEKRUS» (Russia, 141080, Moscow region, Korolev, Dzerzhinsky st., 27, room 3), vasilchenko.k4@gmail.com

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

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

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 004.4:53.088 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-465-474**

Анализ влияния эфемеридно-временной информации на точность решения навигационной задачи по сигналам системы ГЛОНАСС

В.О. Жилинский[1,2], Д.С. Печерица[2], Л.Г. Гагарина[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия
[2]Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г.п. Менделеево, Россия

incos@miee.ru

Глобальные навигационные спутниковые системы имеют множество приложений. Применение систем спутниковой навигации остается актуальным в транспортной области, включая наземный, воздушный и морской транспорт. Система ГЛОНАСС состоит из трех сегментов, и работа всей системы зависит от функционирования каждого компонента. В первую очередь точность измерений зависит от основообразующего сегмента контроля и управления, ответственного за формирование эфемеридно-временной информации. В работе проанализировано влияние эфемеридно-временной информации на точность решения навигационной задачи по сигналам спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС. Исследовано влияние эфемеридной информации, частотной и временной поправок в отдельности. Точность эфемеридно-временной информации особенно важна при решении навигационной задачи методом высокоточного абсолютного определения местоположения. Для анализа сформированы следующие сценарии решения навигационной задачи: использование высокоточной и штатной эфемеридно-временной информации; применение комбинации штатных (точных) эфемерид и точной (штатной) поправки к шкале времени навигационного космического аппарата; моделирование расчета относительной поправки к несущей частоте радиосигнала. Результаты исследования показали, что вклад частотно-временных поправок в погрешность определения местоположения имеет наибольшее значение, в то время как ошибки эфемеридной информации имеют несущественный характер.

© В.О. Жилинский, Д.С. Печерица, Л.Г. Гагарина, 2020

Ключевые слова: ГЛОНАСС; эфемеридно-временная информация; навигационная задача

Для цитирования: Жилинский В.О., Печерица Д.С., Гагарина Л.Г. Анализ влияния эфемеридно-временной информации на точность решения навигационной задачи по сигналам системы ГЛОНАСС // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 465–474. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-465-474

Analysis of Influence of Ephemeris-Time Information on Accuracy of Solving a Navigation Problem by Signals of GLONASS System

V.O. Zhilinskiy[1,2], D.S. Pecheritsa[2], L.G. Gagarina[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Russia

incos@miee.ru

Abstract: The Global Navigation Satellite System has a huge impact on both the public and private sectors, including the social-economic development, it has many applications and is an integral part of many domains. The application of the satellite navigation systems remains the most relevant in the field of transport, including land, air and maritime transport. The GLONASS system consists of three segments and the operation of the entire system depends on functioning of each component, but primarily, the accuracy of measurements depends on the basis forming of the control segment and management, responsible for forming ephemeris-time information. In the work, the influence of ephemeris-time information on the accuracy of solving the navigation problem by the signals of the GLONASS satellite navigation system has been analyzed. The influence of both ephemeris information and the frequency information, and of the time corrections has been individually studied. The accuracy of the ephemeris-time information is especially important when solving the navigation problem by highly precise positioning method. For the analysis the following scenarios of the navigation problem solving have been formed: using high-precision and broadcast ephemeris-time information, a combination of broadcast (high-precision) ephemeris-time information, and high-precision (broadcast) satellite clock offsets and two scenarios with simulation of the calculation of the relative correction to the radio signal carrier frequency. Based on the study results it has been concluded that the contribution of the frequency-time corrections to the error of location determination is of the greatest importance and a huge impact on the error location, while the errors of the ephemeris information are insignificant

Keywords: GLONASS; ephemeris-time information; navigation problem

For citation: Zhilinskiy V.O., Pecheritsa D.S., Gagarina L.G. Analysis of influence of ephemeris-time information on accuracy of solving a navigation problem by signals of GLONASS system. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 465–474. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-465-474

Введение. Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) – это комплексная электронно-техническая система, которая предназначена для определения местоположения и времени, а также параметров движения объектов различных типов. Системы спутниковой навигации затрагивают большое количество сфер социально-экономического развития и имеют множество приложений. На сегодняшний день применение ГНСС наиболее актуально в транспортной области, включая наземный, воздушный и морской транспорт. К важнейшим приложениям ГНСС относятся навигация, картография, службы поиска и спасения, мониторинг, геодезия и кадастровые работы, координация высокоманевренных объектов, синхронизация и научные исследования [1].

Система ГЛОНАСС состоит из трех сегментов: орбитальной группировки навигационных космических аппаратов, подсистемы контроля и управления, а также навигационной аппаратуры потребителей. Работа всей системы зависит от функционирования каждого сегмента. В первую очередь точность измерений зависит от основообразующего сегмента контроля и управления, ответственного за непрерывное уточнение параметров орбит навигационных космических аппаратов (НКА), формирование команд управления и эфемеридно-временной информации (ЭВИ).

Цель настоящей работы – анализ влияния ЭВИ на точность решения навигационной задачи.

Постановка задачи. Поскольку погрешность ЭВИ влияет на точность навигационно-временных определений для всех потребителей, проведение полноценного исследования влияния ЭВИ невозможно без оценки вклада каждой составляющей в отдельности как для эфемеридной информации (ЭИ), так и для частотно-временных поправок (ЧВП). Необходимо отметить, что ЧВП состоит из двух компонент, которые также следует оценивать отдельно. Расчет ЭИ и ЧВП проводится различными подсистемами сегмента контроля и управления в отдельности. Количественная оценка влияния ЭИ и ЧВП позволяет выявить первоочередную необходимость модернизации той или иной подсистемы, например, бортовых стандартов частоты навигационных космических аппаратов или наземных измерительных средств сегмента контроля и управления.

Анализ записанных навигационных сообщений с помощью навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ГНСС показал, что передаваемая относительная поправка к несущей частоте навигационного радиосигнала (ОПНЧ) часто равна нулю, а сдвиг шкалы времени НКА при этом нулю не равен. Приведем пример части кадра навигационного сообщения для НКА R01 в формате RINEX [2] (поправка к несущей частоте навигационного радиосигнала подчеркнута):

```
R01 2020 01 18 11 45 00 5.577690899372D-05 0.000000000000D+00 5.598300000000D+05
     1.783657812500D+04-5.442123413086D-01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
     1.729928613281D+04-5.932779312134D-01 9.313225746155D-10 1.000000000000D+00
    -5.801111816406D+03-3.443367004395D+00 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
```

Поскольку НАП в процессе решения навигационной задачи пересчитывает поправку к бортовым шкалам времени, используя ОПНЧ, полученное значение поправки будет отличаться от истинного. Влияние нулевого значения ОПНЧ также оценивается в ходе эксперимента.

Для исследования влияния ЭВИ сформированы шесть сценариев решения навигационной задачи с использованием:

1. Апостериорной высокоточной ЭВИ, предоставленной информационно-аналитическим центром контроля ГЛОНАСС и GPS [3].
2. ЭВИ из навигационного сообщения (штатной).
3. Комбинации штатных эфемерид и точной поправки к шкале времени НКА.

4. Комбинации точных эфемерид и штатной поправки к шкале времени НКА.
5. ЭВИ из навигационного сообщения со всеми значениями ОПНЧ, равными 0.
6. ЭВИ из навигационного сообщения и моделирование расчета ОПНЧ.

Сценарии 1 и 2 – стандартное решение навигационной задачи с применением апостериорной и штатной ЭВИ, сценарии 3–6 представлены для покомпонентного анализа влияния ЭВИ. Для решения навигационной задачи и анализа результатов для всех представленных сценариев используется аппаратно-программный комплекс моделирования решения навигационной задачи потребителем ГНСС [4].

Теория. Основным содержанием навигационной задачи в спутниковой радионавигационной системе является определение вектора состояния потребителя – пространственных координат потребителя, составляющих вектора его скорости, а также текущего времени [5]. Определение координат потребителя сигналов ГНСС возможно различными методами. Наиболее распространен псевдодальномерный метод, основанный на измерениях беззапросной дальности между НКА и НАП.

В навигационной аппаратуре потребителя формирование оценки беззапросной дальности основано на измерении момента приема заданной фазы дальномерного кода и расчете ее запаздывания относительно момента формирования той же фазы дальномерного кода на борту космического аппарата, информация о котором извлекается из навигационного сообщения. В ГНСС ввиду большого разноса передающей и приемной позиций фиксация моментов излучения и приема сигнала не может выполняться в одной шкале времени. Поэтому при определении дальности до спутника учитывается разница бортовой шкалы времени и шкалы времени потребителя (δt). Так же неидеальна синхронизация шкал времени НКА всей орбитальной группировки. Следовательно, ошибку синхронизации шкал времени каждого НКА (δt_i) также необходимо учитывать при обработке измерений беззапросной дальности (δt_i).

Наиболее полная модель псевдодальности со всеми составляющими может быть записана в следующем виде [6]:

$$R_i=\rho_i+c(\delta t-\delta t_i)+RG_i+T_i+I_i+b_i+M_i+\varepsilon_i, \qquad (1)$$

где $\rho_i=\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2+(z_i-z)^2}$ – дальность между i-м спутником и НАП; δt – смещение шкалы времени НАП; δt_i – смещение шкалы времени спутника; RG_i – погрешность из-за релятивистских и гравитационных эффектов; T_i – тропосферная погрешность; I_i – ионосферная погрешность; b_i – погрешность приемной аппаратуры; M_i – погрешность многолучевого распространения; ε_i – прочие составляющие погрешности.

В уравнении (1) для расчета геометрической дальности ρ_i необходимо наличие координат i-го НКА, которые можно извлечь из навигационного сообщения. При работе в режиме реального времени по реальным навигационным сигналам пользователю доступна информация о координатах НКА с интервалом 30 мин. Для определения координат НКА внутри 30-минутного интервала можно воспользоваться алгоритмами расчета координат и составляющих вектора скорости центра масс НКА по данным эфемерид на заданный момент времени, приведенных в интерфейсном контрольном документе [7]. Пересчет эфемерид потребителем с момента t_b на заданный момент времени t_i той же шкалы проводится методом численного интегрирования дифференциальных уравнений движения центра масс НКА. Начальными условиями для интегрирования дифференциальных уравнений в упрощенном алгоритме являются координаты $x = x(t_b)$, $y = y(t_b)$, $z = z(t_b)$, составляющие вектора скорости $V_x = \dot{x}(t_b)$, $V_y = \dot{y}(t_b)$, $V_z = \dot{z}(t_b)$ и возмущающие ускорения $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ центра масс НКА на момент t_b, передаваемые в навигационном сообщении. Возмущающие ускорения $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ есть постоянные величины на интервале

±15 мин относительно момента t_b. В качестве метода численного интегрирования предлагается использовать метод Рунге – Кутта 4-го порядка.

Помимо пересчета эфемерид для каждого НКА необходимо рассчитать поправку к бортовой шкале времени на заданный момент времени. Информацию для этого также можно извлечь из навигационного сообщения. В расчете участвуют относительная поправка к несущей частоте навигационного радиосигнала (параметр γ_N в интерфейсном контрольном документе (ИКД)) и сдвиг шкалы времени n-го НКА t_n относительно шкалы времени системы ГЛОНАСС (параметр τ_N в ИКД). Пересчет значения поправки τ к бортовым шкалам времени осуществляется по следующей формуле:

$$\tau = \gamma_N t + \tau_N. \quad (2)$$

Пересчет поправки к бортовым шкалам времени по ИКД проводится на 30-минутном интервале относительно известного значения поправки к бортовым шкалам времени на момент t_b. Для оценки фактического влияния ЧВП при наличии ненулевых значений ОПНЧ моделируется закладка этих значений в навигационное сообщение. Для этого предусмотрены сценарии 5 и 6 решения навигационной задачи. ОПНЧ рассчитывается согласно формуле (2) после ее преобразования:

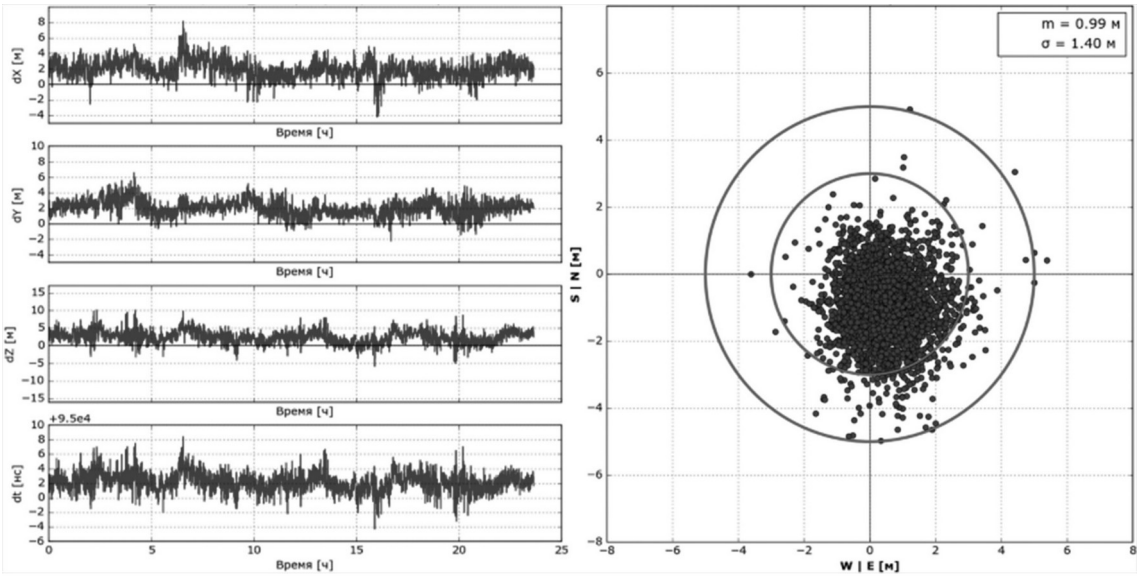
$$\gamma_N = \frac{\tau - \tau_N}{t}.$$

При расчете ОПНЧ на момент времени t_b учитывались известные значения поправок к бортовым шкалам времени на моменты времени t_b и t_{b-1}. Рассчитанная таким образом ОПНЧ затем заменяла в навигационном сообщении только те исходные значения, которые были равны нулю.

Реализация разбора файлов навигационных сообщений RINEX, пересчет эфемерид на заданный момент времени, интерполирование координат местоположения НКА ГЛОНАСС и расчет значения поправки к бортовым шкалам времени проводятся отдельным модулем аппаратно-программного комплекса моделирования решения навигационной задачи потребителем ГНСС, написанным на языке Python [4]. Для решения навигационной задачи с использованием ЭВИ из навигационного сообщения со всеми значениями ОПНЧ, равными 0, и для возможности моделирования расчета ОПНЧ (сценарии 5 и 6) написан отдельный скрипт, заменяющий соответствующие значения поправок в файле навигационных сообщений. Для сценариев, в которых используется комбинация с применением штатных эфемерид и точной поправки к шкале времени НКА и комбинация с использованием точных эфемерид и штатной поправки к шкале времени НКА, объединены данные ЭИ и ЧВП, соответствующие каждой из комбинации (сценарии 3 и 4). Затем для этих сценариев решается навигационная задача в стандартном режиме. Изменения касаются только исходных данных.

Результаты эксперимента. Первичные навигационные измерения получены на суточных интервалах с помощью навигационной аппаратуры потребителя JAVAD Sigma G3T в комплекте с широкодиапазонной антенной NovAtel GNSS-750. При решении навигационной задачи для всех сценариев применяются общие параметры: измерения проводятся по сигналам высокой точности системы ГЛОНАСС; интервал измерений равен 30 с; маска угла возвышения НКА > 5º (для борьбы с многолучевым распространением сигнала). Также учитываются смещение шкалы времени НКА (из файла высокоточных и штатных эфемерид); перемещение НКА за время распространения сигнала; релятивистские и гравитационные эффекты (эллиптическая орбита НКА, вращение Земли); инструментальная систематическая погрешность измерения псевдодальности в навигационном приемнике [8]; задержка сигнала в тропосфере (модель MOPS) и ионосфере (ионосферно-свободная комбинация).

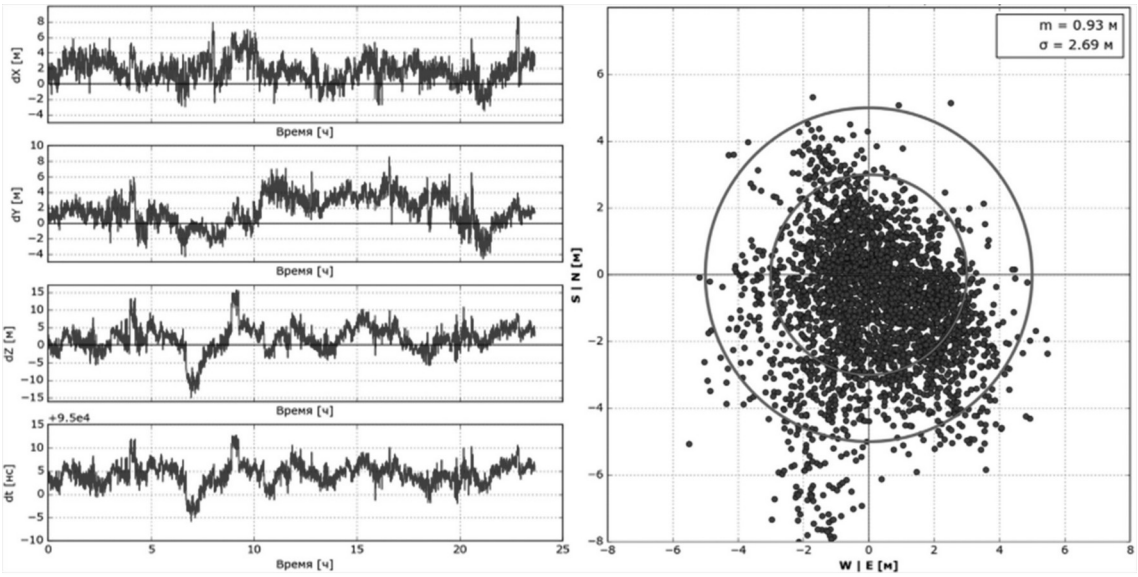
Дальнейшее представление результатов эксперимента проводится в сравнении со сценарием 1 (решение по апостериорной высокоточной ЭВИ). На рис.1–4 для каждого сценария приведены графики, характеризующие случайную составляющую погрешности определения пространственных прямоугольных координат *X*, *Y*, *Z* и времени, а также погрешность определения координат на плоскости. Полученные в результате решения навигационной задачи пространственные координаты потребителя ГНСС переведены в геодезические координаты.



а ***б***

Рис.1. Погрешность определения пространственных координат и времени (*а*) и погрешность в плане (*б*) с использованием апостериорной высокоточной ЭВИ

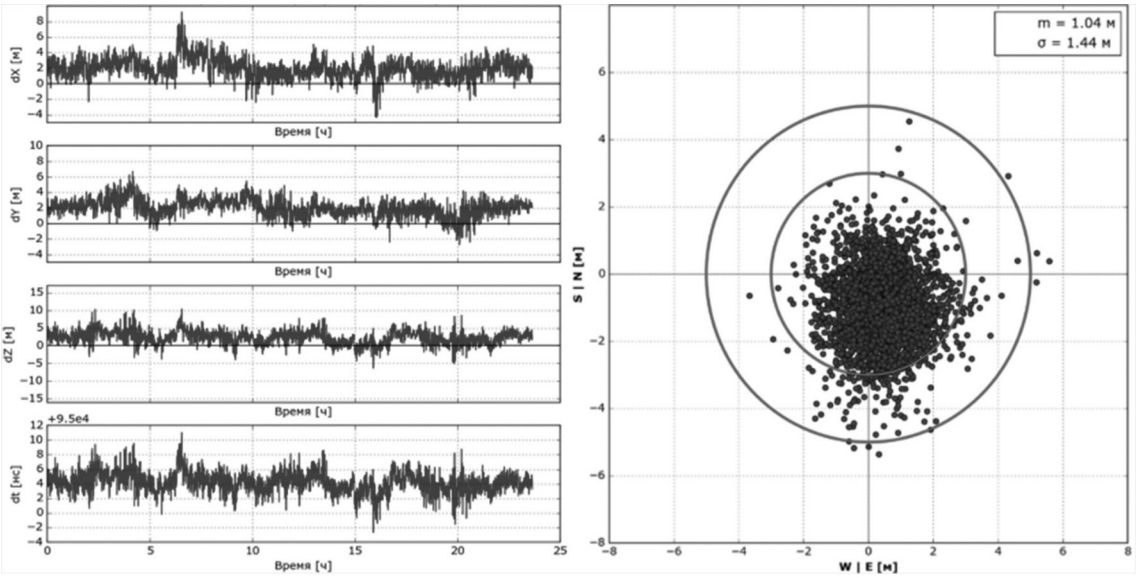
Fig.1. 3D (*a*) and plane (*b*) coordinates determination error obtained with the use of high-precision ephemerides information and frequency-time corrections



а ***б***

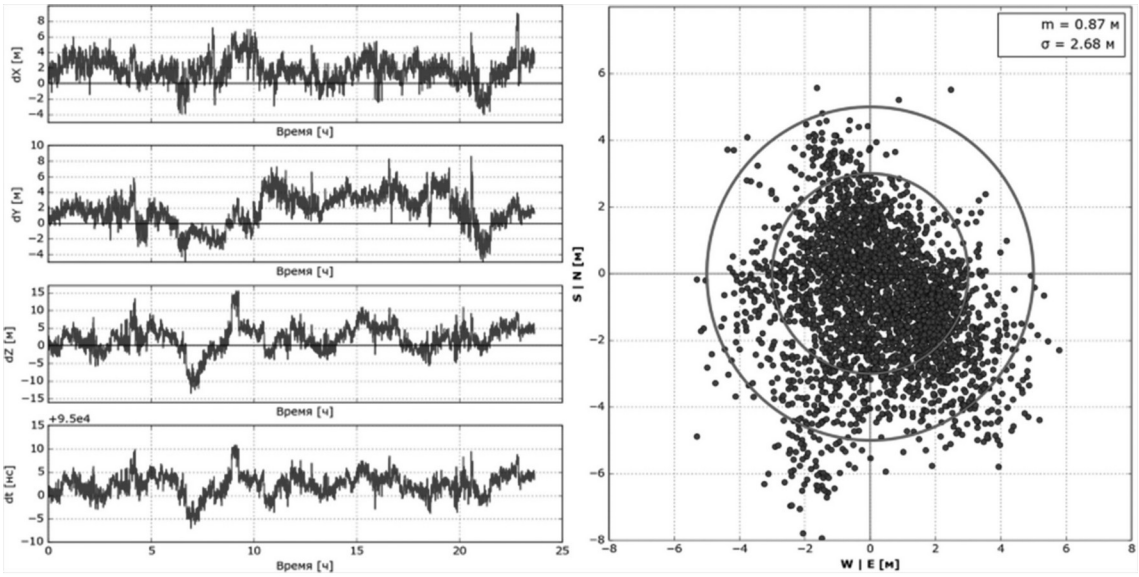
Рис.2. Погрешность определения пространственных координат и времени (*а*) и погрешность в плане (*б*) с использованием штатной ЭВИ

Fig.2. 3D (*a*) and plane (*b*) coordinates determination error obtained with the use of broadcast ephemerides information and frequency-time corrections



а ***б***

Рис.3. Погрешность определения пространственных координат и времени (*а*) и погрешность в плане (*б*) с использованием штатных эфемерид и точной поправки к шкале времени НКА
Fig.3. 3D (*a*) and plane (*b*) coordinates determination error obtained with the use of broadcast satellite ephemerides and high-precision frequency-time corrections



а ***б***

Рис.4. Погрешность определения пространственных координат и времени (*а*) и погрешность в плане (*б*) с использованием точных эфемерид и штатной поправки к шкале времени НКА
Fig.4. 3D (*a*) and plane (*b*) coordinates determination error obtained with the use of high-precision ephemerides and broadcast frequency-time corrections

На рис.1 и 2 представлены погрешности определения пространственных координат и координат в плане при решении навигационной задачи с использованием апостериорной высокоточной ЭВИ (сценарий 1) и штатной ЭВИ (сценарий 2). Соответствующие значения среднеквадратического отклонения (СКО) погрешности определения координат в плане равны 1,40 и 2,69 м. В сценарии 3 навигационная задача решалась в комбинации с использованием штатных эфемерид и точной поправки к шкале времени НКА. В сценарии 4 использовалась обратная комбинация – точные эфемериды и штатная по-

правка к шкале времени НКА. Графики погрешности определения пространственных координат и координат в плане для соответствующих сценариев приведены на рис.3 и 4. Рассчитанные значения СКО погрешностей составляют 1,44 м (сценарий 3) и 2,68 м (сценарий 4). Графики для сценариев 5 и 6 не приводятся в силу незначительных отличий погрешностей определения координат относительно соответствующих погрешностей при решении навигационной задачи по сценарию 2. Значения СКО погрешности практически не изменились и находятся на том же уровне (2,69 и 2,67 м).

Обсуждение результатов. Результаты решений по всем сценариям приведены в таблице, в которой представлены СКО погрешности определения пространственных координат и оценки поправки шкалы времени потребителя к системной шкале времени, а также СКО погрешности определения геодезических координат для всех шести сценариев.

СКО погрешности определения пространственных прямоугольных координат, поправки шкалы времени потребителя ГНСС и координат в плане
Standard deviation of the 3D coordinates error and receiver clock offset, plane coordinates error

Тип ЭВИ	$СКО_X$	$СКО_Y$	$СКО_Z$	$СКО_{dt}$	СКО погрешности в плане
Апостериорная ЭВИ	1,20	1,04	1,90	1,37	1,40
Штатные ЭВИ	1,67	2,05	3,86	2,47	2,69
Штатные эфемериды и апостериорные ЧВП	1,31	1,13	2,00	1,48	1,44
Апостериорные эфемериды и штатные ЧВП	1,71	2,18	3,80	2,44	2,68
Штатные ЭВИ и ОПНЧ, равная 0	1,67	2,05	3,86	2,47	2,69
Штатные ЭВИ и моделирование расчета ОПНЧ	1,64	2,01	3,91	2,49	2,67

Сравнивая результаты эксперимента, можно увидеть, что наилучший результат получен при решении с использованием апостериорной высокоточной ЭВИ. Однако в большинстве случаев потребитель не имеет возможности ждать несколько дней обработки исходных данных аналитическим центром и расчета апостериорной ЭВИ. При работе в режиме реального времени потребителю доступна лишь штатная ЭВИ. СКО погрешности определения координат в плане по штатной ЭВИ примерно в 2 раза хуже, чем при работе по апостериорной ЭВИ. Значительную разницу СКО также хорошо видно при сравнении значений, получаемых при решении по штатной ЭВИ и по комбинации штатных эфемерид с апостериорными ЧВП (сценарий 3). В покомпонентном сравнении СКО видна небольшая разница в пользу решения по сценарию 1.

Рассчитанные значения СКО погрешности определения координат для остальных сценариев незначительно отличаются как между собой, так и относительно значений в сценарии 1. Сценарии 5 и 6, где основной акцент сделан на анализе влияния ОПНЧ, показали, что при текущей точности определения поправки к бортовой шкале времени НКА и стабильности опорных генераторов точность определения местоположения потребителя ГНСС остается неизменной.

Заключение. Сравнение решений навигационной задачи для шести различных вариантов «источников» ЭВИ показало, что наибольший вклад в погрешность определения координат и времени вносят частотно-временные поправки. Для сценариев 1 и 4 СКО погрешности определения координат в плане приблизительно в 2 раза больше.

При сравнении сценариев 1 и 3 установлено, что ошибки эфемерид вносят незначительный вклад в погрешность определения вектора состояния потребителя, а точность решения навигационной задачи находится на уровне точности решения по апостериорным эфемеридам. Также определено, что при текущем уровне точности ЧВП нулевые значения ОПНЧ имеют несущественный характер влияния.

Сравнение результатов решений навигационной задачи показало, что при незначительной потере в точности (сценарии 1 и 3) можно значительно снизить нагрузку на канал данных, отказавшись от передачи точной ЭИ и ограничиваясь только ЧВП. На основании результатов проведенного эксперимента можно сделать вывод, что более совершенная система расчета ЧВП позволит повысить точность определения местоположения потребителя.

Литература

1. Официальный сайт госкорпорации «Роскосмос». URL: https://www.roscosmos.ru/ (дата обращения: 20.05.2020).

2. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format. URL: ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf (дата обращения: 20.05.2020).

3. Высокоточная эфемеридно-временная информация для ГЛОНАСС и GPS. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. URL: ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ (дата обращения: 20.05.2020).

4. ***Zhilinskiy V.O., Pecheritsa D.S., Silvestrov I.S., Fedotov V.N.*** Software package for modeling the solution of satellite navigation problem // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, 2018. P. 302–307.

5. ***Яценков В.С.*** Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. М.: Горячая линия - Телеком, 2005. 272 с.

6. ***Перов А.И.*** ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под. ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

7. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1. М.: Координац. науч. информ. центр ВКС России, 2008. 74 с.

8. ***Pecheritsa D.S.*** GLONASS receivers calibration in pseudorange Biases // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, 2018. P. 255–258.

Поступила в редакцию 22.05.2020 г.; после доработки 22.05.2020 г.; принята к публикации 30.06.2020 г.

Жилинский Владислав Олегович – аспирант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), младший научный сотрудник лаборатории 841 Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (Россия, 141570, Московская обл., Солнечногорский р-н, г.п. Менделеево), vladzhilinsky@mail.ru

Печерица Дмитрий Станиславович – кандидат технических наук, начальник лаборатории 841 Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (Россия, 141570, Московская обл., Солнечногорский р-н, г.п. Менделеево), pecheritsa_ds@vniiftri.ru

Гагарина Лариса Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, директор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), incos@miee.ru

References

1.*The official website of the state corporation «Roscosmos»*. Available at: https://www.roscosmos.ru/ (accessed: 20.05.2020). (in Russian).

2.*RINEX. The Receiver Independent Exchange Format*. Available at: ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf (accessed: 20.05.2020).

3.*High-precision ephemeris-time information for GLONASS and GPS. Information and analysis center for positioning, navigation and timing*. Available at: ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/(accessed: 20.05.2020). (in Russian).

4. Zhilinskiy V.O., Pecheritsa D.S., Silvestrov I.S., Fedotov V.N. Software package for modeling the solution of satellite navigation problem. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, 2018, pp. 302–307. (in Russian).

5. Yatsenkov V.S. *The basic knowledge of satellite navigation. GPS systems Navstar and GLONASS.* Moscow, Hot line, Telekom Publ., 2005. 272 p. (in Russian).

6. Perov A.I., Kharisov V.N. *GLONASS. Buiding-up and functioning principals.* Moscow, Radiotekhnica Publ., 2010. 800 p. (in Russian).

7.*GLONASS Interface Control Document, Edition 5.1.* Moscow, Russian Institute of Space Device Engineering, 2008. (in Russian).

8. Pecheritsa D.S. GLONASS Receivers Calibration in Pseudorange Biases. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE),* Novosibirsk Publ., 2018, pp. 255–258.

Received 22.05.2020; Revised 22.05.2020; Accepted 30.06.2020.

Information about the authors:

Vladislav O. Zhilinskiy – PhD student of the Institute of System and Software Engineering and Computer Science, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Junior Researcher of the Laboratory 841, Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (Russia, 41570, Moscow region, Solnechnogorsky district, Mendeleevo), vladzhilinsky@mail.ru

Dmitry S. Pecheritsa – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory 841, Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (Russia, 41570, Moscow region, Solnechnogorsky district, Mendeleevo), pecheritsa_ds@vniiftri.ru

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of System and Software Engineering and Computer Science, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), incos@miee.ru

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

Внимание! Введены новые требования к выполнению рисунков.

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

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

Основные рубрики:

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

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом ***в 2-х экземплярах.***
2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.
3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).
4. Лицензионный договор о передаче авторского права в 2-х экземплярах. Форму лицензионного договора 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 также должны быть переведены на английский язык.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

- оформляется отдельным файлом;

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru

МИЭТ
55 лет

Проекты развития МИЭТ последнего десятилетия

2010 год – по настоящее время – развитие Центров коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» и «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» для обеспечения комплексных потребностей приоритетных направлений науки, техники и технологий

2010 год – создание Зеленоградского нанотехнологического центра по результатам открытого инфраструктурного конкурса Госкорпорации «Роснано»

2010 год – присвоение МИЭТ статуса «Национальный исследовательский университет»

2010–2019 годы – реализация Программы развития «Национального исследовательского университета «МИЭТ»

2018 год – по настоящее время – организация и развитие Центра НТИ «Сенсорика» МИЭТ в рамках реализации Стратегии научно-технологического развития РФ по созданию центров Национальной технологической инициативы

2019 год – МИЭТ отнесен к 1-й категории ведущих университетов, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы гражданского назначения

2019 год – Национальный проект «Цифровая экономика»: создание в МИЭТ лидирующего исследовательского центра России по разработке продуктов, сервисов и платформенных решений на базе сквозных цифровых технологий

2020 год – организация лаборатории по развитию и модернизации биомедицинских приборов и систем обеспечения жизнедеятельности человека по государственному заданию Минобрнауки РФ

2020–2024 годы – Национальный проект «Наука»: грант по обновлению приборной базы МИЭТ в рамках федерального проекта «Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в РФ»

ПОДПИСКА 2021

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

Периодичность журнала - 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

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

Подписной индекс 47570

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

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

через редакцию - с любого номера и до конца года

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru